

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ВЕСТНИК
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

Выпуск **Серия: Строительство и архитектура** **2016**
44(63) Научно-теоретический и производственно-практический журнал

Часть 1

Part 1

Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta

Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura

(Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering

Series: Civil Engineering and Architecture)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1999 г.

Волгоград

ВолгГАСУ

С о д е р ж а н и е

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ, ФУНДАМЕНТЫ,
ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ. МЕХАНИКА ГРУНТОВ

- Бабалич В. С., Вильгельм Ю. С., Власов В. Н., Кузнецов Д. Г., Сухин К. А., Пшеничкина В. А.** К опыту введения в эксплуатацию приостановленных строительством объектов 4
- Богомолов А. Н., Абрамов Г. А., Богомолова О. А., Подтелков В. В., Якименко И. В.** Оценка устойчивости круглых выработок различного диаметра, отработанных в однородном грунтовом откосе на уровне его подошвы 12
- Богомолов А. Н., Богомолова О. А.** Прочностные характеристики слагающего грунта как функции геометрических параметров однородного ненагруженного откоса, находящегося в предельном состоянии 21
- Богомолов А. Н., Олянский Ю. И., Кузнецова С. В., Кузьменко И. Ю., Щекочихина Е. В., Чарыкова С. А.** Проблемы строительства и эксплуатации зданий на лессовых грунтах Северного Причерноморья 31
- Мащенко А. В., Пономарев А. Б.** Анализ влияния армирования фиброволокном на свойства глинистых грунтов в условиях сезонного промерзания и оттаивания 40

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

- Москвичева Е. В., Доскина Э. П., Самойленко М. А., Корнилова Ю. Б., Шишкин Д. А., Ибрагимова З. К.** Выявление факторов, снижающих качество очистки гальваностокос реagentным способом 51
- Москвичева Е. В., Сахарова Н. А., Сахарова А. А., Батманов В. П., Сон В. В., Корнилова Ю. Б.** Определение условий, влияющих на процесс взаимодействия загрязнителей и водных растений 63
- Москвичева Е. В., Стрепетов И. В., Батманов В. П., Доскина Э. П., Ханова Е. Л., Суворова М. А.** Процесс фильтрования с использованием загрузки из нефтеотхода 74
- Москвичева Е. В., Юрьев Ю. Ю., Батманов В. П., Приходченко А. В., Фомин А. А.** Области применения продукта переработки гальвано- и СОЖ-содержащих сточных вод 84

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО. ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Богомолов А. Н., Вольская О. Н., Подтелков В. В., Якименко И. В. Опыт проведения натурных наблюдений и исследований осадков земляных и бетонных сооружений в период строительства и временной эксплуатации на Волгоградском гидроузле	93
Мусаелян С. М., Щекочихина Е. В., Вольская О. Н., Олянский Ю. И. Водохозяйственный комплекс и некоторые аспекты совершенствования декларации безопасности гидротехнических сооружений с учетом пропускной способности гидроузла	103
Саламов А. М., Габибов Ф. Г., Саламов Ф. А., Габимова Л. Ф., Богомолов А. Н. Обобщенный анализ результатов поиска подземных пресных вод для водоснабжения населенных пунктов комплексными геофизическими методами	111
Шубин М. А., Юшин О. В. Мониторинг экологической безопасности прибрежных городских территорий Волгоградского водохранилища	119
Шубин М. А., Юшин О. В. Исследование функционирования берегоукрепительных сооружений в Волгоградском регионе	130

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Калашников С. Ю., Старов А. В. Учет инерции вращения в задачах динамики идеально пластических мембран и пологих оболочек вращения при воздействии высокоинтенсивных нагрузок	139
Калашников С. Ю., Старов А. В. Теоремы о взаимности для круглых мембран и безмоментных оболочек при квазистатическом нагружении	151
Харланова С. В., Пшеничкина В. А., Харланов В. Л. Анализ интенсивности калифорнийского землетрясения 24.08.2014	159
Харланов В. Л., Харланова С. В. Метод решения нелинейных дифференциальных уравнений задач строительной механики	169

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Бурлаченко О. В., Алексиков С. В., Фоменко Н. А. Совершенствование гидромеханического способа защиты гидропривода строительного дорожных машин	179
---	-----

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Алексиков С. В., Лищинский С. А. Обоснование продолжительности периода весеннего ограничения движения автотранспорта в Волгоградской области	192
---	-----

РЕЦЕНЗИЯ	198
----------	-----

Content

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. BASEMENTS, FOUNDATIONS. UNDERGROUND STRUCTURES. SOIL ENGINEERING

Babalich V. S., Vil'gel'm Yu. S., Vlasov V. N., Kuznetsov D. G., Sukhin K. A., Pshenichkina V. A. Experience of putting into operation of suspended construction objects	4
Bogomolov A. N., Abramov G. A., Bogomolova O. A., Podtelkov V. V., Yakimenko I. V. Assessment of stability of circular developments of various diameter finished in homogeneous soil slope at the level of its base	12
Bogomolov A. N., Bogomolova O. A. Strength characteristics of build up soil as function of geometrical parameters of homogeneous non-loaded slope in limit state	21
Bogomolov A. N., Olyanskii Yu. I., Kuznetsova S. V., Kuz'menko I. Yu., Shchekochikhina E. V., Charykova S. A. Problems of construction and operation of buildings on loessial soil in Northern Black sea region	31
Mashchenko A. V., Ponomarev A. B. Analysis of the impact of fiber reinforcing on clay soils in the conditions of seasonal frost penetration and thawing	40

WATER SUPPLY, SEWERAGE, CONSTRUCTIONS FOR WATER RESOURCES PROTECTION

Moskvicheva E. V., Doskina E. P., Samoilenko M. A., Kornilova Yu. B., Shishkin D. A., Ibragimova Z. K. Indication of factors lowering the quality of galvanic reagent cleaning method	51
Moskvicheva E. V., Sakharova N. A., Sakharova A. A., Batmanov V. P., Son V. V., Kornilova Yu. B. Determination of conditions influencing the process of interaction of pollutants and water plants	63
Moskvicheva E. V., Strepetov I. V., Batmanov V. P., Doskina E. P., Khanova E. L., Suvorova M. A. Filtration process with the use of load from oil refinery wastes	74
Moskvicheva E. V., Yur'ev Yu. Yu., Batmanov V. P., Prihodchenko A. V., Fomin A. A. Applications and processing galvan-coolant-containing wastewater	84

HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION. HYDRAULIC SYSTEM AND ENGINEERING HYDROLOGY

Bogomolov A. N., Vol'skaya O. N., Podtelkov V. V., Yakimenko I. V. Experience of field studies and researches of subsidence of earthwork and concrete structures during construction and temporary operation in the Volgograd hydroelectric station dam	93
Musaelyan S. M., Shchekochikhina E. V., Vol'skaya O. N., Olyanskii Yu. I. Water management system and some aspects of improvement of safety declaration of waterworks with account of capacity of waterworks facility	103
Salamov A. M., Gabibov F. G., Salamov F. A., Gabibova L. F., Bogomolov A. N. General analysis of the results of searching for underground fresh water for water supply of settlements by complex geophysical methods	111
Shubin M. A., Yushin O. V. Ecological security monitoring of the coastal city territories of the Volgograd reservoir	119
Shubin M. A., Yushin O. V. Investigation of functioning of bank protecting structures in the Volgograd region	130

STRUCTURAL MECHANICS

Kalashnikov S. Yu., Starov A. V. Rotary inertia account in problems of dynamics of ideally plastic membranes and rotation shallow shells at effect of high-intensity loads	139
Kalashnikov S. Yu., Starov A. V. Theorems of reciprocity for circular membranes and momentless shells under quasistatic load	151
Kharlanova S. V., Pshenichkina V. A., Kharlanov V. L. Analysis of the intensity of the Californian earthquake in august 24, 2014	159
Kharlanov V. L., Kharlanova S. V. Solution method for nonlinear differential equations of construction mechanics problems	169

TECHNOLOGY AND CONTROL IN CONSTRUCTION

Burlachenko O. V., Aleksikov S. V., Fomenko N. A. Improvement of hydromechanical way of protection of hydraulic gear of road construction machines	179
---	-----

DESIGN, CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF HIGHWAYS, SUBWAYS, AERODROMES, BRIDGES AND TRAFFIC TUNNELS

Aleksikov S. V., Lishchinskii S. A. Justification of duration of the period of spring limit of traffic in Volgograd oblast	192
---	-----

REVIEW	198
--------	-----

УДК 69.059.4-027.16

**В. С. Бабалич, Ю. С. Вильгельм, В. Н. Власов, Д. Г. Кузнецов, К. А. Сухин,
В. А. Пшеничкина**

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

К ОПЫТУ ВВЕДЕНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ПРИОСТАНОВЛЕННЫХ СТРОИТЕЛЬСТВОМ ОБЪЕКТОВ

Приведены результаты экспериментально-расчетных оценок технического состояния железобетонных конструкций плавательного бассейна, строительство которого приостановлено. Разработаны оригинальные ремонтно-восстановительные мероприятия, компенсирующие проектные и строительные ошибки. Выполнено натурное испытание конструкций бассейна и ввод его в эксплуатацию после реализации ремонтно-восстановительных мероприятий.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ввод в эксплуатацию; незавершенное строительство; параметры эксплуатационных качеств; усиление конструкций, натурные испытания.

К сожалению, количество объектов, приостановленных строительством, по разным причинам сокращается не так быстро. Это замораживает значительные финансовые вложения и снижает их эффективность. В данной статье приводится достаточно удачный опыт восстановления и достройки плавательного бассейна в республиканском спортивном комплексе, расположенном в 1-ом микрорайоне г. Элиста.

Строительство плавательного бассейна республиканского спортивного комплекса было приостановлено в 2008 г. при выявлении, после распубликования железобетонных конструкций, значительных и критических повреждений боковых стенок ванны бассейна. Специалистами кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета (ВолгГАСУ)¹ по запросу Министерства по строительству, транспорту и дорожному хозяйству Республики Калмыкия были установлены причины повреждений и предложены мероприятия по восстановлению эксплуатационных параметров поврежденных конструкций. Предложенные в отчете ремонтно-восстановительные мероприятия были частично реализованы без документирования выполненных работ, а из-за отсутствия финансирования строительство объекта остановлено.

Характерной особенностью данного объекта также являлось крайне неудовлетворительное качество изготовления монолитных железобетонных конструкций ванны бассейна, с многочисленными отступлениями от требований действующих норм^{2,3}.

¹ Техническое заключение по результатам оценки технического состояния строящегося плавательного бассейна объекта «Республиканский спортивный комплекс в 1-ом мкр. г. Элиста» / Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет. — Волгоград : ВолгГАСУ, 2008. — 74 с.

² СТО НОСТРОЙ 2.6.54—2011. Конструкции монолитные бетонные и железобетонные. Технические требования к производству работ, правила и методы контроля / НОСТРОЙ Изд. БСТ — М. : 2011. — 197 с.

³ СП 63.13330.2010. Бетонные и железобетонные конструкции. Актуализированная версия СНиП 52-01-2003 / Минрегион России. — М. : ФГУ ФЦС 2012. — 280 с.

В 2014 г. было принято решение о достройке объекта. Авторы проектной документации, ссылаясь на низкое качество работ при возведении бассейна и отсутствие адекватного строительного контроля и авторского надзора, отказываются от разработки проекта достройки объекта. Поэтому Министерство по строительству, транспорту и дорожному хозяйству Республики Калмыкии обратилось в ВолгГАСУ с запросом о разработке проекта достройки объекта.

В рамках реализации данного запроса была разработана программа восстановления параметров эксплуатационных качеств строительных конструкций чаши бассейна, которая включала в себя следующие этапы:

экспериментальная идентификация реализованных строительных конструкций ванны бассейна по параметрам армирования, прочностным характеристикам бетона;

экспериментально-экспертная оценка узлов сопряжений основных конструкций;

экспериментальная идентификация дефектов и повреждений строительных конструкций ванны бассейна, а также степени их конструктивной деградации с момента предыдущего обследования выполненного под руководством к. т. н. доцента В. Г. Цыбиноги;

расчетное обоснование возведенных основных строительных конструкций с учетом проектных решений и реализованных параметров качества;

разработка проекта усиления с дефицитом несущей способности;

натурные испытания чаши бассейна проектной нагрузкой.

Первоначально было выполнено полномасштабное детальное обследование объекта с целью оценки современного состояния строительных конструкций⁴, объема и качества выполненных восстановительных мероприятий, регламентированных предыдущим обследованием.

На фронтальной стене глубоководной части бассейна выявлен фрагментарный демонтаж этой монолитной конструкции и добетонирование стены с увеличением ее толщины по сравнению с проектными размерами. Причем усиление и добетонирование стенок несущих конструкций бассейна были реализованы хаотично, без надзора и контроля со стороны Заказчика и авторов проекта (рис. 1, 2).



Рис. 1. Демонтаж дефектной зоны передней стенки ванны бассейна



Рис. 2. Дефекты бетонирования дна ванны бассейна

⁴ СП 13-102—2003*. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений / Госстрой России. М. : ФГУП «ФЦС», 2011. 31 с.

Затем математическим моделированием напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов пространственной системы «сооружение — основание» (рис. 3, 4) была произведена ревизия проектных решений строительных конструкций бассейна с учетом их реального состояния. Данный расчет выявил значительный дефицит несущей способности железобетонных конструкций ванны бассейна, прежде всего ее глубинной части, а именно — торцевой стены, и незначительный дефицит в продольных стенах глубоководной части и отдельных балок днища.

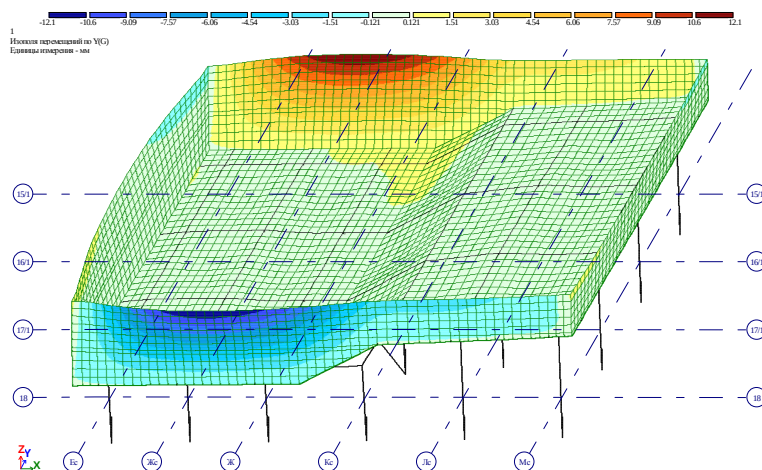


Рис. 3. Изополюс горизонтальных (по оси Y) перемещений оболочки ванны

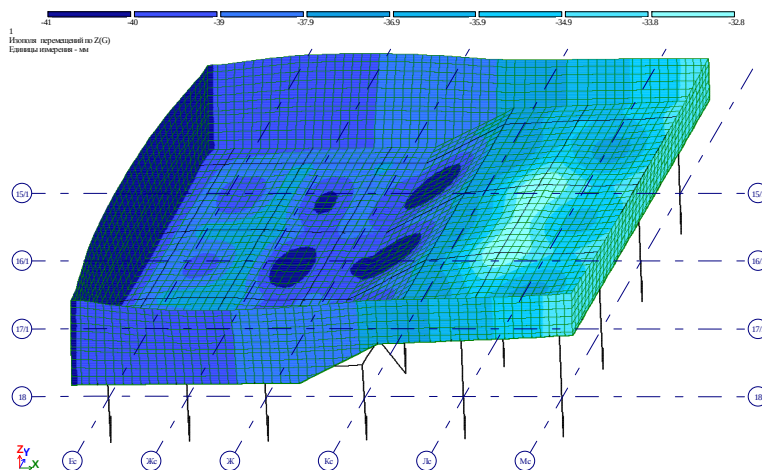


Рис. 4. Изополюс вертикальных перемещений оболочки ванны

По результатам математического моделирования НДС строительных конструкций чаши бассейна был разработан проект компенсационных мероприятий для ликвидации выявленного дефицита несущей способности отдельных конструкций. Учитывая специфичность восстанавливаемого объекта и степень его строительной готовности, были приняты нестандартные, с минимальным вмешательством, решения по компенсации дефицита несущей

способности конструкций, установкой дополнительного стержневого армирования и наращиванием сечения с помощью торкретирования (для максимально перегруженной торцевой стены глубоководной части). Балки днища бассейна усилены металлическими рамными конструкциями (рис. 5). Плоские элементы ванны бассейна усилены устройством внешнего армирования из углепластика⁵ [1, 2]. При разработке восстановительных мероприятий особый акцент ставился на ускорение строительно-монтажных работ из-за необходимости скорейшего ввода объекта в эксплуатацию.

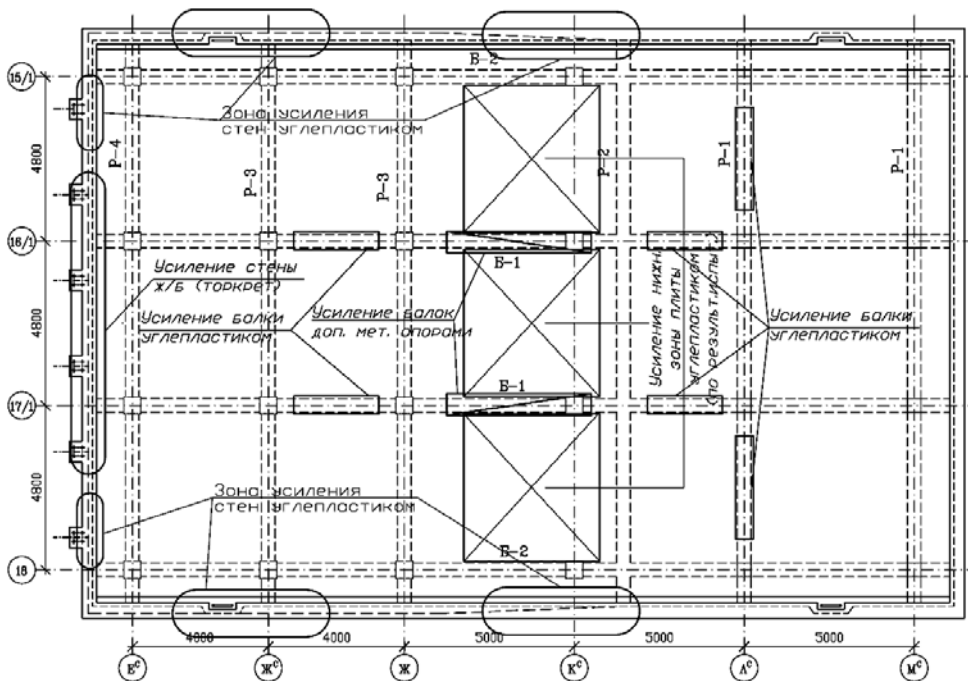


Рис. 5. Зоны усиления несущих конструкций ванны бассейна

Для адекватной интегральной оценки качества реализованных ремонтно-восстановительных мероприятий и общих параметров механической безопасности плавательного бассейна в минимальные сроки после выполнения ремонтных работ было проведено натурное испытание сооружения эксплуатационной нагрузкой.

Оценка НДС максимально нагруженных элементов сооружения осуществлялась образцовыми прогибомерами ПАО-6 с ценой деления 0,01 мм. Схема расположения прогибомеров приведена на рис. 6, отсчеты с приборов снимались каждый час. Скорость нагружения сооружения была обусловлена производительностью инженерного оборудования бассейна. Низкая скорость нагружения бассейна позволила не делать временную выдержку на каждом этапе, т. е. вести нагружение непрерывно.

⁵ СП 63.13330.2010. Бетонные и железобетонные конструкции. Актуализированная версия СНиП 52-01—2003 / Минрегион России. М. : ФГУ ФЦС 2012. 280 с.

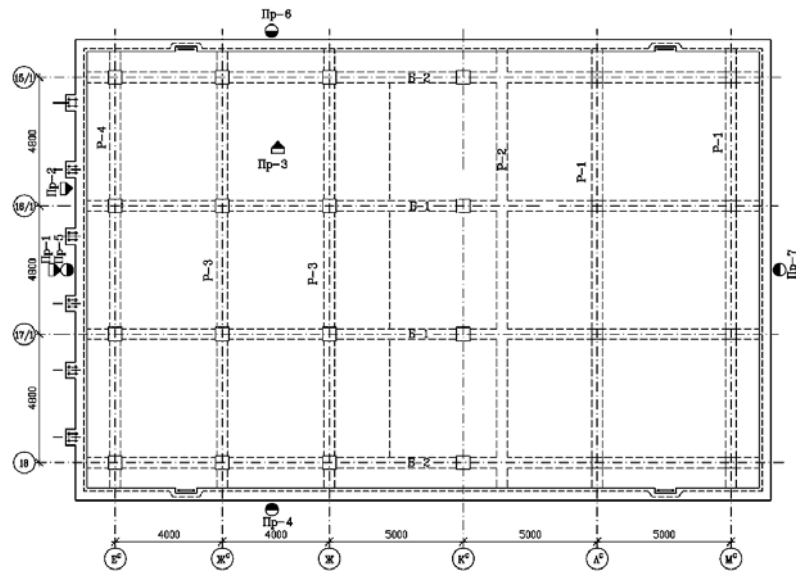


Рис. 6. Схема расположения прогибомеров при натурном испытании ванны бассейна

В процессе испытаний производился сплошной контроль кинетики трещинообразования железобетонных конструкций. Ширина раскрытия трещин фиксировалась штриховым масштабом Rissbreimeter с точностью $\pm 0,05$ мм, а глубина трещин оценивалась ультразвуковым тестером УК-1401 с точностью $\pm 1,0$ мм. Полная нагрузка бассейна выдерживалась в течение 12 ч со снятием отчетов с приборов и фиксации кинетики трещинообразования каждый час. Затем течение 72 ч регулярно фиксировалась кинетика трещинообразования (рис. 7, 8).

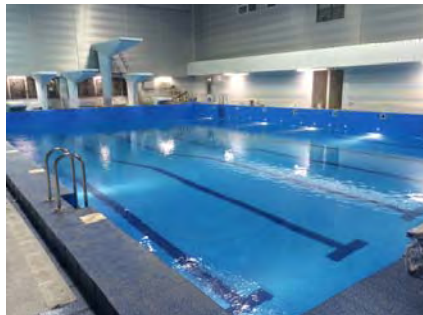


Рис. 7. Общий вид ванны бассейна в процессе нагружения



Рис. 8. Общий вид прогибомера (точка 1)

В процессе испытаний на этапе 50 % загрузки ванны на нижней грани ее наклонной части появились трещины вдоль длинной стороны бассейна. При дальнейшем нагружении ширина раскрытия трещин a_{crs} достигла 0,85 мм, а глубина трещин не превысила толщины защитного слоя бетона. Величина деформаций наиболее нагруженных элементов при полной нагрузке не превысила расчетных величин (рис. 9). Результаты измерений в процессе испытания приведены в табл.



Рис. 9. График перемещений в месте установки прогибомера (точка 1)

Время, ч-мин	Интервал времени между отсчетами, ч-мин	Прогибомер в точке измерения 1			Суммарное время $\sum t$, ч-мин	Примечание
		S1	$\Delta 1$, мм	$f1$, мм		
1	2	3	4	5	6	7
16:07	0:00	2098	0,00	0,00	0:00	
20:00	3:53	2116	0,18	0,18	3:53	
22:00	2:00	2129	0,13	0,31	5:53	
0:00	2:00	2136	0,07	0,38	7:53	
2:00	2:00	2146	0,10	0,48	9:53	
4:00	2:00	2153	0,07	0,55	11:53	
6:00	2:00	2158	0,05	0,60	13:53	
8:00	2:00	2159	0,01	0,61	15:53	
10:00	2:00	2181	0,00	0,61	17:53	
12:00	2:00	2178	-0,03	0,58	19:53	
14:00	2:00	2178	0,00	0,58	21:53	
16:00	2:00	2177	-0,01	0,57	23:53	
18:00	2:00	2170	-0,07	0,50	25:53	
20:00	2:00	2156	-0,14	0,36	27:53	
22:00	2:00	2140	-0,16	0,20	29:53	
0:00	2:00	2119	-0,21	-0,01	31:53	
2:00	2:00	2093	-0,26	-0,27	33:53	
4:00	2:00	2065	-0,28	-0,55	34:53	
6:00	2:00	2030	-0,35	-0,90	36:53	
8:00	2:00	1970	-0,60	-1,50	38:53	
10:00	2:00	1890	-0,80	-2,30	40:53	
10:15	0:15	1885	-0,05	-2,35	41:08	В 10:08 завер- шен налив воды
12:00	1:45	1876	-0,09	-2,44	43:00	
13:00	1:00	1868	-0,08	-2,52	44:00	
14:00	1:00	1864	-0,04	-2,56	45:00	

После выдержки бассейна с полной нагрузкой в течение более 3,5 сут. воду слили и выполнили усиление поврежденных участков днища внешним армированием из углепластика.

По результатам испытаний принято решение о возможности безопасной эксплуатации бассейна с проектным технологическим режимом с постоянным мониторингом технического состояния строительных конструкций бассейна и учетом требований⁶ в течение не менее одного года. В настоящее время объект сдан в эксплуатацию и используется по назначению с проектными параметрами эксплуатационных качеств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Grace N. F. Concrete Repair with CFRP // Concrete international. 2004. Vol. 26. Iss. 5. Pp. 45—51.
2. Bizindavayi L., Neale K. W. Transfer Lengths and Bond Strengths for Composites Bonded to Concrete // Journal of Composites for Construction. 1999. Vol. 3. Iss. 4. Pp. 153—160.

© Бабалич В. С., Вильгельм Ю. С., Власов В. Н., Кузнецов Д. Г., Сухин К. А., Пшеничкина В. А., 2016

Поступила в редакцию
в марте 2016 г.

Ссылка для цитирования:

К опыту введения в эксплуатацию приостановленных строительством объектов / В. С. Бабалич, Ю. С. Вильгельм, В. Н. Власов, Д. Г. Кузнецов, К. А. Сухин, В. А. Пшеничкина // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 4—11.

Об авторах:

Бабалич Валентин Степанович — канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, vbabalich@yandex.ru

Вильгельм Юрий Степанович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Власов Владимир Николаевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Кузнецов Денис Григорьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, tandin@yandex.ru

Сухин Кирилл Александрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, suhin.kirill@mail.ru

Пшеничкина Валерия Александровна — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, vap_hm@list.ru

⁶ ГОСТ 31937—2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М. : Стандартинформ, 2011. 89 с.

**V. S. Babalich, Yu. S. Vil'gel'm, V. N. Vlasov, D. G. Kuznetsov, K. A. Sukhin,
V. A. Pshenichkina**

EXPERIENCE OF PUTTING INTO OPERATION OF SUSPENDED CONSTRUCTION OBJECTS

The results of experimental estimates of technical state of reinforced concrete structures of the swimming pool, the construction of which was suspended, are given in the article. The authors have designed the original recovery measures to compensate for the design and construction errors. Full-scale test of the structures of the pool and putting it into operation after the fulfillment of recovery work is carried out.

Key words: putting into operation, construction in progress, performance parameters, strengthening of structures, full-scale tests.

REFERENCES

1. Grace N. F. Concrete Repair with CFRP. *Concrete international*, 2004, 26(5), pp. 45—51.
2. Bizindavyi L., Neale K. W. Transfer Lengths and Bond Strengths for Composites Bonded to Concrete. *Journal of Composites for Construction*, 1999, 3(4), pp. 153—160.

For citation:

Babalich V. S., Vil'gel'm Yu. S., Vlasov V. N., Kuznetsov D. G., Sukhin K. A., Pshenichkina V. A. [Experience of putting into operation of suspended construction objects]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 4—11.

About authors:

Babalich Valentin Stepanovich — Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, vbabalich@yandex.ru

Vil'gel'm Yuri Stepanovich — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Vlasov Vladimir Nikolaevich — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Kuznetsov Denis Grigor'evich — Candidate of Engineering Science, Docent of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, tandin@yandex.ru

Sukhin Kirill Aleksandrovich — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, sukhin.kirill@mail.ru

Pshenichkina Valeriya Aleksandrovna — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, vap_hm@list.ru

УДК 624.137.2

**А. Н. Богомолов^{а, б}, Г. А. Абрамов^а, О. А. Богомолова^а, В. В. Подтелков^а,
И. В. Якименко^а**

^а *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^б *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ КРУГЛЫХ ВЫРАБОТОК РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА, ОТРАБОТАННЫХ В ОДНОРОДНОМ ГРУНТОВОМ ОТКОСЕ НА УРОВНЕ ЕГО ПОДОШВЫ

Рассматривается устойчивость горизонтальных выработок круглого поперечного сечения, отработанных в однородном грунтовом откосе. Для условий, рассмотренных в работе, определены численные значения угла внутреннего трения грунта вмещающего массива, при которых контуры выработок свободны от областей неупругих деформаций. Приведены графические зависимости и их математические аппроксимации, позволяющие определять безопасную величину угла внутреннего трения грунта вмещающего массива для любого сочетания переменных расчетных параметров, рассмотренных в работе. Предложен инженерный способ расчета определения критического значения угла внутреннего трения. Выполнены сопоставительные расчеты, результаты которых позволяют рекомендовать предложенный инженерный метод для предварительной оценки устойчивости круглой выработки, отработанной в однородном грунтовом откосе на глубине, соответствующей уровню основания откоса

К л ю ч е в ы е с л о в а: грунтовый откос, круглая горизонтальная выработка, критерий устойчивости выработки, физико-механические свойства грунта, контрольное значение угла внутреннего трения.

В статье [1] описан один из возможных путей оценки устойчивости подземной выработки круглого сечения переменного диаметра, обрабатываемой в однородном грунтовом откосе на глубине, соответствующей уровню его подошвы при условии, что центр выработки находится на одинаковом расстоянии $L = h$ от точки перехода откоса в подошву.

Оценка устойчивости подземной выработки проведена при помощи критерия длительной устойчивости грунтового массива, представленного в работах [2—6].

Качественным признаком используемого критерия прочности является отсутствие на контуре выработки точек, в которых получили развитие пластические деформации (для связных грунтов) или начались процессы разрыхления или дробления (для скальных грунтов).

Для связных грунтов в качестве количественного показателя критерия прочности могут быть выбраны либо удельное сцепление c , либо угол внутреннего трения φ , либо величина приведенного давления связности $\sigma_{св} = c(\gamma h \tan \varphi)^{-1}$ грунта, которые определяют прочность грунта. Отметим, что величина $\sigma_{св}$ в определенном смысле является универсальной величиной, так как связывает между собой физико-механические свойства грунта и геометрический параметр h — высоту откоса.

Для отыскания областей сдвига рекомендуется использовать условие прочности Кулона [7], которое может быть записано в следующих транскрипциях:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= (\sigma_1 + \sigma_2 + 2\sigma_{св}) \sin \varphi \\ \text{или} \\ (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2 &= (\sigma_x + \sigma_z + 2\sigma_{св})^2 \sin^2 \varphi, \\ \text{или} \\ \operatorname{tg} \theta_{\max} &= \operatorname{tg} \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где σ_1 и σ_2 — главные нормальные напряжения; σ_x , σ_z , τ_{xz} — компоненты напряжения в точке грунтового массива.

Если откос сложен однородным связным грунтом, то для отыскания численных значений c и φ можно использовать методы, описанные, например, в работе [8]. Если грунты, образующие откос, являются скальными, то для отыскания их прочностных характеристик можно использовать рекомендации, приведенные в работе [9].

Для того чтобы формулы (1) можно было применить для отыскания областей сдвигов в массиве скального грунта, необходимо воспользоваться известными формулами проф. В. В. Соколовского [10, 11] и вычислить численные значения прочностных характеристик скального грунта, эквивалентных прочностным свойствам связного глинистого грунта, используя при этом значения пределов прочности при растяжении R_p и сжатии $R_{сж}$ соответствующего скального грунта:

$$c^{\text{экв}} = 0,5(R_p R_{сж})^{0,5};$$

$$\varphi^{\text{экв}} = \arcsin \left(\frac{R_{сж} - R_p}{R_p + R_{сж}} \right).$$

В настоящей статье рассмотрена устойчивость одиночных горизонтальных выработок круглого сечения переменного диаметра $d = (0,05; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3)h$, которые поочередно располагаются на расстояниях $L = h$; $L = h + ((2h / \operatorname{tg} \beta - h) / 2)$; $L = 2h / \operatorname{tg} \beta$ от точки A перехода откоса в подошву. Угол откоса принимает три значения $\beta = 25^\circ; 45^\circ; 60^\circ$, а величине приведенного давления связности при расчете присваиваются шесть значений $\sigma_{св} = 0,1; 0,5; 1; 2; 2,75; 3,5$.

Все вычисления выполнены при величине коэффициента бокового давления $\xi_0 = 0,75$, что соответствует среднему значению для глинистых грунтов [12—14] при помощи компьютерной программы «Устойчивость. Напряженное состояние» [15], разработанной в Волгоградском государственном архитектурно-строительном университете. В этой программе реализована, в частности, модель линейно деформируемой упругой среды, а для вычисления напряжений в точках приоткосной области формализованы метод конечных элементов (МКЭ), который используется при проведении настоящего исследования, и аналитические решения граничных задач теории упругости методами теории функций комплексного переменного.

Вид расчетной схемы МКЭ с основными геометрическими размерами и граничными условиями приведен на рис. 1.

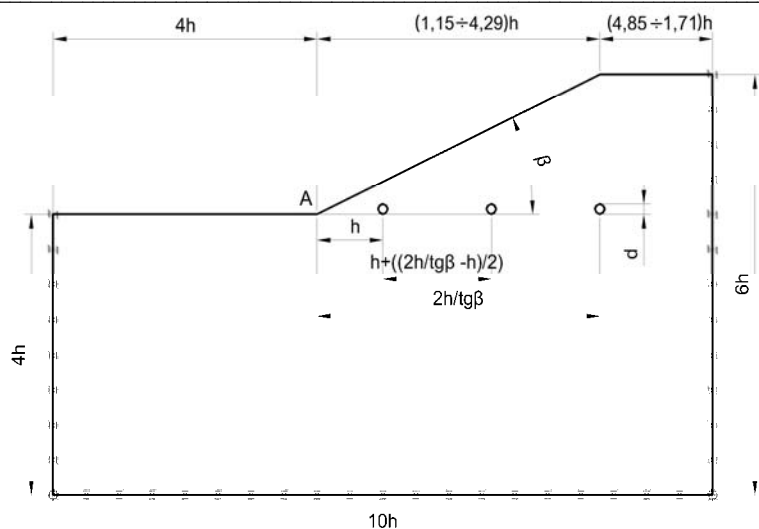


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы МКЭ, ее геометрические параметры и граничные условия

В результате выполненных расчетов для всех возможных сочетаний численных значений переменных расчетных параметров определены «безопасные» значения углов внутреннего трения грунта вмещающего массива φ_6 , которые обеспечивают присутствие качественного признака. На основании анализа результатов вычислений построены графические зависимости вида $\varphi_6 = f(\sigma_{св})$, которые приведены на рис. 2.

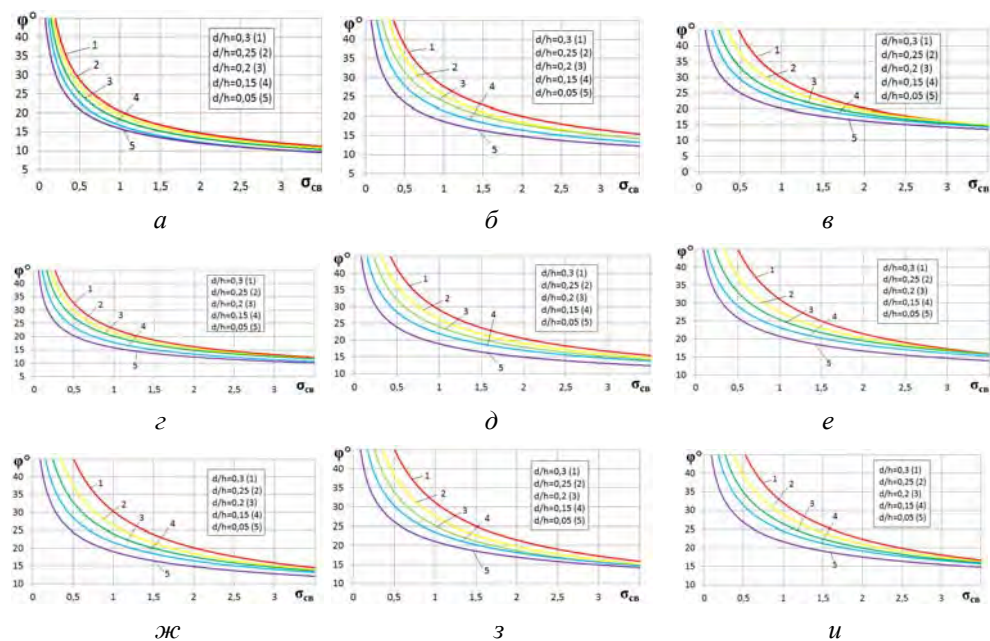


Рис 2. Графические зависимости вида $\varphi_6 = f(\sigma_{св})$ при $\beta = 25^\circ$ (а, г, ж); $\beta = 45^\circ$ (б, д, з); $\beta = 60^\circ$ (в, е, и) при расстоянии от центра выработки до точки А $L = h$ (а); $L = h + ((2h / \text{tg}\beta - h) / 2)$ (б) и $L = 2h / \text{tg}\beta$ соответственно

Установлено, что все полученные кривые, как и ранее [1], могут быть аппроксимированы выражением:

$$\varphi_6 = a\sigma_{св}^b, \quad (2)$$

где a и b — действительные коэффициенты, причем, коэффициент a имеет размерность (град), а коэффициент b — безразмерная величина.

В результате анализа численных значений коэффициентов, входящих в выражение (2), построены графики для определения их численных значений, которые приведены на рис. 3, 4.

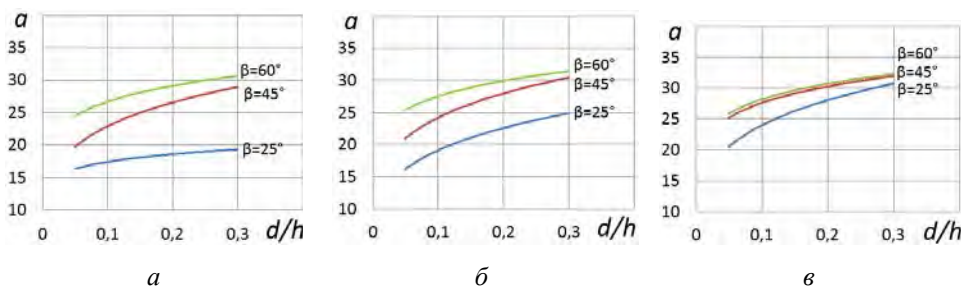


Рис. 3. Графики для определения численного значения коэффициента a в зависимости от относительного диаметра выработки при $L = h$ (а); $L = h + ((2h / \operatorname{tg} \beta - h) / 2)$ (б) и $L = 2h / \operatorname{tg} \beta$ (в)

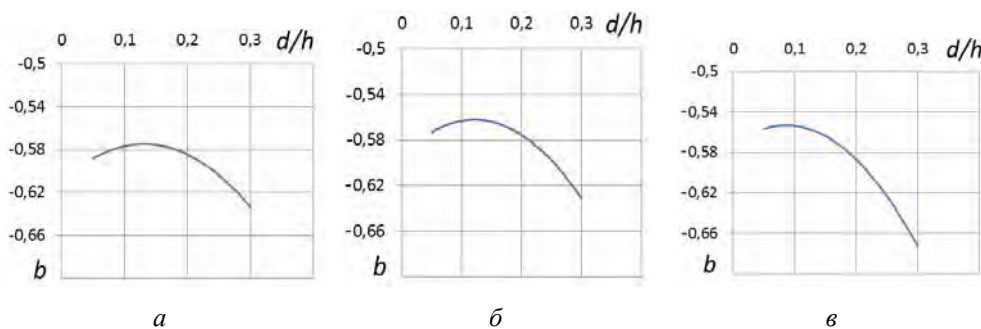


Рис. 4. Графики для определения численного значения коэффициента b в зависимости от относительного диаметра выработки при $L = h$ (а); $L = h + ((2h / \operatorname{tg} \beta - h) / 2)$ (б) и $L = 2h / \operatorname{tg} \beta$ (в)

Анализ кривых, приведенных на рис. 4, показывает, что изменение относительного (в долях h) диаметра выработки от 0,05 до 0,3 при всех рассмотренных расстояниях от центра выработки до точки A , влечет за собой изменение величины коэффициента b на 7...18 %. В результате проведения дополнительных вычислений установлено: если принять значение коэффициента b постоянным и равным $b = -0,62$, то численные значения величины φ_6 , полученные на основании формулы (4) и графиков, приведенных на рис. 4 и 5, будут отличаться от соответствующих значений φ_6 , вычисленных по формуле

$$\varphi_6 = a\sigma_{св}^{-0,62}, \quad (3)$$

с использованием графиков, приведенных на рис. 3, не более чем на 10 %, причем это отличие идет в запас устойчивости.

Графические зависимости, представленные на рис. 2, формула (3) и графики для определения численных значений коэффициента a в совокупности представляют основу инженерного метода оценки устойчивости одиночной выработки, отработанной в грунтовом откосе, алгоритм которого лег в основу решения следующей задачи.

Рассмотрим пример. Дано: пусть угол заложения откоса $\beta = 30^\circ$, диаметр выработки $d = 0,1h$, расстояние $L = 1,3h$, а физико-механические свойства слагающего грунта таковы, что величина приведенного давления связанности $\sigma_{св} = 3$.

Требуется определить величину угла внутреннего трения грунта, при котором, на контуре выработки отсутствуют области пластических деформаций.

Решение. По графикам, приведенным на рис. 3 a , b , соответствующих значениям $L = h$ и $L = 2,64h$ (при $\beta = 25^\circ$), $L = 1,5h$ (при $\beta = 45^\circ$) при помощи метода линейной интерполяции определяем численные значения коэффициента a при условии, что $d = 0,1h$ и $\beta = 30^\circ$. В результате получаем значения $a = 19$ и $a = 20,3$. Повторно применяя метод линейной интерполяции, определим величину коэффициента a , при $L = 1,3h$; его величина равна $a = 19,3$.

Аналогичные операции выполнены для коэффициента b . Численное значение этого коэффициента оказалось равным $b = -0,575$.

Подставляем полученные значения коэффициентов и величины приведенного давления связанности $\sigma_{св} = 3$ в формулу (2), определяем значение величины «безопасного» угла внутреннего трения, которое соответствует условиям поставленной задачи. Оказалось, что $\phi_6 = 10,28^\circ$.

Искомое значение угла внутреннего трения можно определить, непосредственно используя графики, приведенные на рис. 2. Полагая, что $\sigma_{св} = 3$ и $d = 0,1h$, и выполняя процедуру линейной интерполяции, получаем, что при $L = h$ величина $\phi_6 = 9,1^\circ$ (соответствует значению $\beta = 25^\circ$), $\phi_6 = 12,9^\circ$ (соответствует значению $\beta = 45^\circ$).

Из графиков (рис. 2) видно: если $L = 2,64h$ (при $\beta = 25^\circ$), $L = 1,5h$ (при $\beta = 45^\circ$), то соответствующие значения углов внутреннего трения $\phi_6 = 11,1^\circ$ (при $\beta = 25^\circ$), $\phi_6 = 13,9^\circ$ (при $\beta = 45^\circ$). Еще раз проведя операцию линейного интерполирования, получаем значения безопасного угла внутреннего трения, при условии, что $L = 1,3h$: $\phi_6 = 9,59^\circ$ (при $\beta = 25^\circ$), $\phi_6 = 13,14^\circ$ (при $\beta = 45^\circ$). И наконец, выполнив последнюю операцию линейного интерполирования, получим, что $\phi_6 = 10,47^\circ$, при условии, что угол заложения откоса $\beta = 30^\circ$.

Определим теперь, какой будет величина безопасного угла внутреннего трения, если ее рассчитать при помощи компьютерной программы «Устойчивость. Напряженное состояние» [1], которая принята нами в качестве инструмента исследования. Для проведения вычислений составлена расчетная схема МКЭ (рис. 5), которая соответствует условиям поставленной задачи. Расчетная схема состоит из 1009 треугольных конечных элементов, сопряженных в 540 узлах; ширина матрицы жесткости системы равна 864.

В результате вычислений установлено, что величина безопасного угла внутреннего трения равна $\phi_6 = 9,49^\circ$. Сравнивая два приведенных выше значения ϕ_6 , получим, что они отличаются от данного значения не более чем на 8,3 % и 10,2 %, причем погрешность вычислений идет в запас устойчивости.

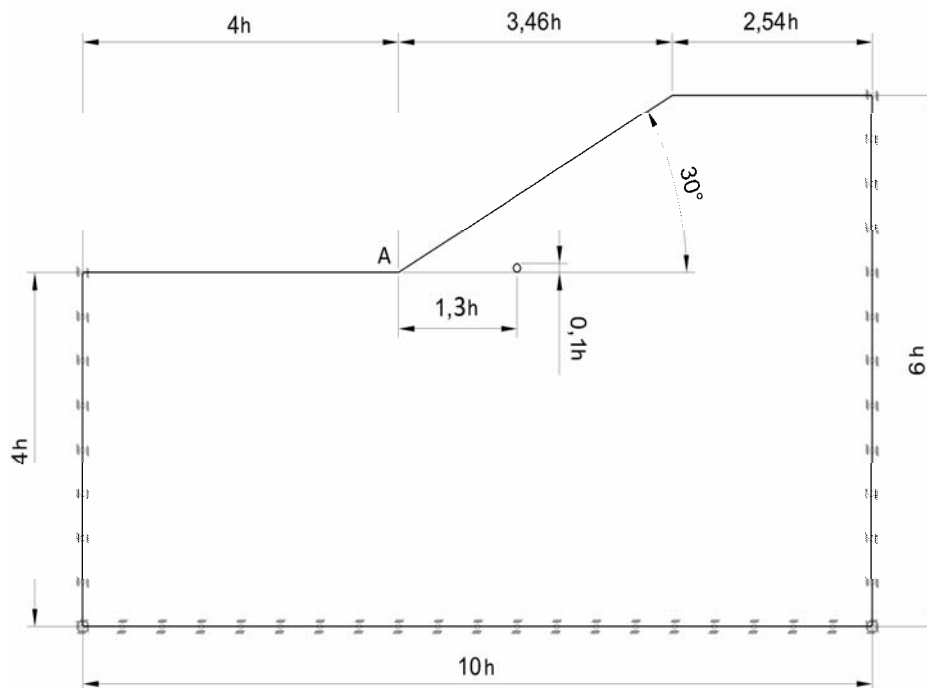


Рис. 5. Расчетная схема МКЭ для рассматриваемого примера

На основе анализа приведенных результатов, можно сделать следующие

ВЫВОДЫ:

1. Устойчивость горизонтальной выработки круглого поперечного сечения, отработанной на уровне подошвы однородного откоса, зависит от его геометрических параметров, геометрических размеров и положения выработки в теле откоса, физико-механических свойств слагающего связного грунта. Причем, чем ближе выработка расположена к основанию откоса, тем интенсивнее, при всех прочих равных условиях, протекает процесс образования и развития областей пластических деформаций на ее контуре.

2. Получены графические зависимости и записаны выражения, использование которых в совокупности с методом линейной интерполяции, позволяет для всех имеющих физический смысл сочетаний численных значений переменных расчетных параметров отыскать величину безопасного угла внутреннего трения ϕ_b , при которой на контуре выработки отсутствуют области пластических деформаций. Поэтому представленные графические зависимости, аналитические выражения, последовательность вычислений и метод линейной интерполяции в совокупности представляют инженерный метод предварительной оценки устойчивости горизонтальной выработки круглого поперечного сечения, отработанной в однородном грунтовой откосе на уровне его подошвы.

3. Результаты поверочного расчета показали, что численные значения величины безопасного угла внутреннего трения, полученные при помощи предложенного инженерного метода, отличаются не более чем на 10,2 % от результатов, полученных при непосредственном использовании компьютерной программы [15], причем эта погрешность идет в запас устойчивости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Расчет устойчивости незакрепленной круглой выработки, пройденной в грунтовом откосе / А. Н. Богомолов, Г. А. Абрамов, О. А. Богомолова, Е. В. Цветкова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 5—13.
2. Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Шиян С. И. О двух критериях устойчивости грунтовых откосов и склонов // Современные технологии в строительстве. Теория и практика : материалы Всерос. семинара-совещ. зав. каф. «Строит. пр-во» и междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию строит. фак. ПГТУ (г. Пермь, 22—23 сент. 2009 г.). Пермь : ПГТУ, 2009. С. 54—58.
3. Богомолов А. Н., Шиян С. И. О критерии безопасной эксплуатации грунтового откоса судоходного канала // Фундаментальные исследования. 2008. № 4. С. 95—98.
4. Богомолов А. Н., Шиян С. И., Богомолова О. А. Расчет устойчивости откосов с учетом их взаимного влияния в составе грунтового сооружения // Гидротехническое строительство. 2014. № 7. С. 37—40.
5. Критерий безопасной эксплуатации и коэффициенты запаса оползнеопасных склонов / А. Н. Богомолов, С. И. Шиян, О. А. Богомолова, М. Ю. Нестратов, А. В. Соловьев // Збірник наукових праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво. Присвяч. пам'яті д-ра техн. наук, проф. О. Г. Онищенко. Полтава : [ПолтНТУ], 2010. Вып. 3(28). С. 49—54.
6. Новый критерий оценки длительной устойчивости однородных откосов на основе анализа напряженно-деформированного состояния / А. Н. Богомолов, М. Ю. Нестратов, А. В. Соловьев, С. И. Шиян // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2009. Вып. 14(33). С. 5—12.
7. Coulomb C. Application des règles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture. Memoires de savants etrangers de L'Academie des sciences de Paris, 1773.
8. Трофименков Ю. Г., Воробков Л. Н. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. М.: Стройиздат, 1981. 215 с.
9. Ломтадзе В. Д. Физико-механические характеристики горных пород. Методы лабораторных исследований. Л. : Недра, 1990. 328 с.
10. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М.; Ленинград : АН СССР, 1942. 207 с.
11. Соколовский В. В. Теория пластичности. М.: АН СССР, 1946. 520 с.
12. Вялов С. С., Зарецкий Ю. К. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений. М. : АН СССР, 1962. 254 с.
13. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Стройиздат, 1978. 447 с.
14. Вялов С. С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов. М.: АН СССР, 1959. 310 с.
15. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние) : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ : пат. Рос. Федерации № 2009613499 / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, М. Ю. Нестратов, Н. Н. Нестратов, Н. Н. Потапова, М. М. Степанов, А. Н. Ушаков ; опубли. 18.12.2009, Бюл. № 23 ; заявл. 19.05.2009 ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2009. 1 с.

© Богомолов А. Н., Абрамов Г. А., Богомолова О. А., Подтелков В. В., Якименко И. В., 2016

Поступила в редакцию
в апреле 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Оценка устойчивости круглых выработок различного диаметра, отработанных в однородном грунтовом откосе на уровне его подошвы / А. Н. Богомолов, Г. А. Абрамов, О. А. Богомолова, В. В. Подтелков, И. В. Якименко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 12—20.

Об авторах:

Богомолов Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; проф. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, banzaritcyn@mail.ru

Абрамов Генрих Артурович — аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, z_genrih@mail.ru

Богомолова Оксана Александровна — канд. техн. наук, доц. кафедры математики и информационных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, banzaritcyn@mail.ru

Подтелков Василий Владимирович — кандидат техн. наук, докторант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Якименко Игорь Валерьевич — соискатель кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

A. N. Bogomolov, G. A. Abramov, O. A. Bogomolova, V. V. Podtelkov, I. V. Yakimenko

ASSESSMENT OF STABILITY OF CIRCULAR DEVELOPMENTS OF VARIOUS DIAMETER FINISHED IN HOMOGENEOUS SOIL SLOPE AT THE LEVEL OF ITS BASE

Stability of horizontal developments of circular cross section finished in homogeneous soil slope is considered. For the conditions provided in the paper the authors define numerical values of the internal friction angle of soil of host massif, at which the contours of developments are free from areas of inelastic strain. Graphic dependences and their mathematical approximations allowing to determine the safe degree of internal friction angle of soil of host massif for any combination of the variable calculated parameters considered in the article are provided. Engineering method of calculation of determination of critical degree of internal friction angel is offered. Comparative calculations, the results of which allow to recommend the offered engineering method for a preliminary assessment of stability of circular development finished in homogeneous soil slope at a depth corresponding to the level of the slope base are done.

Key words: soil slope, circular horizontal development, criterion of stability of development, physical and mechanical properties of soil, control degree of internal friction angle.

REFERENCES

1. Bogomolov A. N., Abramov G. A., Bogomolova O. A., Tsvetkova E. V. [Calculation of stability of unsupported round development in soil slope]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 5—13.
2. Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Shiyani S. I. [About Two Criteria of Stability of Soil Slopes and Slants]. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika* [Modern Technologies in Construction. Theory and Practice. Proc. of All-Russian Seminar, Perm, 22—23 Sep. 2009]. Perm, PSTU Publ., 2009. Pp. 54—58.
3. Bogomolov A. N., Shiyani S. I. [About Criterion of Safe Operation of Soil Slope of a Navigation Canal]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2008, no. 4, pp. 95—98.
4. Bogomolov A. N., Shiyani S. I., Bogomolova O. A. [Calculation of stability of slopes taking into account their mutual influence as a part of a soil structure]. *Hydroengineering construction*, 2014, no. 7, pp. 37—40.
5. Bogomolov A. N., Shiyani S. I., Bogomolova O. A., Nestratov M. Yu., Solov'ev A. V. [Criterion of Safe Operation and Coefficients of the Stock of Slip-off Slopes]. *Zbirnik naukovikh prats. Galuzeve Mashinobuduvannya, budivnitstvo*. Poltava, PolNTU Publ., 2010. Iss. 3(28). Pp. 49—54.
6. Bogomolov A. N., Nestratov M. Yu., Soloviev A. V., Shiyani S. I. [The new criterion of evaluation of protracted stability of homogeneous slopes based on the analysis of tense deformed condition]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2009, iss. 14(33), pp. 5—12.
7. Coulomb C. *Application des regles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture*. Memoires de savants etrangers de L'Academie des sciences de Paris, 1773.

8. Trofimenkov Yu. G., Vorobkov L. N. *Polevye metody issledovaniya stroitel'nykh svoystv gruntov* [Field identification procedures of construction properties of soils]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1981. 215 p.

9. Lomtadze V. D. *Fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki gornykh porod. Metody laboratornykh issledovaniy* [Physical and mechanical properties of rock formations. Methods of laboratory researches]. Leningrad, Nedra Publ., 1990. 328 p.

10. Sokolovskii V. V. *Statika sypuchei sredy* [Statics of loose medium]. Moscow, Leningrad, 1942. 207 p.

11. Sokolovskii V. V. *Teoriya plastichnosti* [Plasticity Theory]. Moscow, The Academy of Sciences of the USSR, 1946. 520 p.

12. Vyalov S. S., Zaretskii Yu. K. *Prochnost' i polzuchest' merzlykh gruntov i raschety ledogruntovykh ograždenii* [Strength and creep of frozen soils and design of ice and soil enclosures]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1962. 254 p.

13. Vyalov S. S. *Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov* [Rheological Bases of Soil Mechanics]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1978. 447 p.

14. Vyalov S. S. *Reologicheskie svoystva i nesushchaya sposobnost' merzlykh gruntov* [Rheological properties and bearing capacity of frozen soils]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1959. 310 p.

15. Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Nestratov M. Yu., Nestratov N. N., Potapova N. N., Stepanov M. M., Ushakov A. N. *Ustoichivost' (napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie)* [Stability (stress-strain state)]. Patent RF, no. 2009613499, 2009. (In Russ.).

For citation:

Bogomolov A. N., Abramov G. A., Bogomolova O. A., Podtelkov V. V., Yakimenko I. V. [Assessment of stability of circular developments of various diameter finished in homogeneous soil slope at the level of its base]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 12—20.

About authors:

Bogomolov Aleksandr Nikolaevich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Vice-Rector for Scientific Research, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation; Professor of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University. 29, Komsomolskii Prospect, Perm', 614990, Russian Federation, banzaritcyn@mail.ru

Abramov Genrikh Arturovich — Postgraduate student Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, z_genrih@mail.ru

Bogomolova Oksana Aleksandrovna — Candidate of Engineering Science, Docent of Mathematics and Information Technology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, banzaritcyn@mail.ru

Podtelkov Vasilii Vladimirovich — Candidate of Engineering Science, Doctoral student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Yakimenko Igor' Valer'evich — Postgraduate degree seeker of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 624.131

А. Н. Богомолов^{а, б}, О. А. Богомолова^а

^а *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^б *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

**ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛАГАЮЩЕГО ГРУНТА КАК ФУНКЦИИ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОРОДНОГО НЕНАГРУЖЕННОГО ОТКОСА,
НАХОДЯЩЕГОСЯ В ПРЕДЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ**

Сделана попытка установить зависимости физико-механических характеристик грунтов от факторов, определяющих их напряженное состояние. На примере однородного, изотропного и прямолинейного грунтового откоса показано, что прочностные свойства слагающего грунта находятся в определенной взаимной зависимости, если уровень напряжений таков, что приоткосная область оказалась в предельном состоянии. Приведены графические и аналитические зависимости, позволяющие проиллюстрировать установленные закономерности. Рассмотрен пример.

Ключевые слова: физико-механические свойства, трансформация напряжений, предельное напряженное состояние грунтового массива, однородный откос, угол заложения, коэффициент бокового давления.

Считается очевидным, что физико-механические свойства грунта находятся в некоторой функциональной зависимости от напряженного состояния массива: в зависимости от уровня и вида нагружения происходит изменение упругих и прочностных характеристик грунта, которые в предельном состоянии оказываются существенно больше соответствующих значений, определенных опытным путем [1—3].

При расчете грунтовых массивов по первому предельному состоянию, например при расчете устойчивости откосов, используются прочностные характеристики образцов грунтов, полученные в результате лабораторных испытаний. Однако в зависимости от того, каким способом определяется та или иная прочностная характеристика, ее численное значение может оказаться разным [4—5]. Это обстоятельство является одним из множества других, указывающих на то, что переход от прочностных и деформационных характеристик, полученных в лабораторных условиях для образцов грунта, к аналогичным характеристикам, соответствующим ненарушенному грунтовому массиву, в настоящее время недостаточно обоснован. Поэтому необходимо проводить исследования, направленные на установление аналитических зависимостей между прочностными свойствами грунтов и параметрами, определяющими их напряженное состояние.

Рассмотрим однородные и изотропные откосы одинаковой высоты и сложенные одинаковым грунтом. Тогда разница напряженных состояний этих откосов будет определяться одним геометрическим параметром — углом заложения откоса β .

В работе [6] представлена формула для вычисления величины коэффициента запаса устойчивости однородного и изотропного прямолинейного откоса при любой имеющей физический смысл величине коэффициента бокового давления грунта ξ_0 :

$$K = \frac{4}{7}(1 + \xi_o) \left(\frac{2ac}{\gamma h} + b \operatorname{tg} \varphi \right), \quad (1)$$

где h — высота откоса; γ — объемный вес; c — удельное сцепление; φ — угол внутреннего трения; ξ_o — коэффициент бокового давления грунта; действительные положительные коэффициенты a и b определяются в зависимости от угла откоса β и отыскиваются по графикам [7] (рис. 1).

Следует отметить, что формула (1) получена на основе аналитического решения первой основной граничной задачи теории упругости для весомой однородной полуплоскости с криволинейной границей и методики построения наиболее опасной поверхности разрушения, положение и форма которой отыскиваются из условия минимальности численного значения коэффициента запаса устойчивости ($K = K_{\min}$) в каждой ее точке. Величина коэффициента запаса устойчивости в точке грунтового массива определяется отношением удерживающих и сдвигающих сил, действующих вдоль наиболее вероятной площадки сдвига, проходящей через эту точку.

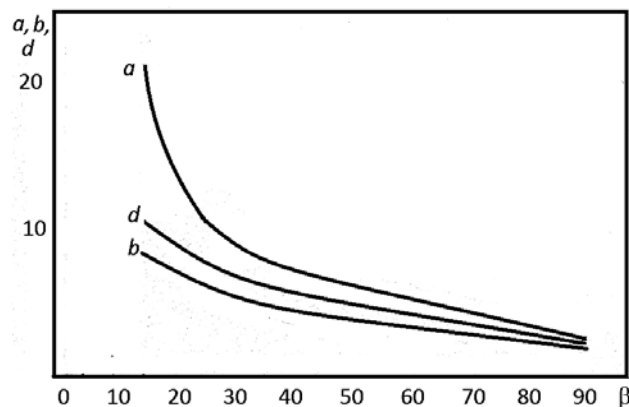


Рис. 1. Графики для определения коэффициентов a и b в формуле (1). Цитируется по работе [7]

Полагая в формуле (1) $K = 1$, что соответствует предельному состоянию приоткосной области, автор работы [6] преобразует ее к виду

$$\frac{c}{\gamma h} = \frac{1}{2a} \left[\frac{7}{4(1 + \xi_o)} - b \operatorname{tg} \varphi \right]. \quad (2)$$

Далее, считая, что $c > 0$, автор [6] утверждает, что

$$\operatorname{tg} \varphi < \frac{7}{4b(1 + \xi_o)}. \quad (3)$$

Далее процитируем автора работы [6]: «Соотношение (2) устанавливает в приоткосных зонах зависимости между предельными значениями физико-механических характеристик различных грунтов. Если считать величины h , γ , ξ_o , a и b известными, то при различных углах откоса β имеем соотношения между c и φ грунтов приоткосных зон, находящихся в предельном состоянии.

Неравенство (3) обеспечивает возможность перехода приоткосной зоны в предельное состояние и показывает, что угол φ в данном случае зависит от β и ξ_0 и не зависит от величины сцепления грунта».

Исходя из этих соображений, автором работы [6] выполнены расчеты и составлена таблица предельных прочностных характеристик грунтов, которую мы дополнили ячейками значений φ при $\beta = 0$, ранее отсутствовавшими, а столбец значений $(c / \gamma h)$ заменили столбцом значений $\sigma_{св}$.

Такая замена объясняется тем, что в работе [6] указано на то, что формула (3) не учитывает изменение угла φ при увеличении угла β , следовательно, «количественная оценка изменения сцепления в данном случае некорректна».

Численные значения угла внутреннего трения φ при угле заложения откоса $\beta = 0$ были взяты из наших работ [8—9], где приведено решение задачи о нахождении величины коэффициента бокового давления для слоя однородного и изотропного грунта бесконечной толщины, находящегося в предельном состоянии.

При решении этой задачи последовательно получены графические зависимости, приведенные на рис. 2, аналитическая аппроксимация второй из них дает выражение, позволяющее вычислять величину угла внутреннего трения грунта φ в зависимости от величины коэффициента бокового давления ξ_0 в момент перехода в предельное состояние:

$$\varphi = -24,709 \ln(\xi_0). \quad (4)$$

Как видно из формул (3) и (4), величина угла внутреннего трения в обоих случаях не зависит от удельного сцепления грунта.

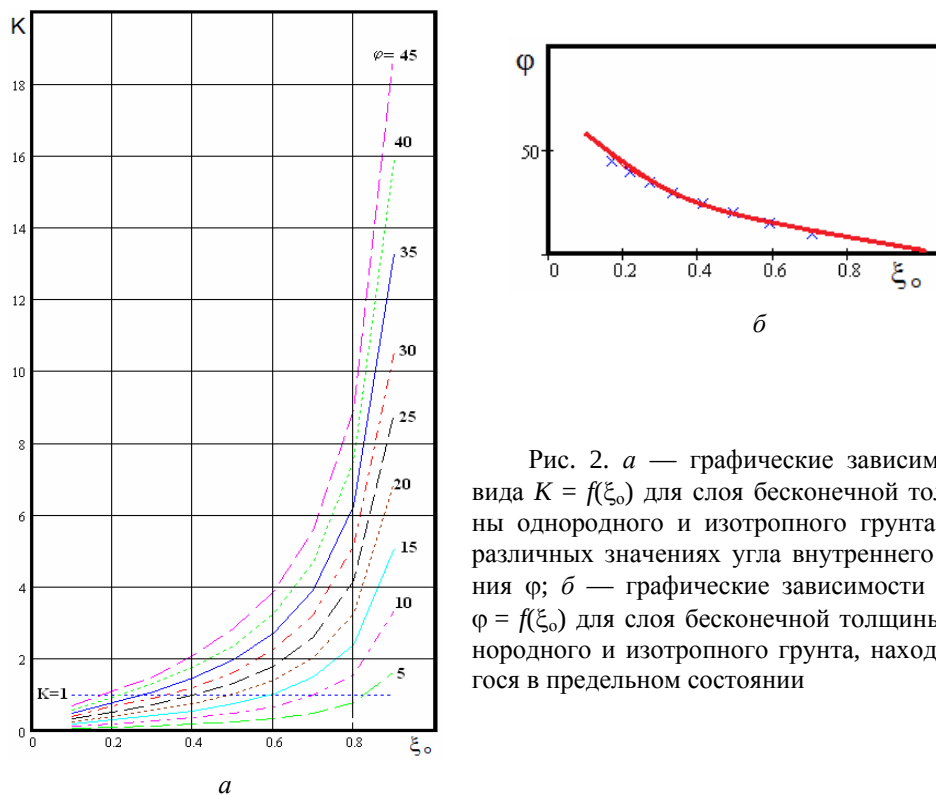


Рис. 2. а — графические зависимости вида $K = f(\xi_0)$ для слоя бесконечной толщины однородного и изотропного грунта при различных значениях угла внутреннего трения φ ; б — графические зависимости вида $\varphi = f(\xi_0)$ для слоя бесконечной толщины однородного и изотропного грунта, находящегося в предельном состоянии

Считаем необходимым отметить еще один результат, приведенный в работе [8].

Теоретически показано, что между углом ориентации [10] наиболее вероятной площадки разрушения, проходящей через рассматриваемую точку грунтового массива, и углом внутреннего трения в предельном состоянии существует зависимость

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что для идеально связного грунта $\alpha = 90^\circ$, а для идеально сыпучего $\alpha = 45^\circ$, т. е. в бесконечно толстом слое, заполненном идеально связной средой, наиболее вероятная поверхность разрушения совпадает с поверхностью слоя; если среда идеально сыпучая, то наклонена к вертикали под углом в 45° .

Для грунтов, обладающим внутренним трением и сцеплением, величина угла α в зависимости от величины коэффициента бокового давления грунта может быть определена по графику (рис. 3) или вычислена по следующей формуле:

$$\alpha = -12,181 \ln(\xi_0) + 45,$$

где коэффициенты имеют размерность, град.

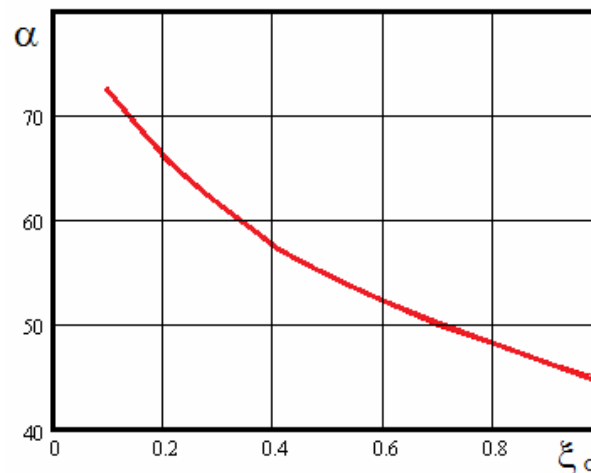


Рис. 3. График зависимости $\alpha = f(\xi_0)$ для однородного, изотропного и бесконечно толстого слоя грунта с горизонтальной границей

Заполнение столбца значений $\sigma_{св}$ стало возможно после того, как (учитывая, что $\sigma_{св} = c(\gamma h \operatorname{tg} \varphi)^{-1}$) выражение (1) было переписано в виде

$$\sigma_{св} = \frac{1}{2a} \left(\frac{7}{4 \operatorname{tg} \varphi (1 + \xi_0)} - b \right). \quad (6)$$

Беря средние значения коэффициента бокового давления для представленных в таблице четырех видов грунтов, определяя по графикам (см. рис. 1) численные значения коэффициентов a и b и выполняя вычисления по формуле (6), получим соответствующие значения величины σ_{cb} в предельном состоянии.

Численные значения величины σ_{cb} при $\beta = 0$ приняты равными нулю ввиду того, что из графиков, представленных в работе [2] (см. рис. 1), следует, что при $\beta \rightarrow 0$ численные значения коэффициента $a \rightarrow \infty$.

Таким образом, если считать численные значения величин h , γ , ξ_0 , a и b известными, то для откосов с различными углами заложения β может быть установлено в явном виде соотношение между прочностными характеристиками c и ϕ грунтов приоткосных зон, которые находятся в предельном состоянии (табл.).

Предельные прочностные характеристики грунтов

Грунты	ξ_0	β	ϕ	σ_{cb}
Глины	0,75	0	7,1	0
		20	15,7	0,00051
		40	24,9	0,00057
		60	34,6	0,00058
Суглинки	0,65	0	10,64	0
		20	16,6	0,0282
		40	26,3	0,0177
		60	36,2	0,0175
Супеси	0,55	0	14,77	0
		20	17,6	0,0444
		40	27,7	0,0371
		60	37,9	0,0373
Пески	0,42	0	21,44	0
		20	22,10	0,069
		40	29,8	0,0664
		60	40,4	0,0673

Для более полного анализа данных, приведенных в табл., на рис. 4 изображены графические зависимости вида $\phi = f(\beta)$ при различных значениях величин коэффициента бокового давления ξ_0 для однородных откосов, находящихся в предельном состоянии. Из рис. 4 видно, что при $\xi_0 = 0,75$ эта зависимость практически линейна, однако при уменьшении величины ξ_0 линия существенным образом искривляется.

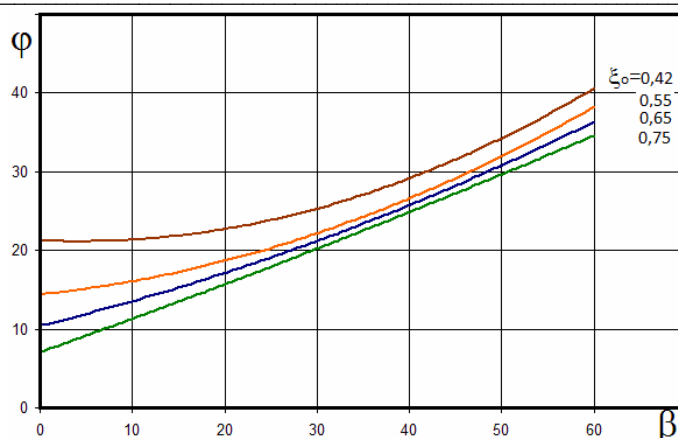


Рис. 4. Графические зависимости вида $\varphi = f(\beta)$ при различных значениях величин коэффициента бокового давления ξ_0 для однородных откосов, находящихся в предельном состоянии

На рис. 5 приведена линия, описывающая зависимость величины приведенного давления связности $\sigma_{св}$ в предельном состоянии от величины коэффициента бокового давления грунта ξ_0 . При построении этой линии учтены два обстоятельства. Первое — величина $\sigma_{св}$ при $\beta = 0$ (для любого из рассмотренных значений ξ_0) вне зависимости от вида грунта и величин соответствующих углов внутреннего трения φ , принята равной нулю, что вытекает из анализа формулы (6) и графика, приведенного на рис. 1 (это было уже отмечено выше). Второе — численные значения величин $\sigma_{св}$ для каждого из видов грунта при условии, что $\beta \neq 0$, незначительно отличаются друг от друга. Поэтому мы сочли возможным при построении кривой, приведенной на рис. 5, воспользоваться средними арифметическими значениями величины $\sigma_{св}$ для каждого из рассмотренных видов грунтов, считая, что величина $\sigma_{св}$ не зависит от β (численное значение $\sigma_{св} = 0$, соответствующее величине $\beta = 0$, при вычислении среднего арифметического не учитывалось).

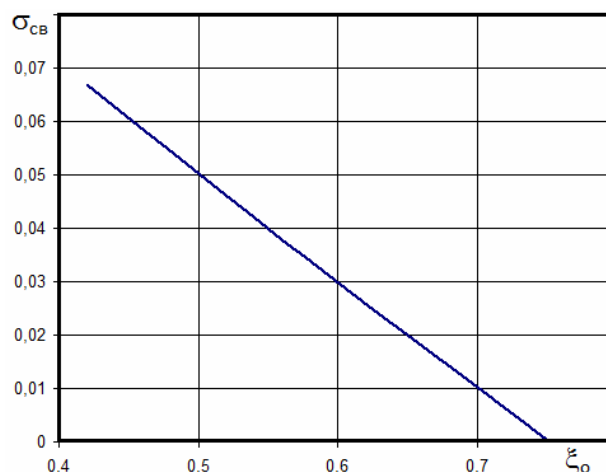


Рис. 5. Графическая зависимость вида $\sigma_{св} = f(\xi_0)$ для однородного изотропного откоса в предельном состоянии

Оказалось, что построенная линия практически является прямой, уравнение которой имеет вид

$$\sigma_{св} = -0,2016\xi_o + 0,1512, \quad (7)$$

где все коэффициенты безразмерные.

Таким образом, и величина коэффициента бокового давления грунта ξ_o , и угол заложения откоса β оказывают влияние на величины угла внутреннего трения φ и приведенного давления связности $\sigma_{св}$ в предельном состоянии. При изменении угла заложения откоса β от 0 до 60° величина φ при $\xi_o = 0,75$ увеличивается в 4,87 раза, при $\xi_o = 0,65$ — в 3,4 раза, при $\xi_o = 0,55$ — в 2,57 раза и при $\xi_o = 0,42$ — в 1,88 раза. Влияние величины коэффициента бокового давления ξ_o на величину приведенного давления связности $\sigma_{св}$ еще более существенно: так, при $\xi_o = 0,75$ и $\beta = 60^\circ$ величина $\sigma_{св} = 0,00058$, а при $\xi_o = 0,42$ и том же значении $\beta = 60^\circ$ величина $\sigma_{св} = 0,0673$, т. е. увеличилась в 116 раз.

Пример. Для иллюстрации полученных результатов рассмотрим пример. Пусть откос с углом заложения $\beta = 40^\circ$ сложен однородным суглинком, с удельным сцеплением $c = 41 \text{ кПа}$, которое назначено согласно [11]. Величина коэффициента бокового давления при расчете принята равной $\xi_o = 0,65$. Используя данные, приведенные в табл., и формулу (7), определим, что при $\beta = 40^\circ$ величина $\varphi = 26,3^\circ$, а $\sigma_{св} = 0,2026$. Подставляя эти значения в формулу для вычисления приведенного значения давления связности $\sigma_{св} = c(\gamma h \tan \varphi)^{-1}$, получим, что в предельном состоянии откос должен иметь высоту равную $H_{пр} = 208 \text{ м}$. Далее, используя компьютерную программу [12] и полученные необходимые для расчета исходные данные, выполним расчет устойчивости однородного откоса с заданными параметрами, графическая интерпретация результатов которого приведена на рис. 6.

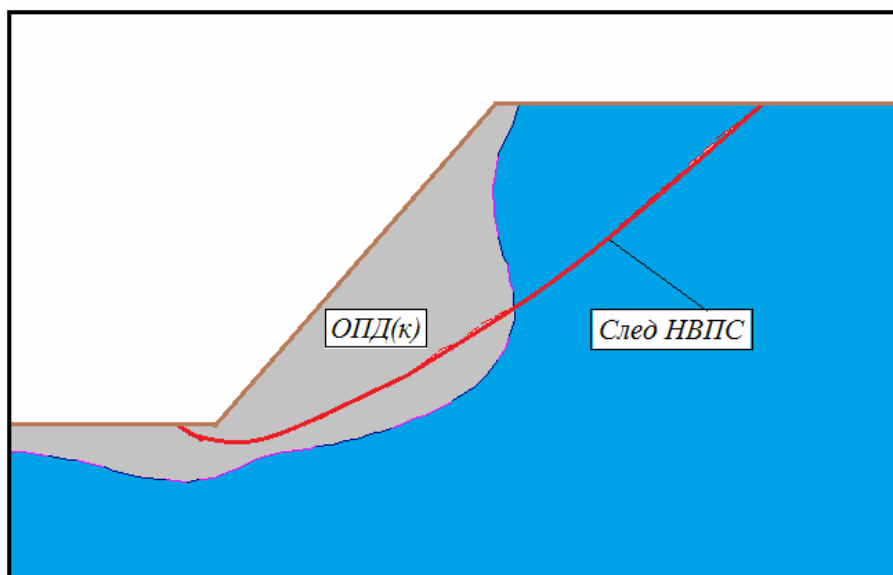


Рис. 6. Область пластических деформаций и след наиболее вероятной поверхности скольжения в приоткосной зоне однородного откоса

Из этого рисунка видно, что практически всю приоткосную зону занимает области пластических деформаций (ОПД(К)), построенная на основе использования условия прочности Кулона [13]. След наиболее вероятной поверхности скольжения практически полностью находится внутри ОПД, а величина коэффициента запаса устойчивости откоса определена равной $K = 0,9923$, что соответствует предельному состоянию.

Выводы:

1. Сделана попытка установить взаимную связь между сдвиговыми характеристиками грунта, величиной коэффициента бокового давления и углом заложения однородного изотропного откоса, находящегося в предельном состоянии. На основании результатов выполненных расчетов построены графические зависимости и записаны аппроксимирующие выражения, устанавливающие взаимную связь перечисленных выше параметров. Полученная при помощи предложенных графических зависимостей и формул высота однородного и изотропного откоса с большой степенью точности соответствует нахождению рассматриваемого объекта в предельном состоянии. Поэтому считаем, что полученные результаты могут быть применены для предварительной оценки физико-механических свойств слагающих грунтов в предельном состоянии.

2. Можно предположить, что существуют некие аналогичные зависимости и между физико-механическими свойствами грунтов, находящихся в допредельном состоянии. Вероятно, что изменение напряженного состояния однородного изотропного грунтового массива, в частности откоса, влечет за собой изменение физико-механических свойств слагающих грунтов. С ростом углов заложения откосов и суммарного вектора внешней нагрузки происходит трансформация полей напряжений, увеличение их интенсивности и неоднородности в приоткосных областях, влекущие за собой значительное повышение предельных значений углов внутреннего трения и приведенного давления связности грунтов. Считаем, что этот вопрос требует проведения дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иванов П. Л.* Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1991. 447 с.
2. *Маслов Н. Н.* Механика грунтов в практике строительства (Оползни и борьба с ними). М.: Стройиздат, 1983. 248 с.
3. *Зарецкий Ю. К.* Лекции по современной механике грунтов. Ростов н/Д: РГУ, 1989. 608 с.
4. *Бугров А. К., Сластенко В. К.* Механика грунтов. Методы полевого определения характеристик грунтов. СПб: Изд-во политехнического университета, 2006. 71 с.
5. *Алексеев В. М., Калугин П. И.* Физико-механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. Воронеж: ВГАСУ, 2009. 89 с.
6. *Цветков В. К.* Связь между напряженным состоянием и прочностными характеристиками грунтовых массивов // Материалы ежегодной науч.-практич. конф. профессорско-преподавательского состава и студентов ВолгГАСУ, 24—27 апреля 2007 г. : в 3 ч. Ч. 2. Естественные науки. Технология строительного производства. Тепло-, газо- и водоснабжение. Волгоград : ВолгГАСУ, 2008. С. 185—187.
7. *Цветков В. К.* Расчет рациональных параметров горных выработок: Справочное пособие. М. : Недра, 1993. 291 с.
8. *Богомолов А. Н., Шиян С. И., Богомолова О. А.* К вопросу о минимальных значениях коэффициента бокового давления грунтов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. : Естественные науки. 2007. Вып. 6 (23). С. 110—114.

9. Богомолов А. Н., Шиян С. И. К вопросу об определении значений коэффициента бокового давления грунтов // Вестник отделения строительных наук. М.; Орел: РААСН, АСИ ОрелГТУ, 2009. Вып. 13. Т. 1. С. 50—56.

10. К вопросу об определении угла ориентации площадки наиболее вероятного сдвига в точке грунтового массива / А. Н. Богомолов, М. М. Степанов, О. А. Богомолова, С. И. Шиян // Городские агломерации на оползневых территориях : материалы V Международной конф. по геотехнике 22—24 сентября 2010 г., Волгоград. Волгоград : [ВолГАСУ], 2010. С. 291—297.

11. СП 22.13330.2011. Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. М., 2011. 64 с.

12. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние) : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ : пат. Рос. Федерации № 2009613499 / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, М. Ю. Нестратов, Н. Н. Нестратов, Н. Н. Потапова, М. М. Степанов, А. Н. Ушаков ; опубл. 18.12.2009, Бюл. № 23 ; заявл. 19.05.2009 ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2009. 1 с.

13. *Coulomb C.* Application des rigles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture. Memoires de savants etrangers de L'Academiie des sciences de Paris, 1773.

© Богомолов А. Н., Богомолова О. А., 2016

Поступила в редакцию
в марте 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Богомолов А. Н., Богомолова О. А. Прочностные характеристики слагающего грунта как функции геометрических параметров однородного ненагруженного откоса, находящегося в предельном состоянии // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 21—30.

Об авторах:

Богомолов Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; проф. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, banzaritcyn@mail.ru

Богомолова Оксана Александровна — канд. техн. наук, доц. кафедры математики и информационных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, banzaritcyn@mail.ru

A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova

STRENGTH CHARACTERISTICS OF BUILD UP SOIL AS FUNCTION OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF HOMOGENEOUS NON-LOADED SLOPE IN LIMIT STATE

The attempt to find the dependence of physical and mechanical characteristics of soils on the factors defining their stress state is made. By the example of homogeneous, isotropic and straight soil slope it is shown that strength characteristics of build up soil are in a certain interdependence provided that stress level is that the area near the slope is in limit state. The graphic and analytical dependences allowing to illustrate the identified regularities are provided in the article. The example is viewed.

Key words: physical and mechanical characteristics, stress transformation, limit stress state of soil massif, homogeneous slope, angle of setting, side pressure coefficient.

REFERENCES

1. Ivanov P. L. *Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenii. Mekhanika gruntov* [Soils and foundations of hydroengineering structures. Soil mechanics]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1991. 447 p.

2. Maslov N. N. *Mekhanika gruntov v praktike stroitel'stva (Opolzni i bor'ba s nimi* [Soil mechanics in practice of construction (Landslides and protection against them)]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1983. 248 p.
3. Zaretskii Yu. K. *Leksii po sovremennoi mekhanike gruntov* [Lectures on modern soil mechanics]. Rostov-on-Don, Rostov State University Publ., 1989. 608 p.
4. Bugrov A. K., Slastenkov V. K. *Mekhanika gruntov. Metody polevogo opredeleniya kharakteristik gruntov* [Soil mechanics. Methods of field identification of soil characteristics]. Saint Petersburg, Publishing House of Polytechnical University, 2006. 71 p.
5. Alekseev V. M., Kalugin P. I. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva gruntov i laboratornye metody ikh opredeleniya* [Physical and mechanical soil characteristics and laboratory methods of their interpretation]. Voronezh, VGASU Publ., 2009. 89 p.
6. Tsvetkov V. K. [Connection between stress state and strength characteristics of soil mass]. *Materialy ezhegodnoi nauch.-praktich. konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava i studentov VolgGASU, 24—27 aprelya 2007 g. : v 3 ch. Ch. 2. Estestvennye nauki. Tekhnologiya stroitel'nogo proizvodstva* [Proc. of annual sc.-pr. Conf. of the academic staff of VSUACE, 24—27 April, 2007. In 3 parts. P. 2. Natural sciences. Technology of construction production. Heat-, gas- and water-supply]. Volgograd, VSUACE Publ., 2008. Pp. 185—187.
7. Tsvetkov V. K. *Raschet ratsional'nykh parametrov gornykh vyrabotok* [Calculation of rational parameters of excavations]. M., Nedra Publ., 1993. 291 p.
8. Bogomolov A. N., Shiyan S. I., Bogomolova O. A. [Towards minimum coefficient values of lateral soil pressure]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser. : Estestvennye nauki* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Natural sciences]. 2007. Iss. 6(23). Pp. 110—114.
9. Bogomolov A. N., Shiyan S. I. [Towards determination of coefficient values of lateral soil pressure]. *Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk* [News of the branch of construction sciences]. Moscow; Orel, RAACS, ASI OrelGTU, 2009. Iss. 13. Vol. 1. Pp. 50—56.
10. Bogomolov A. N., Stepanov M. M., Bogomolova O. A., Shiyan S. I. [Towards determination of the orientation angle of the platform of the most probable shift in soil mass]. *Gorodskie aglomeratsii na opolznevykh territoriyakh : materialy V Mezhdunarodnoi konf. po geotekhnike 22—24 sentyabrya 2010 g., Volgograd* [Urban conglomerations on landslide territories. Proc. of V Int. conf. on geotechnical engineering 22—24 September, 2010, Volgograd]. Volgograd, VSUACE Publ., 2010. Pp. 291—297.
11. SP 22.13330.2011. *Svod pravil. Osnovaniya zdaniy i sooruzhenii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.02.01-83** [RR 22.13330.2011. Rules and regulations. Foundations of buildings and structures. Revised edition of SNIp 2.02.01-83*]. Moscow, 2011. 64 p.
12. Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Nestratov M. Yu., Nestratov N. N., Potapova N. N., Stepanov M. M., Ushakov A. N. *Ustoichivost' (napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie)* [Stability (stress-strain state)]. Patent RF, no. 2009613499, 2009.
13. Coulomb C. *Application des regles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture*. Memoires de savants etrangers de L'Academie des sciences de Paris, 1773.

For citation:

Bogomolov A. N., Bogomolova O. A. [Strength characteristics of build up soil as function of geometrical parameters of homogeneous non-loaded slope in limit state]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 21—30.

About authors:

Bogomolov Aleksandr Nikolaevich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Vice-Rector for Scientific Research, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation; Professor of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University. 29, Komsomolskii Prospect, Perm', 614990, Russian Federation, banzaritcyn@mail.ru

Bogomolova Oksana Aleksandrovna — Candidate of Engineering Science, Docent of Mathematics and Information Technology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, banzaritcyn@mail.ru

УДК 624.131.23

**А. Н. Богомолов^{а, б}, Ю. И. Олянский^а, С. В. Кузнецова^а, И. Ю. Кузьменко^а,
Е. В. Щекочихина^а, С. А. Чарыкова^а**

^а *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^б *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ НА ЛЕССОВЫХ ГРУНТАХ СЕВЕРНОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ

Охарактеризованы методы подготовки лессовых оснований для отложений распространенных в Северном Причерноморье. Приведены рекомендации по устройству оснований на толщах II типа грунтовых условий по просадочности для лессовых пород различных регионально-генетических типов данного региона.

Ключевые слова: просадочные грунты, грунтовые условия по просадочности, борьба с просадочностью, фундаменты на просадочных грунтах.

К Северному Причерноморью относится территория между реками Прут и Днепр, включающая Республику Молдова и южную часть Украины от Одесской до Днепропетровской и Запорожской областей. Лессовые отложения в этом регионе распространены широко и в большинстве случаев служат основаниями зданий и сооружений. Мощность лессовых толщ и абсолютные значения величины относительной просадочности в целом увеличиваются с запада на восток. На территории Молдавии преобладают лессовые толщи I типа грунтовых условий по просадочности с мощностью просадочной толщи до 10,0 м, реже — II типа грунтовых условий по просадочности с мощностью просадочной толщи до 15,0...18,0 м и просадкой от собственного веса до 25,0...50,0 см. В Запорожской и Днепропетровской областях мощность лессового покрова достигает 30,0...50,0 м, очень часто он относится ко II типу грунтовых условий по просадочности с просадкой от собственного веса 1,0 м и более [1].

Возведение зданий и сооружений на просадочных грунтах занимает особое место в теории и практике строительства. Объясняется это, с одной стороны, весьма чувствительной реакцией просадочных грунтов на внешние воздействия (изменение влажности, возникновение дополнительных давлений от строящихся зданий и сооружений и др.), с другой — расширяющимся спектром строящихся объектов (крупные заводские и фабричные сооружения, высотные здания жилого и общественного назначения, крупные строительные комплексы и др.).

Выбор рациональных решений системы «основание — фундамент» при возведении зданий в условиях лессовых просадочных грунтов является одной из наиболее важных и сложных проблем современного строительства. От принятого решения в значительной степени зависят стоимость и материалоемкость объекта, сроки его строительства, а также эксплуатационная надежность. Наиболее рациональные решения оснований и фундаментов достигаются на основе совместного учета закономерностей развития просадок, особенностей грунтовых условий, конструктивных особенностей зданий, условий их эксплуатации, возможных источников замачивания.

Особенности строительства на лессовых грунтах южной Украины.

В настоящее время проблема строительства зданий высотой до 9 этажей на просадочных толщах региона с I типом грунтовых условий практически решена. Устранение в этом случае просадочности грунтов в деформируемой зоне под ленточными фундаментами методами уплотнения (трамбование, послойная укатка) позволяет полностью исключить недопустимые просадки грунтов в основании зданий. Однако под широкими плитными фундаментами 12...16-этажных зданий в условиях просадочных толщ I типа возможны значительные просадки при реальной нагрузке даже при устройстве уплотненного слоя толщиной 3,0...3,5 м. Поэтому крайне важным является правильность оценки особенностей развития просадок грунтов от нагрузки фундаментов в пределах деформируемой зоны.

Значительная часть территории юга Украины, в частности Среднего Приднепровья, сложена лессовыми толщами II типа по просадочности, мощностью до 20...30 м и абсолютными просадками от собственного веса до 80...100 см, а в отдельных районах даже до 120...150 см. Строительство зданий в таких грунтовых условиях вызывает значительные трудности как в техническом, так и в экономическом плане. Особенно серьезные затруднения возникают при строительстве жилых домов повышенной этажности, возведение которых на свайных фундаментах с полной прорезкой просадочной толщи приводит к удорожанию строительства на 10...15 %, а также к увеличению трудозатрат и материалоемкости (цемент, металл).

В 70-х и 80-х гг. прошлого столетия Днепропетровским филиалом НИИ строительного производства выполнялись натурные исследования работы просадочных оснований жилых домов разных конструктивных схем с различными системами «основание — фундамент». Натурные эксперименты дают возможность получить достоверную комплексную информацию о работе сложной системы «основание — фундамент — здание» в условиях аварийного замачивания лессовых просадочных грунтов. Именно такая информация может служить надежной базой для теоретических обобщений, разработки действенных нормативных документов и широкого внедрения эффективных решений в капитальном строительстве.

Методом искусственного замачивания просадочных грунтов были осуществлены комплексные натуральные испытания 9-этажных крупнопанельных домов: серии 1-480 АП в г. Запорожье и серии 1-464 Д-85 в г. Днепропетровске [2]. В результате анализа полученных экспериментальных данных установлена целесообразность массового строительства 9-этажных крупнопанельных, кирпичных, крупноблочных зданий с жесткой конструктивной схемой на фундаментах мелкого заложения по грунтовой подушке с комплексом мероприятий в условиях, где просадка грунта от собственного веса не превышает 1 м при величине условного радиуса кривизны земной поверхности не менее 750 м. На основе полученных результатов были разработаны нормативные документы для строительства. Принципиальной особенностью этого метода строительства являлось сохранение некоторой части просадочности лессового основания в его нижних горизонтах при условии, что эти участки в процессе эксплуатации здания не будут подвергаться замачиванию техногенными водами.

Строгое выполнение требований этих инструкций по конструктивным и водозащитным мероприятиям, толщине и качеству выполнения уплотненного слоя в деформируемой зоне под фундаментами обеспечивало высокую надежность и прочность зданий при значительных величинах просадок, их экономичность и возможность строительства в широком диапазоне грунтовых условий. Однако при нарушении требований водозащиты и некачественной подготовке оснований при замачивании грунтов могут возникнуть крены зданий, превышающие нормативные значения.

Учитывая недостаточный контроль за состоянием водонесущих коммуникаций, с целью предотвращения утечек воды в основание крайне важным и перспективным направлением является совмещенная прокладка инженерных коммуникаций в проходных коллекторах, которая, к сожалению, остается без должного внимания как у директивных органов, так и у проектировщиков и строителей. Следует отметить, что совмещенная прокладка коммуникаций в коллекторах, кроме обеспечения надежной водозащиты, гарантирует своевременность и удобство выполнения ремонтов без дополнительных земляных работ и нарушения дорожных покрытий, повышает культуру эксплуатации сетей и является эффективным мероприятием для любых грунтовых условий. Если же в результате замачивания произойдет недопустимый по условиям эксплуатации лифтов крен дома, то для его устранения в качестве основного метода рекомендовано искусственное организованное замачивание основания, что широко использовалось при выправлении домов в Запорожье и Днепропетровске.

Такой метод подготовки оснований, при котором просадочность частично сохраняется на некоторой глубине из расчета, что при аварийном замачивании и деформации сооружения оно может быть выровнено встречным искусственным замачиванием грунтовой толщи, нашел свое применение в Днепропетровске и Запорожье по следующим двум причинам: а) лессовая толща в этих регионах залегает преимущественно на хорошо проницаемых скальных и других породах, что препятствует возникновению процесса техногенного подтопления, а следовательно — подъему уровня подземных вод и замачиванию нижних горизонтов лессовой толщи; б) лессовые грунты региона относятся к типичным лессам провально-просадочного типа, что позволяет им проседать при встречном замачивании, выравнивая сооружение. При замедленно-просадочных лессовидных грунтах встречное замачивание малоэффективно, что подтверждается работами по выравниванию 9-этажного жилого дома в г. Кишиневе [3].

В результате исследований специалистов вышеупомянутого НИИ из г. Днепропетровска был сделан вывод о том, что строительство домов высотой более 9 этажей, независимо от конструктивной схемы, на просадочных грунтах II типа должно осуществляться либо с полной прорезкой просадочной толщи сваями, либо с полным устранением просадочных свойств грунтов по всей глубине с целью исключения просадок оснований в случае их аварийного замачивания. Это объясняется тем, что деформируемая зона под фундаментами мелкого заложения на таких домах распространяется на большую глубину и при устройстве уплотненного слоя грунта толщиной до 3,0...3,5 м, просадка устраняется лишь на до 15...20 % общей толщи деформируемой зоны. Кроме того, из-за большой высоты такие дома являются намного чувствительнее к неравномерным просадкам основания в части проявления недопустимых кренов.

При строительстве 14...16-этажных домов, особенно когда первые этажи их отводятся под магазины, появляются большие сосредоточенные нагрузки в связи с устройством колонн, поэтому наиболее перспективным направлением по свайным фундаментам являются опоры глубокого заложения с высокой несущей способностью (до 1000 т). Однако решение вопросов, связанных с применением опор глубокого заложения в жилищно-гражданском и промышленном строительстве вообще и на просадочных грунтах в частности, не нашло должного отражения в тематике научных исследований и не вышло за рамки теоретических разработок. При этом следует отметить, что несущая способность свай и опор должна определяться с учетом сил негативного трения, проявляющихся при просадке окружающего лессового грунта. Испытание в этом случае необходимо проводить в опытных котлованах с полным проявлением просадок от собственного веса прилегающего к сваям массива грунта. Методически неправильное определение несущей способности одиночных свай зачастую приводит к ложным выводам об эффективности применения висячих (с неполной прорезкой просадочной толщи) свай.

В г. Днепропетровске имеется ряд случаев деформирования промышленных объектов и жилых домов, возведенных на висячих виброштампованных сваях длиной до 9...12 м. Испытание этих свай проводилось в течение нескольких дней с ограниченным количеством воды без проявления просадок от собственного веса грунта, т. е. без учета сил негативного трения прилегающего грунтового массива. В результате показатели несущей способности свай оказались неправильными, что привело к значительным деформациям наземной части зданий. К этому следует добавить, что при испытании одиночных свай не учитывается также кустовой эффект, который вызывает увеличение просадок. Опыт показывает, что фактическая просадка зданий на висячих сваях при замачивании оснований в десятки раз превышает просадку одиночной сваи, испытанной ограниченным количеством воды без проявления просадок от собственного веса грунтовой толщи.

Наиболее сложным регионом по просадочности для Среднего Приднпровья и в целом для Украины является Никопольский регион, где мощность лессовой толщи составляет до 35...40 м с просадками от собственного веса грунта до 150 см. С целью решения вопроса о возможности строительства 9-этажных жилых домов на фундаментах мелкого заложения в этом регионе и в аналогичных грунтовых условиях, выполнены экспериментальные работы на трехсекционном крупнопанельном доме серии 111-96 с подготовкой оснований методом искусственного двухстадийного замачивания в г. Никополе [2]:

I стадия — замачивание грунта в котловане до строительства здания с последующим устройством уплотненного слоя в деформируемой зоне под фундаментами;

II стадия — замачивание грунта под уплотненным слоем после возведения «коробки» через специальную сеть дренажей.

В целом, в результате проведенных исследований на 9...16-этажных домах, подтверждена эффективность метода 2-х стадийного замачивания оснований, позволяющего возводить здания на фундаментах мелкого заложения с полной ликвидацией просадочных свойств грунта, что обеспечивает надежность и долговечность зданий в сложных геологических условиях.

Особенности строительства на лессовых грунтах Молдавии. Лессовые грунты территории междуречья Прут — Днестр представлены преимущественно субэзральными отложениями, среди которых преобладают лессовидные суглинки среднего состава. Мощность лессовых толщ различная и изменяется с 2,0...3,0 м до 20,0...30,0 м. Мощность просадочной толщи не превышает 12,0...15,0 м, преобладает I тип грунтовых условий по просадочности. Но в крупных городах: Кишиневе, Тирасполе, Бендерах достаточно часто встречаются лессовые толщи II типа по просадочности, с просадкой от собственного веса до 25,0 см и выше. Начальное просадочное давление грунтов, как правило, превышает 0,10 МПа, а в г. Кишиневе в среднем составляет 0,12 МПа [4, 5]. В северной части республики залегают преимущественно лессоподобные грунты небольшой мощности с начальным просадочным давлением около 0,20 МПа.

В Молдавии до 1962 г. строительство на просадочных грунтах велось без их уплотнения. С целью предохранения грунтов от замачивания в проектах предусматривались водозащитные мероприятия: устройство лотков, смотровых колодцев, отмосток, планировка территории. Вводы и выводы сетей укладывались в лотки. Так были построены на просадочных грунтах и ленточных фундаментах многочисленные 5-этажные жилые дома серии I-ЗПС в Кишиневе, Бельцах, Бендерах и других городах республики.

Спустя несколько лет после сдачи в эксплуатацию домов начали замачиваться грунты оснований из неисправных инженерных сетей, водозащитные мероприятия оказались малоэффективными и многие из построенных зданий начали деформироваться. В несущих конструкциях появились трещины, достигавшие в отдельных случаях значительных размеров. Так, например, значительные деформации наблюдались в домах по ул. Карманова и Димитрова, в школе по ул. Доватора в Кишиневе, Доме советов в Тирасполе и многих других объектах.

Начиная с 1962 г., в Молдавии при строительстве на просадочных грунтах стали уплотнять грунты в котлованах тяжелой трамбовкой. Это позволило устроить маловодопроницаемый экран и снизить давление на подстилающий неуплотненный просадочный грунт до значений меньше начального просадочного. Так были построены крупнопанельные дома серии I-464С-6 на Ботанике в г. Кишиневе. Ввиду того что упомянутая серия домов предназначалась для непросадочных грунтов, давление на уплотненный слой было принято из расчета недостижения начального давления просадочного грунта в подошве уплотненного слоя, которое для грунтов г. Кишинева превышало величину 0,10 МПа. Впоследствии из-за неисправных сетей технические подполья затапливались водой, были замочены грунты основания, но никаких деформаций в зданиях не наблюдалось. Объясняется это тем, что нагрузка на просадочный грунт, передаваемая фундаментом, не превышала начального просадочного давления. Вес применяемой трамбовки был 3 т. Мощность уплотняемого слоя, рассеивающего нагрузку от веса сооружения до давления меньше начального просадочного, составляла 1,5 м.

Начиная с 80-х годов XX в. началась массовая застройка спальных микрорайонов г. Кишинева, Тирасполя и Бендер 9- и 12-этажными жилыми домами крупнопанельной серии. На всех этих территориях залегают просадочные грунты преимущественного II типа по просадочности, мощностью просадочной толщи 12,0...15,0 м, с прогнозируемой просадкой до 25,0...30,0 см.

Для строительства в этих условиях были заимствованы разработанные Киевским научно-исследовательским институтом строительных конструкций (НИИСК) для Украины «Указания по проектированию 9-этажных крупнопанельных жилых домов на просадочных грунтах II типа с применением комплекса мероприятий» ЗСР 270-74 и РСН 297-78 применительно к грунтовым условиям Молдавии. При подготовке оснований на просадочных грунтах эти Указания рекомендовали метод, аналогичный разработанному днепропетровскими специалистами для Днепропетровска и Запорожья. Суть его состояла в том, что просадочность лессовой толщи основания устранялось только в ее верхней и средней частях поверхностным трамбованием тяжелыми трамбовками и обратной засыпкой грунта с послойной укаткой. Таким образом под фундаментами мелкого заложения создавался водонепроницаемый непросадочный слой лессового грунта толщиной 5,0...6,0 м, иногда больше. В результате этого ликвидировалось до 70...80 % просадочности лессового основания. В комплексе с другими мероприятиями (водозащитными и конструктивными) это должно было обеспечить устойчивость сооружения на период его эксплуатации.

Однако особенностью инженерно-геологических условий территории Молдавии является то, что лессовая толща повсеместно подстилается водонепроницаемыми сарматскими глинами большой мощности. Вследствие этого уже к началу 80-х годов XX в. вся территория крупных городов претерпела подтопление с подъемом уровня подземных вод на высоту до 10,0...15,0 м [6]. Были замочены нижние неуплотненные горизонты лессовых оснований высотных зданий и сооружений. Некоторые из них претерпели серьезные деформации, как например: два 9-этажных дома серии I-464МСВ в III микрорайоне г. Бендер, 9-этажный дом 135 серии в микрорайоне Будешты г. Кишинева, а также дома на ул. Алешина в г. Кишиневе. Во всех случаях просадочная толща оказалась замоченной. Причиной замачивания были утечки из водонесущих коммуникаций и подъем уровня подземных вод вследствие подтопления. В вышеупомянутых домах в г. Бендеры появились трещины в стеновых панелях и прекратили работу лифты. Максимальная просадка одного из углов дома составила 29,6 см, неравномерная осадка — 6,9 см [7].

Наиболее серьезные деформации наблюдались на 9-этажном крупнопанельном доме по ул. Алешина в г. Кишиневе. Дом состоит из 7 секций, разделенных между собой деформационными швами шириной 3 см. Отдельные секции накренились на 180...200 мм. Некоторые секции на уровне парапетов столкнулись. Были остановлены лифты, что вызвало многочисленные жалобы жильцов. После консультации со специалистами Днепропетровского филиала НИИСПа было принято решение об устранении крена домов и стабилизации осадок методом регулируемого замачивания. Работы выполнялись в течение 1 года. Стабилизация осадок была достигнута, однако выровнять секции не удалось. Примечательно, что некоторые из них за счет регулируемого замачивания просели на 45...55 см, что вдвое превышает максимальные расчетные просадки, определенные с учетом характеристик лессового грунта.

Дальнейшие исследования грунтов основания дома по ул. Алешина и других деформируемых зданий Кишинева специалистами лаборатории физико-механических свойств горных пород АН Молдавии позволили установить, что лессовые грунты г. Кишинева относятся к замедленно-просадочному типу. Для

изучения просадочных свойств таких грунтов не применима методика, рекомендованная ГОСТ 23161—78, так как замачивание образца осуществляется капиллярным способом, что не соответствует реальной работе грунта под сооружением, где наблюдается фильтрация подземных вод. Различия в оценке просадочности с учетом фильтрации воды и без учета могут достигать 100 % [4].

Многочисленные деформации уже построенных жилых домов на подтопленных территориях г. Кишинева подтвердили выводы сотрудников АН Молдавии. В следствие этого стало очевидным, что механический перенос опыта строительства на просадочных грунтах одного региона в другой без учета различий инженерно-геологических условий территорий и физико-механических свойств лессовых грунтов бесперспективен. В результате этого проектировщиками было акцентировано внимание на других более эффективных методах подготовки лессовых оснований, учитывающих специфические геологические условия территории республики. Это устройство вытрамбованных котлованов на толщах I типа грунтовых условий по просадочности, уплотнение просадочной толщи на всю глубину грунтонабивными сваями, устройство свайных фундаментов из буронабивных свай на толщах II типа по просадочности [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Просадочность лессовых пород юга Русской платформы как зональное географическое явление / Ю. И. Олянский, Е. В. Щекочихина, О. Н. Осипова, Г. М. Скибин, А. Ф. Алексеев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2015. № 2. С. 77—81. DOI: [10.17213/0321-2653-2015-2-77-81](https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-2-77-81)
2. Опыт строительства и эксплуатации жилых зданий на просадочных грунтах Среднего Приднестровья / Г. В. Пухальский, А. Ф. Заворотний, А. П. Недодатко, В. А. Куклев // Подготовка оснований зданий и сооружений, строящихся на просадочных грунтах: тез. доклад. Респ. совещания 26—27 мая 1981 г. Кишинев. С. 6—12.
3. Подготовка оснований зданий и сооружений, строящихся на замедленно-просадочных грунтах I и II типа по просадочности / А. Н. Богомолов, Ю. И. Олянский, Л. А. Анисимов, Е. В. Щекочихина, А. Ф. Алексеев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. № 41(60). С. 14—23.
4. Олянский Ю. И. Лессовые грунты юго-западного Причерноморья. Кишинев: Штиница, 1992. 130 с.
5. Инженерно-геологическая характеристика лессовых пород междуречья Прут — Днестр / А. Н. Богомолов, Ю. И. Олянский, С. И. Шиян, Т. М. Тихонова, О. В. Киселева // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2011. Вып. 24(43). С. 33—45.
6. Гончаров В. С., Олянский Ю. И. Влияние пассивных факторов подтопления на подъем уровня грунтовых вод на территории г. Кишинева // Сборник ВИНТИ. 1983. № 6.
7. Гончаров В. С., Олянский Ю. И. Анализ причины деформаций зданий и сооружений, связанных с обводнением просадочных грунтов на территории Молдавии // Ускорение научно-технического прогресса в фундаментостроении. Т. II. М. : Стройиздат, 1987. С. 164—165.

© Богомолов А. Н., Олянский Ю. И., Кузнецова С. В., Кузьменко И. Ю., Щекочихина Е. В.,
Чарыкова С. А., 2016

Поступила в редакцию
в апреле 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Проблемы строительства и эксплуатации зданий на лессовых грунтах Северного Причерноморья / А. Н. Богомолов, Ю. И. Олянский, С. В. Кузнецова, И. Ю. Кузьменко, Е. В. Щекочихина, С. А. Чарыкова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 31—39.

Об авторах:

Богомолов Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; проф. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, banzaritcyn@mail.ru

Олянский Юрий Иванович — д-р геол.-минерал. наук, доц., проф. кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, olyansk@list.ru

Кузнецова Светлана Васильевна — д-р геол.-минерал. наук, проф., Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Кузьменко Ирина Юрьевна — аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, olyansk@list.ru

Щекочихина Евгения Викторовна — канд. геол.-минерал. наук, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, karnat.1@yandex.ru

Чарыкова Светлана Анатольевна — аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, weta.07@list.ru

**A. N. Bogomolov, Yu. I. Olyanskii, S. V. Kuznetsova, I. Yu. Kuz'menko,
E. V. Shchekochikhina, S. A. Charykova**

PROBLEMS OF CONSTRUCTION AND OPERATION OF BUILDINGS ON LOESSIAL SOIL IN NORTHERN BLACK SEA REGION

Methods of preparation of loessial foundations for deposits common in Northern Black Sea Region are described in the article. The authors provide recommendations for arrangement of foundations on the sequences of II type of soil conditions as for subsidence of loessial rocks of different regional and genetic types of the region.

Key words: soil subsidence, subsidence conditions, control over subsidence, foundations on subsiding soils.

REFERENCES

1. Olyanskii Yu. I., Shchekochikhina E. V., Osipova O. N., Skibin G. M., Alekseev A. F. [Subsidence of loess rocks south russian platform as the zonal geographic phenomena]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [University news North-Caucasian region. Technical sciences series]. DOI: [10.17213/0321-2653-2015-2-77-81](https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-2-77-81)
2. Pukhal'skii G. V., Zavorotnii A. F., Nedodatko A. P., Kuklev V. A. [Experience of construction and operation of residential buildings on collapsible soils in the Middle Dnieper region]. *Podgotovka osnovanii zdaniy i sooruzhenii, stroyashchikhsya na prosadochnykh gruntakh: tez. doklad. Resp. soveshchaniya 26—27 maya 1981 g.* [Preparation of foundations of buildings and structures constructed on collapsible soils. Thesis report. Repub. Panels 26—27 May, 1981]. Kishinev. Pp. 6—12.
3. Bogomolov A. N., Olyanskii Yu. I., Anisimov L. A., Shchekochikhina E. V., Alekseev A. F. [Preparation of the foundation of buildings and constructions built on slow-sagging soils of I and II type of subsidence]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 41(60), pp. 14—23.
4. Olyanskii Yu. I. *Lessoverye grunty yugo-zapadnogo Prichernomor'ya (v predelakh respubliki Moldova)* [Loess soils in the south-west Black Sea region (within the Republic of Moldova)]. Kishinev, 1992. 130 p.

5. Bogomolov A. N., Olyanski Yu. I., Shiyan S. I., Tikhonova T. M., Kiseleva O. V. [Engineering-geological loess characteristic of Prut — Dnestr interstream area]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2011, iss. 24(43), pp. 33—45.

6. Goncharov V. S., Olyanskii Yu. I. [Impact of flood hazard on rise of level of ground waters on the territory of Kishinev city]. *Sbornik VINITI* [Coll. Of VINITI], 1983, no. 6.

7. Goncharov V. S., Olyanskii Yu. I. [Analysis of the reasons of deformation of buildings and constructions that are connected with watering of collapsible soils on the territory of Moldova]. *Uskorenienie nauchno-tehnicheskogo progressa v fundamentostroenii. T. II* [Activation of scientific and technical progress in foundation engineering. Vol. II]. Moscow, Stroizdat Publ., 1987. Pp. 164—165.

For citation:

Bogomolov A. N., Olyanskii Yu. I., Kuznetsova S. V., Kuz'menko I. Yu., Shchekochikhina E. V., Charykova S. A. [Problems of construction and operation of buildings on loessial soil in Northern Black sea region]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 31—39.

About authors:

Bogomolov Aleksandr Nikolaevich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Vice-Rector for Scientific Research, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation; Professor of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University

Olyanskii Yurii Ivanovich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Docent, Professor of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, olyansk@list.ru

Kuznetsova Svetlana Vasil'evna — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Kuz'menko Irina Yur'evna — Postgraduate student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, olyansk@list.ru

Shchekochikhina Evgeniya Viktorovna — Candidate of Geological and Mineralogical Science, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, karnat.1@yandex.ru

Charykova Svetlana Anatol'evna — Postgraduate student Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, weta.07@list.ru

УДК 624.138

А. В. Мащенко, А. Б. Пономарев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АРМИРОВАНИЯ ФИБРОВЛОКНОМ НА СВОЙСТВА ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ

Изучен способ использования фиброволокна для армирования глинистых грунтов. Проанализированы результаты ранее проводимых исследований по улучшению прочностных, деформационных характеристик глинистых грунтов, приведены результаты зарубежных авторов по влиянию фиброармирования на степень набухания и усадку грунта. Представлены методика испытаний, результаты и анализ исследований влияния фиброармирования на пучинистые свойства грунта, коэффициент оттаивания и сжимаемость глинистых грунтов при оттаивании. Результаты испытаний приведены в табличном виде, сделаны выводы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: механические характеристики, фибра, набухание, морозное пучение, сжимаемость грунта.

Введение. Механические характеристики грунта определяют несущую способность и деформацию оснований и используются в расчете оснований зданий и сооружений [1]. К ним относятся деформационные характеристики, которые определяют осадку фундаментов, и прочностные, которые определяют несущую способность. Еще одна немаловажная характеристика глинистого грунта — набухание. Набуханием называется способность глинистых грунтов увеличиваться в объеме при замачивании водой или химических растворов [2]. При этом в процессе набухания развивается определенное давление, которое называется давлением набухания. При высыхании таких грунтов образуется усадка. В результате усадки грунт становится плотным, твердым и трещиноватым. Причиной появления трещин в глинистых грунтах является развитие напряжений, превышающих прочность структурных связей между частицами и агрегатами, вследствие неравномерного распределения влажности и температуры. Часто строительные площадки сложены сильносжимаемыми, набухающими, водонасыщенными слабыми глинистыми грунтами, требующими улучшения своих свойств [3].

Одним из эффективных методов улучшения свойств грунта является внедрение в массив различных армирующих элементов, обладающих высокой прочностью на растяжение [1]. В качестве арматуры применяют различные стальные сетки и полосы, природные или синтетические добавки. Особой популярностью в геотехнике пользуется семейство геосинтетических материалов, а одной из прогрессивных технологий преобразования свойств грунтов является армирование их случайно распределенными фиброволокнами (рис. 1) [4, 5].

Полипропиленовая фибра — армирующая добавка, представляющая собой отдельные волокна с длиной отрезка 12 мм, применяется для армирования бетонов [1]. Полипропиленовая фибра обладает хорошей способностью к перемешиванию, благодаря чему она равномерно распределяется по всему объему грунта (табл. 1) [6].



Рис. 1. Полипропиленовая фибра

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики полипропиленового волокна

Наименование показателя	Значения
Длина отрезка, мм	12
Диаметр элементарного волокна, мкм	20
Прочность на растяжение, МПа	1,0
Удлинение до разрыва, %	150...250

В качестве армирования фиброволокно широко применяют за рубежом [2, 7—10]. В России такие материалы используются в ограниченном объеме.

Анализ результатов фиброармирования глинистых грунтов. Экспериментально доказано положительное влияние внедрения фиброволокон в глинистые грунты [1]. Результаты испытаний глинистых грунтов мягкопластичной консистенции в одометре и на одноплоскостной срез показывают, что внедренные в грунт фибровые волокна улучшают прочностные и деформационные характеристики. В табл. 2, 3 представлены результаты испытаний образцов глины мягкопластичной консистенции с армированием и без армирования [1, 3].

Т а б л и ц а 2

Значения прочностных характеристик глинистых грунтов

Виды образцов	Удельное сцепление c , кПа	Угол внутреннего трения φ , °
Неармированные образцы	10,2	11
Образцы с 1%-м армированием волокном	20,1	17,6
Образцы с 2%-м армированием волокном	27,3	23,3

Т а б л и ц а 3

Значения деформационных характеристик глинистых грунтов

Виды образцов	Модуль общей деформации E в интервале 0,2...0,3 МПа
Неармированные образцы	9,78
Образцы с 1%-м армированием волокном	10,44
Образцы с 2%-м армированием волокном	10,2

Табл. 2 и 3 показывают, что угол внутреннего трения ϕ и удельное сцепление c увеличивается более чем в 2 раза, при этом с увеличением процента содержания фиброволокон эти параметры увеличиваются. Модуль общей деформации также увеличивается, хотя и не так значительно (всего 6 %), при этом увеличение процента содержания фиброволокон ведет к снижению модуля деформации.

По данным зарубежных исследований фиброармирование также положительно влияет на такое свойство грунтов как набухание [2]. В табл. 4 представлены значения степени и давления набухания, а также предел прочности грунта при сжатии, образующиеся при усадке грунта без армирования и с фиброармированием.

Т а б л и ц а 4

Параметры набухания глинистого грунта

Образцы грунта	Степень набухания грунта ϵ_{sw} , %	Давление набухания, P_{sw} , кПа	Предел прочности при сжатии, кПа
Неармированные образцы	12,5	280	185
Образцы с 1%-м армированием волокном	4,2	110	250
Образцы с 2%-м армированием волокном	3	60	280

По результатам испытаний набухание грунтов и давление при набухании уменьшается в 4 раза, а предел прочности грунта при сжатии увеличивается на 51 %, и согласно ГОСТ 25100—2011 «Грунты. Классификация» грунты из сильнонабухающих становятся слабонабухающими. С увеличением процента содержания фиброволокон эти параметры улучшаются.

Однако в Пермском крае, как и на большей территории РФ, климат умеренно-континентальный с продолжительным зимним периодом (183 дня) [11]. Глубина сезонного промерзания в Пермском крае достигает 2,5 м, что может вызвать морозное пучение грунтов [12]. Последующее оттаивание таких грунтов вызывает снижение прочности и просадку оттаивающего грунта, а также осадку его под сжимающей нагрузкой. Это определяет сложные условия работы грунтов в основаниях сооружений, насыпях и откосах при оттаивании [13].

Таким образом, не менее важными являются такие деформационные характеристики грунтов как относительная деформация пучения грунтов, коэффициент оттаивания A_{th} и сжимаемость при оттаивании m [13, 14].

Влияние фиброармирования на данные характеристики грунтов изучены не достаточно хорошо, поэтому такие исследования являются актуальными.

Экспериментальные исследования пучинистых свойств глинистых грунтов. Для установления степени влияния фиброволокна на пучинистые свойства грунтов были проведены лабораторные испытания на базе кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов САФУ г. Архангельска [15]. Для исследования были отобраны глинистые грунты мягкопластичной консистенции (табл. 5).

Таблица 5

Физические характеристики глинистых грунтов

Характеристики грунта	Значения
Влажность, ω , д. е.	0,27
Плотность, ρ , г/см ³	1,92
Удельный вес, ρ , г/см ³	18,82
Число пластичности I_L	0,6

Испытания проводились согласно ГОСТ 28622—2012 «Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости». В ходе испытаний были сформированы образцы грунта диаметром 100 мм и высотой 150 мм. Образцы помещались в обойму, состоящую из нескольких колец с поддоном, куда в качестве капиллярно-пористого материала помещался мелкозернистый песок (рис. 2). Также были установлены датчики температур в нижней, средней и верхней частях образца. Приборы с образцами были помещены в холодильную камеру и выдерживались при температуре +1 °С в течение суток. Далее в ходе испытания температура понижалась до значения –4 °С на верхнем торце образца. Также к приборам осуществлялась подача воды, температура которой поддерживалась в течение всего испытания +2 °С [15].



Рис. 2. Прибор для определения степени пучинистости грунтов

Через каждые 12 ч снимались показания приборов для измерения вертикальной деформации и температуры верхней, средней и нижней частей образцов грунта. Сразу после окончания испытания образцы грунта извлекались из обоймы, определялась толщина промерзшего слоя (рис. 3) [15].



Рис. 3. Образец грунта после испытания

Испытания проводились на образцах грунта без армирования и с армированием. Для армирования было использовано фиброволокно в количестве 1 % по массе. При армировании грунт тщательно перемешивался с фиброволокном, для равномерного распределения волокон в образце. Также после испытания были отобраны пробы для определения влажности грунта. Пробы отбирались из верхней, средней и нижней частей образца. Результаты значений влажности представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты значений влажности образцов грунта после испытаний

Образец	Влажность, %	
	Образец неармированного грунта	Образец, армированный фиброволокном
Нижняя часть образца	27	31
Средняя часть образца	27	30
Верхняя часть образца	26,5	28

Из таблицы видно, что влажность в образцах равномерно увеличивается от верхней части образца к нижней. Однако у армированных образцов влажность выше, чем у неармированных.

Так же после испытаний была рассчитана относительная деформация пучения по формуле [15]

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{h_f}{d_i},$$

где h_f — вертикальная деформация образца грунта в конце испытания, мм;
 d_i — фактическая толщина промерзшего слоя образца грунта, мм.

Результаты относительной деформации пучения показаны в табл. 7.

Т а б л и ц а 7

Относительная деформация пучения грунта

Параметры	Образцы грунта неармированные	Образцы грунта, армированные фиброй
Глубина промерзания образца, мм	95	100
Относительная деформация пучения, $\epsilon_{\text{пн}}$, %	3,9	7,5

По результатам табл. 7 видно, что по значению деформации пучения неармированные образцы мягкопластичной глины относятся к среднепучинистым грунтам [15]. А при армировании грунта фиброволокном относительная деформация пучения увеличивается почти в 2 раза, грунты становятся сильнопучинистыми.

Экспериментальные исследования деформационных характеристик глинистых грунтов при оттаивании. Для определения коэффициента оттаивания A_{th} и сжимаемости при оттаивании m были проведены испытания на компрессионных приборах автоматизированного комплекса АСИС-Геотек (рис. 4).



Рис. 4. Устройство компрессионного сжатия мерзлых грунтов

Образцы грунтов имели диаметр 80 мм и высоту 25 мм. Согласно ГОСТ 12248—2010, после стабилизации на первой ступени происходит оттаивание образца. Приращение давления для глин составляет 0,05 МПа. Последняя ступень давления составила 0,2 МПа. При испытаниях были заданы следующие ступени давления: 0,025; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 МПа. Время стабилизации составило 8 ч. На рис. 5 приведены кривые зависимости деформаций грунта от прикладываемой нагрузки [13].

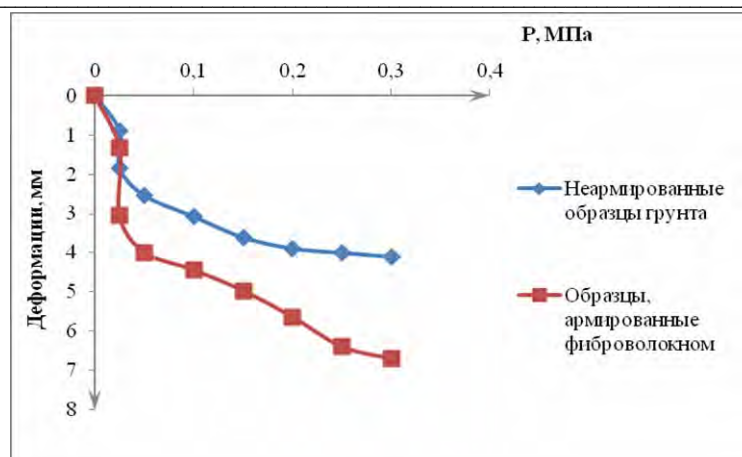


Рис. 5. График зависимости деформаций глинистых неармированных и армированных грунтов от прикладываемой нагрузки

Из рис. 5 видно, что деформации фиброармированных образцов грунта уже после оттаивания превышают деформации неармированных образцов на 82 %, а на последней ступени — на 63 %.

Так же была рассчитана относительная стабилизированная деформация образца ε_{th} по формуле [16].

$$\varepsilon_{th} = \frac{\Delta h_1 - \Delta h_g}{h_i},$$

где Δh_1 — абсолютная с табилизированная деформация образца грунта после оттаивания, мм; Δh_g — абсолютная стабилизированная деформация образца грунта на первой ступени нагружения, мм; h_i — высота образца грунта после обжатия, до его оттаивания, мм.

Коэффициент оттаивания A_{th} определяется по прямой наилучшего приближения к экспериментальным точкам, а сжимаемость при оттаивании m — как тангенс угла наклона прямой к оси p (рис. 6), (табл. 8) [13, 16].

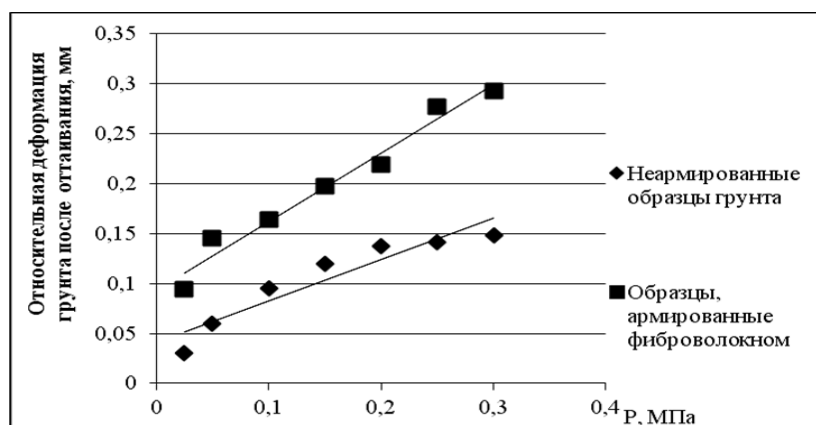


Рис. 6. Зависимость относительной стабилизированной деформации грунта после оттаивания от прикладываемой нагрузки

Т а б л и ц а 8

Результаты деформационных характеристик мерзлых грунтов при оттаивании

Образец	Коэффициент оттаивания, A_{th}	Сжимаемость при оттаивании, m
Неармированный	0,035	0,49
Армированный фиброй	0,09	0,63

Исходя из табл. 2, можно сказать, что фиброармирование глинистого грунта увеличивает сжимаемость грунта при оттаивании на 28 %, коэффициент оттаивания при этом увеличивается более чем в 2 раза.

Выводы:

1. Фиброармирование глинистых грунтов положительно влияет на механические характеристики, а также уменьшает набухание немерзлых грунтов.

2. Наибольшая эффективность внедрения фиброволокна в немерзлые глинистые грунты достигается при улучшении прочностных характеристик и набухании грунтов.

3. Низкая эффективность фиброармирования наблюдается в улучшении деформационных характеристик. Максимально модуль деформации может увеличиться всего на 6 %, при увеличении процента фиброволокна эффект армирования уменьшается.

4. Из приведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что применение фиброволокон в качестве армирования глинистых грунтов в условиях промерзания и оттаивания недопустимо. В пучинистых грунтах фиброармирование увеличивает деформации пучения глинистых грунтов почти в 2 раза. При оттаивании грунты, армированные фиброволокном сжимаются на 28 % процентов сильнее, чем неармированные.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что фиброармирование глинистых грунтов целесообразно применять для возведения подпорных стен, укрепления откосов, для увеличения несущей способности грунта, а также для снижения набухаемости глинистых грунтов при строительстве дорожного полотна из не мерзлых грунтов. В условиях промерзания применение фиброармирования не дает положительного эффекта, а наоборот ухудшает ситуацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гришина А. С., Машенко А. В., Пономарев А. Б. Результаты исследований прочностных характеристик глинистых грунтов, армированных различными геосинтетическими материалами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2015. № 4. С. 9—21. DOI 10.15593/240935125/2015.04.01
2. Abdullah I. Al-Mhaidib. Effects of Fiber on Swell of Expansive Soils // Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference. 2010. С. 663—669.
3. Анализ влияния различных типов армирования на деформационные характеристики глинистого грунта / А. Н. Богомолов, А. Б. Пономарев, А. В. Машенко, А. С. Кузнецова // Интернет-Вестник ВолГАСУ. 2014. № 4 (35). Ст. 11. URL: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
4. Kuznetsova A. S., Ofrikhter V. G. Strength evaluation of fiber reinforced sand by triaxial testing // EuroGeo 5. 5th European Geosynthetics Congress: Proc. of the Fifth Geosynthetics Congress, 16—19 Sept. 2012, Valencia, Spain: in 4 vol. Valencia, Spain. 2012. Vol. 4. Pp. 353—356.
5. Кузнецова А. С., Пономарев А. Б. Планирование эксперимента по исследованию напряженно-деформированного состояния нагруженного массива фиброармированного грунта, находящегося за подпорной стеной // Вестник Пермского национального исследовательского

политехнического университета. Строительство и архитектура. 2015. № 1. С. 135—148. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.1.10

6. *Татьянников Д. А., Пономарев А. Б., Клевеко В. И.* Исследования механических характеристик геосинтетических материалов для разработки методики расчета несущей способности армированных фундаментных подушек // Академический вестник Уралниипроект РААСН. 2015. № 1. С. 84—89.

7. *Nataraj M. S., McManis K. L.* Strength and deformation properties of soil reinforced with fibrillated fibers // *Geosynthetics International Journal*. 1997. Vol. 4. № 1. С. 65—79.

8. *Ahmad F., Bateni F., Azmi M.* Performance evaluation of silty sand reinforced with fibers // *Geotextiles and Geomembranes*. 2010. Vol. 28. Iss. 1. С. 93—99.

9. *Hejazi S. M., Sheikhzadeh M. A.* A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers // *Construction and Building Materials*. 2012. № 30. С. 101—116.

10. *Kaniraj S. R., Gayathri V.* Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions // *Geotextiles and Geomembranes*. 2003. Vol. 21. Iss. 3. P. 123—149.

11. *Мащенко А. В., Пономарев А. Б.* Влияние различных типов армирования на деформационные характеристики глинистого грунта в условиях сезонного промерзания и оттаивания // Второй Международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах / под ред. А. Л. Исакова и Ц. К. Лю. Новосибирск, 2015. С. 143—147.

12. *Захаров А. В., Пономарев А. Б.* Мониторинг температурных полей грунтов г. Перми // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2015. № 4. С. 103—112. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.4.08

13. *Мащенко А. В.* К вопросу определения деформационных характеристик грунтов в условиях сезонного промерзания и оттаивания // Строительство и архитектура. 2016. Т. 3. № 2. С. 87—89. DOI: 10.12737/14964

14. *Роман Л. Т., Царанов М. Н., Котов П. И.* Экспресс-методы прогноза осадок оттаивающих грунтов // Ломоносовские чтения. М.: МГУ, 2014. С. 1—2.

15. *Мащенко А. В.* Влияние армирования геосинтетическими материалами на пучинистые свойства грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6(53). С. 100—103.

16. *Клинова Г. И., Аксенов В. И., Джахангирова Н. И.* Определение деформационных свойств мерзлых грунтов при оттаивании // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2010. № 3. С. 21—25.

© *Мащенко А. В., Пономарев А. Б., 2016*

*Поступила в редакцию
в апреле 2016 г.*

Ссылка для цитирования:

Мащенко А. В., Пономарев А. Б. Анализ влияния армирования фиброволокном на свойства глинистых грунтов в условиях сезонного промерзания и оттаивания // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 40—50.

Об авторах:

Мащенко Александра Витальевна — ассистент кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29

Пonomarev Андрей Будимирович — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29

A. V. Mashchenko, A. B. Ponomarev

ANALYSIS OF THE IMPACT OF FIBER REINFORCING ON CLAY SOILS IN THE CONDITIONS OF SEASONAL FROST PENETRATION AND THAWING

The article is devoted to the use of fiber as the reinforcement of clay soils. The authors analyze the results of previous studies conducted to improve the strength and deformation characteristics of clay soils, as well as the results received by foreign authors concerning the influence of fiber reinforc-

ing on the degree of swelling and shrinkage of the soil. The article presents the test method, the results and analysis of the research of the impact of fiber reinforcing on heaving properties of the soil, the thawing rate and compressibility of clay soils at thawing. The test results are presented in tables and in graphs, the conclusions are drawn.

Key words: mechanical properties, fiber, swelling, frost heave, soil compressibility.

REFERENCES

1. Grishina A. S., Mashchenko A. V., Ponomarev A. B. [Results of strength research of clay soil reinforced by different geosynthetics]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urban development], 2015, no. 4, pp. 9—21. DOI 10.15593/240935125/2015.04.01
2. Abdullah I. Al-Mhaidib. Effects of Fiber on Swell of Expansive Soils. *Proc. of the Twentieth Int. Offshore and Polar Engineering Conf.*, 2010, pp. 663—669.
3. Bogomolov A. N., Ponomarev A. B., Mashchenko A. V., Kuznetsova A. S. [Analysis of the influence of different types of reinforcement on the deformation characteristics of clay soils]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2014, no. 4(35), paper 11. Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
4. Kuznetsova A. S., Ofrikhter V. G. Strength evaluation of fiber reinforced sand by triaxial testing. *EuroGeo 5. 5th European Geosynthetics Congress*. Proc. of the Fifth Geosynthetics Congress, 16—19 Sept. 2012, Valencia, Spain. In 4 vol. Valencia, Spain. 2012. Vol. 4. Pp. 353—356.
5. Kuznetsova A. S., Ponomarev A. B. [Experimental design to investigate the stress-strain behavior of loaded fiber reinforced soil mass adjacent to retaining wall]. *Vestnik permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture], 2015, no. 1, pp. 135—148. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.1.10
6. Tat'yannikov D. A., Ponomarev A. B., Kleveko V. I. [Studies of mechanical characteristics of geosynthetic materials for the development of the method of calculation of bearing capacity of reinforced pad foundations]. *Akademicheskii vestnik Uralniiproekt RAASN* [Academic news of Uralniiproekt of RAACS], 2015, no. 1, pp. 84—89.
7. Nataraj M. S., McManis K. L. Strength and deformation properties of soil reinforced with fibrillated fibers. *Geosynthetics International Journal*, 1997, 4(1), pp. 65—79.
8. Ahmad F., Bateni F., Azmi M. Performance evaluation of silty sand reinforced with fibers. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 28(1), pp. 93—99.
9. Hejazi S. M., Sheikhzadeh M. A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 2012, no. 30, pp. 101—116.
10. Kaniraj S. R., Gayathri V. Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions. *Geotextiles and Geomembranes*, 2003, 21(3), pp. 123—149.
11. Mashchenko A. V., Ponomarev A. B. [Influence of various types of reinforcing on strain characteristics of clay soil under seasonal frost penetration and thawing]. *Vtoroi Mezhdunarodnyi simpozium zemlyanogo polotna v kholodnykh regionakh* [Second International symposium on earth roadbed in cold regions]. Novosibirsk, 2015. Pp. 143—147.
12. Zakharov A. V., Ponomarev A. B. [Monitoring soil temperature fields in Perm]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture], 2015, no 4, pp. 103—112. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.4.08
13. Mashchenko A. [To the definition of deformation characteristics of soils in terms of seasonal freezing and thawing]. *Stroitel'stvo i arhitektura* [Construction and Architecture], 2015, 3(2), pp. 87—89. DOI: 10.12737/14964
14. Roman L. T., Tsarapov M. N., Kotov P. I. [Rapid methods of forecast of sagging of thawing soils]. *Lomonosovskie chteniya* [Lomonosov's readings]. Moscow, MSU Publ., 2014. Pp. 1—2.
15. Mashchenko A. V. [The influence of reinforcement with geosynthetic materials on the heaving properties of soils]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2015, no. 6(53), pp. 100—103.
16. Klinova G. I., Aksenov V. I., Dzhakhangirova N. I. Thaw-induced deformation properties of frozen soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, September 2010, 47(3), pp. 102—107.

For citation:

Mashchenko A. V., Ponomarev A. B. [Analysis of the impact of fiber reinforcing on clay soils in the conditions of seasonal frost penetration and thawing]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 40—50.

About authors:

Mashchenko Aleksandra Vital'evna — Assistant of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University. 29, Komsomolskii Prospect, Perm', 614990, Russian Federation

Ponomarev Andrei Budimirovich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University. 29, Komsomolskii Prospect, Perm', 614990, Russian Federation

УДК 628.3.034.2

**Е. В. Москвичева, Э. П. Доскина, М. А. Самойленко, Ю. Б. Корнилова,
Д. А. Шишкин, З. К. Ибрагимова**

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ВЫЯВЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, СНИЖАЮЩИХ КАЧЕСТВО ОЧИСТКИ ГАЛЬВАНОСТОКОВ РЕАГЕНТНЫМ СПОСОБОМ

Доказана целесообразность обезвреживания ионов хрома (VI) балластными компонентами смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), исследованы и определены оптимальные условия реакции восстановления хрома (VI) до ионов хрома (III). Выяснено, что на сегодняшний день качество очистки сточных вод машиностроительных предприятий и утилизации образующихся осадков не отвечают современным техническим, экономическим и экологическим требованиям. Проанализирована проблема обезвреживания производственных сточных вод гальванических цехов. Изучен качественный состав промышленных сточных вод, структурный состав молекул соединений-загрязнителей, содержащих ионы тяжелых металлов. Исследованы физико-химические характеристики реальных и модельных растворов при изменении pH, температуры, концентрации реагентов, воздействии окислителя (6%-го раствора H_2O_2). Обосновано и экспериментально подтверждено отрицательное влияние процессов комплексообразования на глубину очистки гальваностокосов методами, техническая суть которых обусловлена структурой, размерами, величиной заряда частиц-загрязнителей (электрохимические, мембранные, коагуляция).

К л ю ч е в ы е с л о в а: экологическая безопасность промышленных объектов, замкнутые системы водоснабжения, очистка сточных вод машиностроительных предприятий, обезвреживание осадков гальваношламов, перемешивающие устройства, промышленные сточные воды, реальный раствор, модельный раствор, эффективность очистки, реагентный метод.

Проблема обезвреживания производственных сточных вод гальванических цехов является одной из наиболее актуальных, в значительной мере определяющей экологическую обстановку в водных бассейнах.

К сожалению, в европейской части России трудно найти водоем, который не был бы загрязнен ионами тяжелых металлов, являющимися токсинами, наносящими большой ущерб экологическим системам, в частности, рыбному хозяйству [1—3].

Учитывая, что основной объем питьевой воды в нашей стране забирается из поверхностных источников, ее загрязненность ионами тяжелых металлов наносит ущерб здоровью людей [3].

Требуемая эффективность очистки сточных вод определяется условиями их выпуска. В России для ионов тяжелых металлов (Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+}) при подаче промышленных сточных вод на городские сооружения биологической очистки предельно допустимые концентрации не должны превышать соответственно 0,1; 2,7; 0,5; 1; 10; 0,5 мг/л. При выпуске сточных вод в водоем концентрации указанных загрязнений не должны превышать нормативных значений для водоемов культурно-бытового водопользования: 0,001; 0,5; 1; 0,1; 1; 0,3 мг/л или рыбохозяйственного назначения: 0,005; 0,001; 0,001; 0,01; 0,01; 0,005 мг/л [4].

На сегодняшний день качество очистки сточных вод машиностроительных предприятий, утилизации образующихся осадков не отвечают современным

техническим, экономическим и экологическим требованиям (100 р. валовой продукции сопряжены с образованием отходов на 2700 р. (экологический ущерб) и водопотерями до 80 %) [5, 6].

Водоснабжение, как и всякая ресурсопотребляющая структура в машиностроении, не может рассматриваться обособленно от других, поэтому требуется разработка новых или корректирование существующих технологических решений, позволяющих ликвидировать существующие проблемы на машиностроительных предприятиях.

Известно [5—8], что сточные воды гальванического производства загрязняются прежде всего технологическими растворами — электролитами, химический состав которых (результат многолетних поисков научных школ по электрохимии) при электроосаждении должен обеспечивать образование качественных металлических покрытий, что достигается, как правило, на основе комплексных соединений в присутствии различных органических веществ-добавок.

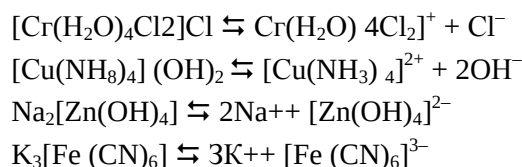
За основу взято изучение качественного состава сточных вод, структурного состава молекул соединений-загрязнителей, содержащих ионы тяжелых металлов. Исследовались модельные и реальные растворы на протяжении 12 месяцев.

В представленной статье представлены результаты исследований, посвященные выявлению причин низкой эффективности очистки гальваносточков реагентным методом.

В основном изучались комплексные соединения, образующиеся в сточных водах гальванопроизводств.

Для растворов комплексных соединений характерны четыре вида равновесий: а) диссоциация на комплексный и внешнесферный ионы; б) диссоциация комплексного иона (или замещение лигандов молекулами растворителя); в) диссоциация лигандов; г) окислительно-восстановительное равновесие (в случае, когда атом-комплексобразователь проявляет переменную степень окисления).

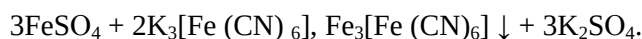
Равновесия диссоциации комплексных соединений на комплексный и внешнесферный ионы называют ионными равновесиями. Ионные равновесия подчиняются закономерностям поведения в растворах сильных электролитов:



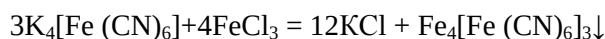
Диссоциации по такой схеме не подвергаются только комплексные соединения — неэлектролиты: $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_3(\text{NO}_2)_3]$, $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2]$, $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2]$ и т. д.

Химическими методами анализа в растворе легко обнаруживают комплексные и внешнесферные ионы. Составные же части комплексного иона обычными химическими методами анализа или не обнаруживаются совсем, или обнаруживаются с помощью наиболее чувствительных реактивов. Добавление в раствор красной кровяной соли $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ роданида калия или аммония не вызывает появления кроваво-красного окрашивания, присущего

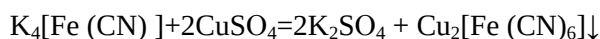
роданиду железа $\text{Fe}(\text{SCN})_3$, так как в растворе ионы Fe^{3+} находятся в комплексе и реакция практически не идет. Вместе с тем в растворе красной кровяной соли легко обнаруживается комплексный ион $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ по образованию турнбуллевой сини $\text{Fe}^3[\text{Fe}(\text{CN})_6]_2$ в присутствии ионов Fe^{3+} :



Для обнаружения комплексных ионов в растворе желтой кровяной соли $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ достаточно провести одну из следующих реакций:

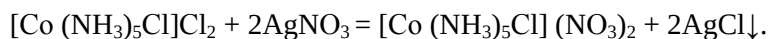


Осадок синего цвета



Осадок бурого цвета

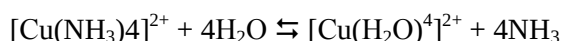
Благодаря ионным равновесиям можно определить природу внешне-сферных ионов и количество их в молекуле комплексного соединения. Например, при взаимодействии в растворе 1 моль лутеосоли кобальта $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ с азотнокислым серебром образуется 2 моль хлорида серебра [3, 7]:



Этим подтверждается нахождение двух ионов хлора (из трех) во внешней сфере.

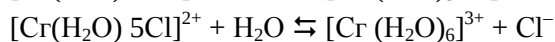
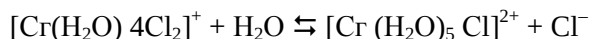
Количество ионов, на которые диссоциирует молекула данного комплексного соединения, можно установить по величине его молекулярной электропроводности.

Сольватационное равновесие — обменная реакция, при которой определенное число молекул или ионов лигандов исходного комплекса обмениваются с молекулами растворителя. Так, ион $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ в водном растворе существует в равновесии с ионом $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$ и аммиаком:



Это равновесие можно также характеризовать как обменную реакцию, при которой определенное число молекул растворителя в сольватированном элементарном ионе обменивается на ионы или молекулы лиганда.

Сольватационное равновесие — частный случай замены одних лигандов другими. Подобные процессы проходят ступенчато, причем в растворе можно обнаружить все промежуточные соединения:



Осуществление подобного равновесия приводит к образованию в растворе иногда неизмеримо малых, а иногда и значительных количеств вымытых из комплекса лигандов и гидратированных элементарных ионов металла-комплексобразователя [8, 9].

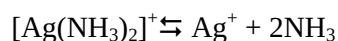
Так называемые элементарные ионы в действительности всегда существуют в водных растворах в гидратированной форме (гидраты ионов). Это во многих случаях легко доказать простейшими опытами, наблюдая изменение окраски солей при замене растворителя. Растворы хлорной и бромной меди

в ацетоне имеют соответственно травянисто-зеленый и бурый цвета. Добавление в эти растворы воды вызывает появление голубой окраски благодаря образованию в растворе гидратированных ионов меди $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$. Безводный хлористый кобальт и раствор его в спирте имеют синюю окраску (цвет иона Co^{2+}), а водный раствор его имеет розовую окраску (цвет иона $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$).

Так как замещение лигандов в комплексном ионе молекулами воды приводит к образованию гидратированного иона-комплексобразователя и лигандов, то сольватационное равновесие фактически можно представить как равновесие электролитической диссоциации комплексного иона [10, 11].

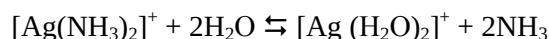
Обнаружить ионы-комплексобразователя в растворе соли обычными качественными реакциями не удастся, но если применить более чувствительные реактивы, то во многих случаях можно доказать присутствие в растворе ионов металла-комплексобразователя и лигандов.

Диссоциация комплексных ионов протекает обычно в незначительной степени, подчиняется закону действия масс и с количественной стороны характеризуется константой диссоциации. Для равновесия



$$K_{\text{дис}} = [\text{Ag}^+][\text{NH}_3]^2 / [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+ = 4 \cdot 10^{-7}$$

уравнение диссоциации иона $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ должно быть написано так:

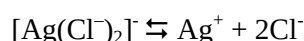


и соответственно выражение для константы равновесия:

$$K = [\text{Ag}^+][\text{H}_2\text{O}]^2 / [\text{Ag}(\text{H}_2\text{O})_2]^+ = 4 \cdot 10^{-7}$$

Однако действующая масса воды в разбавленных растворах комплексов настолько велика, что при вычислении относительных значений констант диссоциации гидратацию ионов можно не учитывать.

Для равновесия



$$K_{\text{дис}} = [\text{Ag}^+][\text{Cl}^-]^2 / [\text{Ag}(\text{Cl})_2]^- = 1 \cdot 10^{-21}$$

В связи с тем, что величина констант диссоциации характеризует устойчивость ионов в растворе, их называют константами нестойкости комплексов ($K_{\text{нест}}$) (табл. 1). Чем менее устойчив комплекс в растворе, тем больше его $K_{\text{нест}}$.

Т а б л и ц а 1

Константы нестойкости комплексных ионов

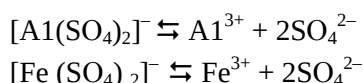
Диссоциация комплексного иона	Константа нестойкости при комнатной температуре
$[\text{Ag}(\text{Cl})_2]^- \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + 2\text{Cl}^-$	$1,0 \cdot 10^{-21}$
$[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+ \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + 2\text{NH}_3$	$4,0 \cdot 10^{-7}$
$[\text{AlF}_6]^{3-} \rightleftharpoons \text{Al}^{3+} + 6\text{F}^-$	$2,0 \cdot 10^{-28}$
$[\text{Cd}(\text{NH}_3)_6]^{2+} \rightleftharpoons \text{Cd}^{2+} + 6\text{NH}_3$	$8,0 \cdot 10^{-6}$
$[\text{Cd}(\text{NH}_3)_6]^{3+} \rightleftharpoons \text{Cd}^{3+} + 6\text{NH}_3$	$8,0 \cdot 10^{-36}$

Окончание табл. 1

Диссоциация комплексного иона	Константа нестойкости при комнатной температуре
$[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+} \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + 4\text{NH}_3$	$4,6 \cdot 10^{-14}$
$[\text{Fe}(\text{Cl})_6]^{3-} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + 6\text{Cl}^-$	$1,0 \cdot 10^{-44}$
$[\text{Fe}(\text{Cl})_6]^{4-} \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + 6\text{Cl}^-$	$1,0 \cdot 10^{-37}$
$[\text{PtCl}_4]^{2-} \rightleftharpoons \text{Pt}^{2+} + 4\text{Cl}^-$	$1,0 \cdot 10^{-16}$
$[\text{StF}_6]^{2-} \rightleftharpoons \text{StF}_4 + 2\text{F}^-$	$6,3 \cdot 10^{-8}$
$[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+} \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 4\text{NH}_3$	$4,0 \cdot 10^{-10}$
$[\text{Zn}(\text{CN})_4]^{2-} \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 4\text{CN}^-$	$6,3 \cdot 10^{18}$
$[\text{NH}_4]^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+$	$6,0 \cdot 10^{-10}$

Диссоциация комплексных ионов всегда протекает по стадиям, аналогично диссоциации многоосновных кислот и их солей. Поэтому приведенные в табл. 1 данные оценивают только суммарную устойчивость внутренней сферы комплексов.

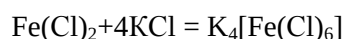
В растворе комплексного соединения с высокой константой нестойкости легко обнаруживаются все составные части молекулы. Например, в растворах квасцов $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ наряду с ионами $[\text{Al}(\text{SO}_4)_2]^-$ и $[\text{Fe}(\text{SO}_4)_2]^-$, имеющимися в небольших концентрациях, легко обнаруживаются ионы Al^{3+} , SO_4^{2-} , Fe^{3+} , K^+ и NH_4^+ . Ионы Ba^{2+} осаждают из этих растворов ионы SO_4^{2-} . Роданид калия или аммония вызывает кроваво-красное окрашивание раствора железных квасцов. При добавлении щелочи к раствору алюмокалиевых квасцов выпадает осадок гидроокиси алюминия, растворяющийся в избытке щелочи, а при добавлении щелочи к раствору железоаммонийных квасцов выпадает бурый осадок гидроокиси железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и выделяется аммиак. При диссоциации комплексных ионов равновесие сильно смещено вправо:



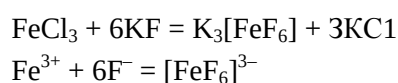
Устойчивость ионов типа $[\text{Al}(\text{SO}_4)_2]^-$ в кристаллах и диссоциация их в растворе дает возможность считать такие вещества, как квасцы, соль Мора и другие двойные соли, комплексными соединениями с высоким значением константы нестойкости. Из данных табл. 1 следует, что для типичных комплексных соединений константа нестойкости имеет малую величину, т. е. комплексный ион — это малодиссоциированная частица, слабый электролит. Для сравнения приведем величины констант диссоциации при комнатной температуре слабых кислот и оснований: $K_{\text{дис}}$ уксусной кислоты равна $1,86 \cdot 10^{-5}$, $K_{\text{дис}}$ угольной кислоты равна $3 \cdot 10^{-7}$, а $K_{\text{дис}}$ гидрата окиси аммония равна $1,75 \cdot 10^{-5}$.

Согласно правилу Бертолле, ионные реакции становятся практически необратимыми, если в результате взаимодействия ионов получается вещество, удаляющееся из сферы химического взаимодействия в виде газа или пара, или

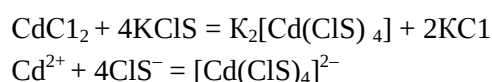
если затруднен распад на исходные ионы хотя бы одного из продуктов реакции (в результате выпадения осадка при образовании малодиссоциирующего вещества). С этой точки зрения становится понятным сдвиг равновесия ионных реакций в сторону образования комплексных соединений. Образование комплексных соединений в растворе есть образование комплексных ионов — малодиссоциированных частиц. Приведем примеры комплексообразования. Реакция между цианидом калия и цианидом железа практически необратима вследствие образования слабого электролита иона $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$:



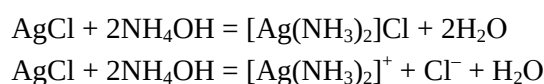
При добавлении фторида калия желтый раствор хлорида железа обесцвечивается вследствие образования комплексного иона $[\text{FeF}_6]^{3-}$:



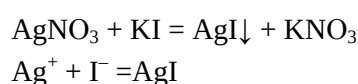
При добавлении концентрированного раствора роданида калия к небольшому количеству раствора хлорида кобальта появляется синяя окраска, так как образуется комплекс $[\text{Co}(\text{SCN})_4]^{2-}$:



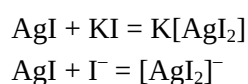
Растворение осадков также объясняется сдвигом равновесия реакции в сторону образования слабых электролитов. При добавлении раствора аммиака к осадку хлорида серебра образуется растворимый комплексный аммиакат серебра:



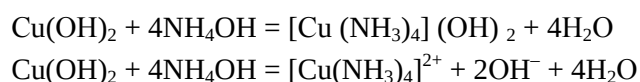
Если к раствору соли серебра добавить небольшое количество иодида калия, выпадает желтый осадок иодида серебра:



В избытке иодида калия иодид серебра растворяется с образованием комплекса:

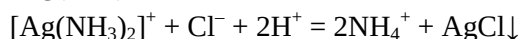


Голубой осадок гидроокиси меди при действии аммиака переходит в растворимое комплексное основание синего цвета:



Сдвигом равновесия реакции в сторону образования более слабого электролита объясняются и случаи разрушения одних комплексов с образованием

других, имеющих более низкую константу нестойкости. Так, если на комплексный аммиакат серебра подействовать кислотой, то происходит реакция с образованием нового более устойчивого комплекса — иона NH_4^+ :



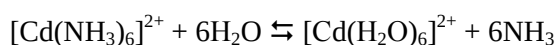
Реакция направлена в сторону образования иона NH_4^+ , так как $K_{\text{нест}}$ иона $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ равна $4 \cdot 10^{-7}$, а $K_{\text{нест}}$ иона $[\text{NH}_4]^+$ равна $6 \cdot 10^{-10}$.

Константы нестойкости объективно характеризуют прочность комплексных ионов в растворе. При оценке устойчивости комплексов часто для удобства пользуются не константами нестойкости, а показателями констант нестойкости, равными отрицательному, десятичному логарифму константы нестойкости, $\text{pK} = -\lg K_{\text{нест}}$.

$K_{\text{нест}}$ иона $[\text{Fe}(\text{Cl})_6]^{3-} = 1,0 \cdot 10^{-44}$, а $\text{pK} = 44$.

Чем устойчивее комплекс в растворе, тем выше значение его pK .

Устойчивость комплекса в растворе по отношению к действию растворителя зависит в первую очередь от характера и прочности связи между центральным атомом и лигандами. Прочность этой связи зависит от природы центрального атома, степени его окисления, размера и структуры его электронных оболочек, а также от природы лигандов. Чем меньше радиус иона-комплексобразователя и чем выше его заряд, тем более прочные комплексы он образует. Так, комплексный ион $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$ обратимо распадается в воде:



В то время как комплексный ион $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ практически не разрушается водой.

Влияние заряда центрального иона на устойчивость комплексов наглядно отражается в величинах показателей констант нестойкости комплексных ионов, образованных центральными ионами с близкими величинами радиусов и сходными электронными структурами, но отличающимися величиной заряда. Одну группу таких комплексообразователей составляют, например, ионы Na^+ , Ca^{2+} , I^{3+} , Th^{4+} ($r = 1,04 \pm 0,06 \text{ \AA}$), другую группу — ионы Ag^+ , Hg^{2+} , Ti^{3+} ($r = 1,09 \pm 0,04 \text{ \AA}$).

В табл. 2 приводятся полученные К. Б. Яцимирским и В. П. Васильевым величины показателей констант нестойкости комплексных ионов, образованных названными комплексообразователями.

Из табл. 2 видно, что с ростом заряда иона-комплексобразователя устойчивость комплексного иона возрастает.

На прочность комплексов в растворе существенное влияние оказывает соотношение между размером центрального иона и лигандов. Небольшие катионы образуют наиболее прочные комплексы с небольшими анионами, а катионы с большим радиусом образуют наиболее прочные комплексы с крупными анионами. В случае небольших однозарядных анионов (радиус аниона $< 1,6 \text{ \AA}$) устойчивость комплекса уменьшается с увеличением размера катиона, т. е. сверху вниз в группах периодической системы. А при крупных анионах (нитрат, иодат, тиосульфат) устойчивость образуемых ими комплексов растет

с увеличением размеров катионов. Если центральный ион при образовании комплексного соединения проявляет максимальное координационное число, то образуется более прочный комплекс, чем в случае проявления более низкого координационного числа.

Устойчивость комплексных соединений в растворах находится также в зависимости от величины координационного числа центрального атома и его электронной структуры. Наиболее прочные комплексные соединения образуют переходные металлы, способные использовать для связи с лигандами, кроме *s*- и *p*-орбиталей внешней оболочки, еще *d*-орбитали нижележащей электронной оболочки. Такого рода гибридизация орбиталей приводит к образованию прочных связей между центральным атомом и лигандами.

Т а б л и ц а 2

Показатели констант нестойкости комплексов

Типы комплексных ионов	Ионы-комплексобразователи			
	Na ⁺	Ca ²⁺	I ³⁺	Th ⁴⁺
RIO ₃ ^{z-1}	—	0,9	—	2,9
RNO ₃ ^{z-1}	—	0,3	—	0,6
RSO ₄ ^{z-2}	0,7	2,3	3,5	4,1
RC ₂ O ₄ ^{z-2}	—	3,0	7,3	—
	Ag ⁺	Hg ²⁺	Pt ³⁺	—
ROH ^{z-1}	2,3	10,3	14,8	—
RNH ₃ ^z	3,2	8,8	—	—
RCl ^{z-1}	2,7	5,3	8,1	—
RBr ^{z-1}	9	9,1	9,7	—

R — центральный ион.

Z — заряд центрального иона.

На устойчивость комплексных соединений в такой же мере, как природа и свойства центральных атомов, влияют природа и свойства лигандов. Наиболее прочные комплексы образуют лиганды с большим зарядом и малым радиусом. Прочные комплексы образуются также в том случае, когда заместитель обладает большой координационной емкостью, т. е. когда при образовании внутренней сферы происходит циклообразование. При этом наиболее устойчивы пяти- и шестичленные циклы [12, 13]. Так, $K_{\text{нест}}$ комплексного аммиаката кадмия $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ равна $3,3 \cdot 10^{-7}$, а этилендиаминового комплекса кадмия — лишь $6,7 \cdot 10^{-13}$. Объясняется это тем, что при координации этилендиамина $\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}_2$ во внутренней сфере образуется пятичленный цикл. Прочность комплексов переходных металлов также зависит от силы кристаллического поля лигандов.

При сравнении устойчивости комплексов надо также иметь в виду взаимное влияние внутрисферных заместителей, различную подвижность их, определяющуюся закономерностью *транс-влияния* [14—16].

В проведенном исследовании за основу взято изучение качественного, количественного состава сточных вод, структурного состава молекул — загрязнителей, содержащих ионы тяжелых металлов, а также физико-химических свойств исследуемых растворов (плотность, вязкость, электропроводность, поверхностное натяжение). Исследовались модельные растворы и реальные стоки — в течение 12 месяцев. Известно, что сточные воды гальванического производства загрязняются прежде всего технологическими растворами-электролитами, химический состав которых (результат многолетних поисков научных школ по электрохимии) должен обеспечивать, при электроосаждении, образование качественных металлических покрытий. Это достигается, как правило, на основе комплексных соединений в присутствии различных органических веществ-добавок. Поэтому в гальваностоках ионы тяжелых металлов, прежде всего по этой причине, находятся в составе комплексных ионов, о чем свидетельствуют полученные данные (см. табл. 1 и табл. 2), где показано несоответствие значений концентраций ионов металлов, взятых для реализации реагентного метода, и истинных, так как ионы-загрязнители входят в состав молекулярных комплексных структур в связанном виде, что и затрудняет их участие в процессе осаждения.

Одновременно в независимой лаборатории были получены доказательства, подтверждающие наличие трех устойчивых фонов: анионного, катионного, органического, которые усиливают процесс образования комплексных соединений в сточных водах ПМ [4, 5].

Усредненный состав (мг/л): среднее значение концентраций (12 измерений — 12 месяцев): рН = 6,66...8,5 (до очистки), рН = 7,07...7,48 (после очистки). $t = 10...18$ °С. Органические вещества с концентрацией > 1 %: ПАВ — сульфанола, мыла, ингибиторы, декстрин, ОП-7, ОП-10, тиомочевина, ПЭПА, фталенид. Суммарная концентрация загрязнений составляет 17,0...19,0 г/л.

Если в растворе отсутствует комплексообразование (раствор № 4), то в результате осаждения достигаются значения концентраций, близкие к соответствующим величинам раствора № 3 (см. табл. 2). В растворах № 1 и № 2 (см. табл. 2) величина изменения показателей находится в пределах 20 %, что согласовывается со значениями показателей константы нестойкости комплексных ионов, в состав которых входят ионы тяжелых металлов-загрязнителей рассматриваемых гальваностоков: $pK [Cu (P_2O_7)]^{2-} = 26,72$; $pK [Cd(P_2O_7)]^{2-} = 18,4$; $pK [Ni(H_2O)_4 \cdot SO_4] = 15,34$; $pK [ZnCl_4]^{2-} = 12,24$; $pK [nCrO_3 \cdot mH_2O] = 17,8$ [18, 19]. Степень диссоциации их не превышает 14...17 % и подтверждает наличие комплексных ионов. Подобный вывод можно подтвердить также значениями произведений растворимости гидроксидов соответствующих ионов: $Cu(OH)_2$, $Cd(OH)_2$, $Ni(OH)_2$, $Cr(OH)_3$, $Zn(OH)_2$.

Полученные данные легли в основу методики по определению результативности очистки рассматриваемых стоков известными методами: ионно-обменный, электролиз, гальванокоагуляция, сорбционный и др. Установлено, что эффективность метода сопряжена с молекулярной массой загрязнителей, величиной поверхностного натяжения, электропроводностью, плотностью очищаемых растворов.

Вывод. Данные о комплексообразовании, подтвердили, что применение реагентного метода при очистке гальваностоков несостоятельно, так как искажены истинные значения концентрации ионов тяжелых металлов; более 80 % их — в составе слабодиссоциирующих комплексных ионов.

Обосновано и экспериментально подтверждено отрицательное влияние процессов комплексообразования на глубину очистки гальваностокков методами, техническая суть которых обусловлена структурой, размерами, величиной заряда частиц-загрязнителей (электрохимические, мембранные, коагуляция).

Полученные данные легли в основу методики по определению результативности очистки рассматриваемых стоков известными методами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Способ повышения надежности функционирования систем водного хозяйства / Ю. И. Олянский, А. А. Болев, А. А. Сахарова, Д. О. Игнаткина, П. Ф. Юрин, А. А. Войтюк // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 2(27). Ст. 39. URL: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
2. К вопросу о системе качества воды / Т. Ф. Рыльцева, В. В. Рыльцев, А. В. Приходченко, А. А. Болеев, Р. В. Потоловский // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 26(45). С. 138—144.
3. Водосбережение в коммунальных системах на примере г. Волгограда / Е. В. Москвичева, А. Ю. Комаров, В. А. Романов, Н. А. Сахарова, А. А. Щелочкова // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2010. Вып. 2(12). Ст. 5. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
4. Москвичева Е. В. Ресурсосберегающие процессы как основа экологически чистых технологий гальванического хромирования из водных и неводных сред: автореф. дис... д-ра техн. наук. Москва, 1998.
5. Аксенов В. И. Водное хозяйство промышленных предприятий // Сб. докладов 7-го Международного конгресса «Вода: экология и технология». Экватор-2006. М., 2006.
6. Москвичева А. В. Разработка малоотходной технологии очистки сточных вод заводов железобетонных изделий от эмульгированных органических загрязнений: автореф... дис. канд. тех. наук. Волгоград, 2010. 133 с.
7. Полинг Л. И. Общая химия. М.: Мир, 1974. 839 с.
8. Гликина Ф. Б. Химия комплексных соединений. М.: Просвещение, 1972. 170 с.
9. Литинский А. О., Лебедев Н. Г. Модель ионно-встроенного орбитально-стехиометрического кластера для расчета взаимодействий поверхности твердых тел с молекулами газовой фазы // Журнал физической химии. 1995. Т. 69. № 1. С. 132—137.
10. Связь констант нестойкости комплексов тяжелых металлов с потенциалами полуволн окисления серосодержащих реагентов / Е. А. Нечаев, В. А. Павличенко, Н. А. Белоусова, Т. Ф. Силина // Электрохимия. 1986. Т. 22. № 3. С. 320—324.
11. Алыков Н. М., Алыкова Т. В., Пащенко К. П. Квантово-химические кластерное моделирование адсорбции ароматических углеводородов // Естественные науки. Журнал фундаментальных и прикладных исследований. 2002. № 4. С. 2006—2014.
12. Буриштейн К. Я., Исаев А. Н. Применение метода МПДП/ВС для расчета систем с переносом протона в водородных связях // Журнал структурной химии. 1986. Т. 27. № 3. С. 3—7.
13. Буриштейн К. Я., Исаев А. Н. Модификация метода МПДП для расчета систем с водородными связями // Журнал структурной химии. 1984. Т. 25. № 1. С. 25—30.
14. Канализация населенных мест и промышленных предприятий / под общ. ред. В. Н. Самохина. 2-е изд., перераб и доп. М.: Стройиздат, 1981. 639 с.
15. Максимов В. Ф., Вольф И. В., Винокурова Е. А. Очистка и рекуперация промышленных выбросов: учебник для вузов. М.: Лесная промышленность, 1989. 416 с.
16. Разработка комплекса безреагентной очистки воды / В. А. Хан, М. И. Лернер, Ф. Д. Мышкин, А. А. Цхе // Научный журнал КубГАУ. 2013. № 86(02). <http://ej.kubagro.ru/2013/02/pdf/55.pdf>. IDA 0861302055

© Москвичева Е. В., Доскина Э. П., Самойленко М. А., Корнилова Ю. Б., Шишкин Д. А., Ибрагимова З. К., 2016

Поступила в редакцию
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Выявление факторов, снижающих качество очистки гальваностокков реагентным способом / Е. В. Москвичева, Э. П. Доскина, М. А. Самойленко, Ю. Б. Корнилова, Д. А. Шишкин, З. К. Ибрагимова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 51—62.

Об авторах:

Москвичева Елена Викторовна — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Доскина Эльвира Павловна — канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Самойленко Максим Андреевич — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Корнилова Юлия Борисовна — инженер кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Шишкин Денис Андреевич — магистр кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Ибрагимова Зульфира Кайтарбековна — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

E. V. Moskvicheva, E. P. Doskina, M. A. Samoilenko, Yu. B. Kornilova, D. A. Shishkin, Z. K. Ibragimova

INDICATION OF FACTORS LOWERING THE QUALITY OF GALVANIC REAGENT CLEANING METHOD

The expediency of neutralization of chromium ions (VI) with «ballast» coolant components is proved, optimal conditions for the reduction reaction of chromium (VI) to chromium ions (III) is studied and determined. It is revealed that at present the quality of wastewater treatment of engineering companies and sludge utilization do not meet modern technical, economic and ecological requirements. The authors analyze the problem of neutralization of industrial sewage waters of galvanic shops. The qualitative composition of industrial wastewater, structural molecular structure of compounds of pollutants, containing ions of heavy metals is studied. Physical and chemical characteristics of real and model solutions at change of pH, temperature, concentrations of reagents, the impact of oxidizer (6 % solution of H₂O₂) are studied. Substantiated and experimentally confirmed the negative impact of processes of complex formation at a depth of clear electroplating wastes methods, technical essence of which is due to the structure, dimensions, size of the charge of particles-pollutants (electrochemical membrane, coagulation).

Key words: ecological safety of industrial plants, closed water systems, wastewater treatment of engineering companies, neutralization of galvanic precipitation, mixing devices, industrial waste water, real solution, model solution, cleaning efficiency, reagent method.

REFERENCES

1. Olyanskii Yu. I., Boleev A. A., Sakharova A. A., Ignatkina D. O., Yurin P. F., Voityuk A. A. [The way to increase reliability of water carriage system functioning]. *Internet-Vestnik VolGASU*, 2013, no. 2(27), paper 39. Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
2. Ryltseva T. F., Ryltsev V. V., Prikhodchenko A. V., Boleev A. A., Potolovski R. V. [On water quality system]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2012, iss. 26(45), pp. 138—144.
3. Moskvicheva E. V., Komarov A. Yu., Romanov V. A., Sakharova N. A., Shchelochkova A. A. [Water saving in utilities on the example of Volgograd]. *Internet-Vestnik VolGASU*, 2010, no. 2(12), paper 5. Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
4. Moskvicheva E. V. *Resursosberegayushchie protsessy kak osnova ekologicheskii chistykh tekhnologii gal'vanicheskogo khromirovaniya iz vodnykh i nevodnykh sred* [Resource-saving processes as basis of environmentally friendly technologies of galvanic chrome plating from water and non-aqueous environments. Dr. Eng. Sci. Diss.]. Moscow, 1998.

5. Aksenov V. I. [Water services of industrial enterprises]. *Sb. dokladov 7-go Mezhdunarodnogo kongressa «Voda: ekologiya i tekhnologiya»*. Ekvatek-2006 [Set of reports of the 7th Int. Congress "Water: ecology and technology". Ekvatek-2006]. Moscow, 2006.
6. Moskvicheva A. V. *Razrabotka malootkhodnoi tekhnologii ochistki stochnykh vod zavodov zhelezobetonnykh izdelii ot emul'girovannykh organicheskikh zagryaznenii* [Development of low-waste technology of sewage treatment of plants of reinforced concrete products from emulsified organic pollution. Cand. Eng. Sci. Diss.]. Volgograd, 2010. 133 p.
7. Poling L. I. *Obshchaya khimiya* [General Chemistry]. Moscow, Mir Publ., 1974. 839 p.
8. Glikina F. B. *Khimiya kompleksnykh soedinenii* [Chemistry of complex compounds]. Moscow, Prosveshchenie Publ., 1972. 170 p.
9. Litinskii A. O., Lebedev N. G. [Model of ion-built-in orbital stoichiometric cluster for calculation of interactions of surface of solid bodies with molecules of gas phase]. *Zhurnal fizicheskoi khimii* [Russian Journal of Physical Chemistry], 1995, 69(1), pp. 132—137.
10. Nechaev E. A., Pavlichenko V. A., Belousova N. A., Silina T. F. [Connection between instability constants of heavy metal complexes with half-wave potentials of oxidation of sulfur-containing reagents]. *Elektrokhimiya* [Russian Journal of Electrochemistry], 1986, 22(3), pp. 320—324.
11. Alykov N. M., Alykova T. V., Pashchenko K. P. [Quantum-chemical cluster modeling of adsorption of aromatic hydrocarbons]. *Estestvennye nauki. Zhurnal fundamental'nykh i prikladnykh issledovani* [Natural Sciences. Journal of fundamental and applied researches], 2002, no. 4, pp. 2006—2014.
12. Burshtein K. Ya., Isaev A. N. [Application of the MPDP/VS method for the design of systems with proton transport in hydrogen bonds]. *Zhurnal strukturnoi khimii* [Journal of Structural Chemistry], 1986, 27(3), pp. 3—7.
13. Burshtein K. Ya., Isaev A. N. [Modification of the MPDP method for the design of systems with hydrogen bonds]. *Zhurnal strukturnoi khimii* [Journal of Structural Chemistry], 1984, 25(1), pp. 25—30.
14. Samokhin V. N. (ed.) *Kanalizatsiya naseleennykh mest i promyshlennykh predpriatii*. [Sewage of populated areas and industrial enterprises]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1981. 639 p.
15. Maksimov V. F., Vol'f I. V., Vinokurova E. A. *Ochistka i rekuperatsiya promyshlennykh vybrosov* [Treatment and recovery of industrial emissions]. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1989. 416 p.
16. Khan V. A., Lerner M. I., Myshkin V. F., Tshe A. A. [Development of the nonchemical water purification system]. *Nauchnyi zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU], 2013, no. 86(2), pp. 772—784. <http://ej.kubagro.ru/2013/02/pdf/55.pdf>. IDA 0861302055

For citation:

Moskvicheva E. V., Doskina E. P., Samoilenko M. A., Kornilova Yu. B., Shishkin D. A., Ibragimova Z. K. [Indication of factors lowering the quality of galvanic reagent cleaning method]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 51—62.

About authors:

Moskvicheva Elena Viktorovna — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Doskina Elvira Pavlovna — Candidate of Engineering Science, Professor, Professor of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Samoilenko Maksim Andreevich — Postgraduate student of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Kornilova Yuliya Borisovna — Engineer of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Shishkin Denis Andreevich — Engineer of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Ibragimova Zul'fira Kaitarbekovna — Postgraduate student of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

УДК 543.97

**Е. В. Москвичева^а, Н. А. Сахарова^а, А. А. Сахарова^а, В. П. Батманов^а, В. В. Сон^б,
Ю. Б. Корнилова^а**

^а*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^б*Волгоградский государственный аграрный университет*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ И ВОДНЫХ РАСТЕНИЙ

Описаны исследования по определению концентрации хлореллы и сине-зеленых водорослей, при которых максимально очищается водоем.

В период цветения происходит ингибирование, снижение концентрационной способности водорослей. Выявлена прямая зависимость показателей: цветности, взвешенных веществ, БПК₅, окисляемости бихроматной (БПК) от концентрации водных растений (ВР).

К л ю ч е в ы е с л о в а: водоросли, водные растения, цветение.

Как известно [1—3], формирование качества воды, ее очищение в водных экосистемах зависит от физических, химических и биологических процессов.

Впервые проведены исследования, позволившие определить благоприятные концентрационные условия взаимодействия загрязнителей и двух вариантов водорослей: хлореллы (ХЛ) и сине-зеленых водорослей (СЗВ), обеспечивающее в результате высокую эффективность очистки и устойчивое развитие водной системы в рассматриваемых контрольных пунктах.

Эксперимент, представленный в статье, является результатом проведения большого объема поэтапных исследований:

выявления наиболее жизнеустойчивых водных растений (ВР) для воды бассейна Нижней Волги,

использования для исследования, на основе ХЛ и СЗВ, семи загрязнителей (из них два органических), так как изучение природных и синтезированных органических загрязнителей, отличающихся по классам, растворимости и токсичности, показали отклонения в достигаемом эффекте в пределах 10...12 %.

Предварительные исследования проводились с целью наработки базы данных для условий культивирования сообщества хлореллы и сине-зеленых водорослей с определенными загрязнителями в период 2010—2015 гг. в бассейне р. Волга.

В качестве загрязнителей взяты соединения, степень загрязнения которых (или их гомологов) превышает в контрольных пунктах ПДК более чем в 40 раз (данные масс-спектрального анализа), и модельные растворы хлореллы и сине-зеленых водорослей, так как сине-зеленые водоросли преобладают (до 80...84 %) в общей массе водных растений.

За период исследования (5 лет) в контрольных точках обнаружено 118 видов, разновидностей и форм водных растений.

Наибольшее видовое разнообразие в контрольных точках отмечалось у сине-зеленых водорослей. В зимний период (с декабря по первую декаду апреля) водных растений в воде мало и они не оказывают существенного влияния на формирование качества воды. Однако в январе (в течение 5 лет) зафиксировано довольно большое количество водных растений — 362,6 тыс. кл/дм³ с биомассой 1,7 г/м².

Наибольшее количество водорослей в воде отмечается обычно с мая по август включительно — 860,0 тыс. г/м² с биомассой 0,41 г/м².

Изучая опыт по ликвидации сине-зеленых водорослей в ряде водоемов, впервые поставлена задача максимально инициировать процесс самоочищения рассматриваемого водоема на основе прежде всего жизнедеятельности присутствующих сине-зеленых водорослей и заселения новыми водорослями, в частности, ХЛ, тщательно изучив ее положительные и отрицательные стороны. ХЛ обладает способностью подавлять активность сине-зеленых водорослей и тем самым ликвидировать бурное цветение водоема. Однако ХЛ с течением времени [4] полностью ингибирует сине-зеленые водоросли, что отрицательно отражается на биообеспечении водоема.

Таким образом, все дальнейшие исследования проводились с ХЛ и сине-зелеными водорослями.

Первоначально при проведении эксперимента была выявлена прямая зависимость величин показателей: цветность, взвешенные вещества, БПК₅, окисляемость бихроматная (БПК) от концентрации, г/л, массы ВР (рис. 1).

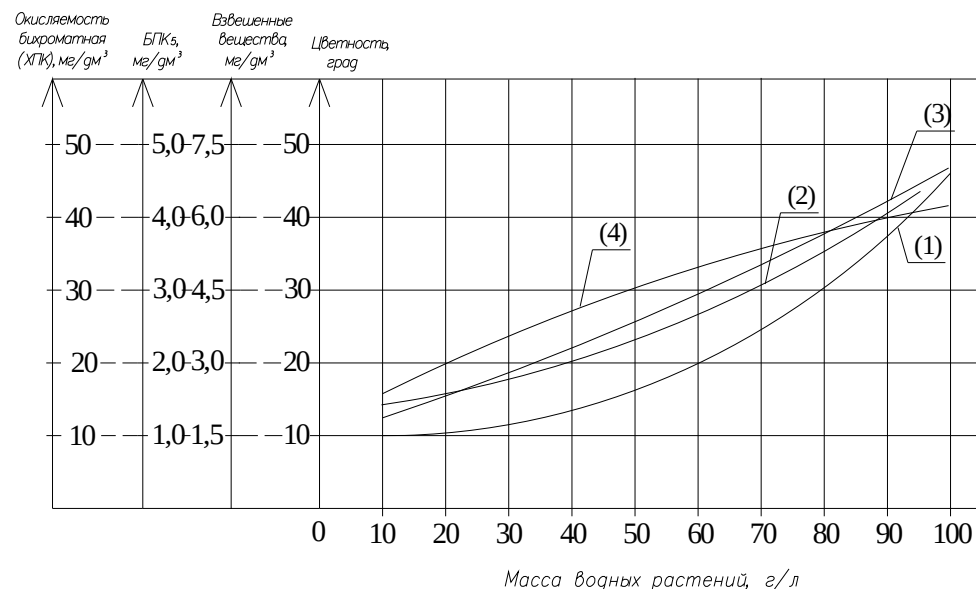


Рис. 1. Зависимость величин от концентрации массы ВР: 1 — цветность; 2 — взвешенные вещества; 3 — БПК₅; 4 — окисляемость бихроматная (ХПК)

Полученные зависимости подтверждают данные, выявленные в реальных средах за 5-летний период. В период цветения водные пробы по известным методикам отфильтровывались, полученную массу обезвоживали и далее определяли в сухом остатке количество органических и неорганических составляющих [1, 2, 5, 6].

Анализ химического состава сухого остатка из реальных водных проб по органическим и неорганическим элементам показал, что в них присутствуют органические и неорганические загрязнители, которые не превышают 40...44 % от общей массы сухого остатка.

Опытным путем также установлено, что неорганическая часть сухого остатка идентична по химическому составу неорганических загрязнителей реальных водных проб. В органической фракции сухого остатка выявлены структуры

молекул органических веществ, которые также обнаружены в водных реальных пробах. Однако процентное содержание загрязнителей в воде (исследуемых точках) в меньшей степени (на 11...14 %) наблюдалось в начале мая и конце августа. В остальное время, со второй декады мая по вторую декаду августа, водоросли лишь частично (не более 20...23 %) взаимодействуют с загрязнителями.

Таким образом, сделан вывод, что в период цветения происходит ингибирование, снижение реакционной способности ВР, среди которых до 90 % приходится на СЗВ в любое время года.

Требовалось провести исследование по определению благоприятных условий взаимодействия ВР и загрязнителей и найти ингибитор роста СЗВ для предотвращения их резкого роста и снижения в этот период пассивации.

Очень тщательно были изучены положительные и отрицательные результаты экспериментов по внедрению в искусственные водоемы для предотвращения цветения водоросли ХЛ. Более 60 лет проводятся исследования с ХЛ [4, 5, 7, 8].

Для дальнейших исследований были выбраны загрязнители по следующим признакам:

превышение значений концентраций в водоеме за последние 5 лет в 40 и более раз;

элементы, участвующие в комплексообразовании.

Из неорганических загрязнителей взяты: соединения железа (III), олова, меди (безводные сульфаты); два органических соединения: природного происхождения: углевод — сахароза; синтезированное — диэтиламин.

В предварительных исследованиях показано, что все органические соединения, независимо от класса и природы происхождения, активно реагируют с ВР на молекулярном уровне, поэтому на данном этапе выбраны вещества легко идентифицируемые [3, 9—18].

Весь последующий эксперимент был основан на исследовании водных сред, содержащих обозначенные загрязнители и два вида водорослей: ХЛ и СЗВ. В табл. 1 дан химический состав модельных растворов.

Т а б л и ц а 1

Химический состав модельных растворов (ХЛ, СЗВ)

Номер раствора	Неорганическое соединение	Номер раствора	Органическое соединение
1	$\text{Fe}^{+3} + \text{ХЛ}$	7	Диэтиламин + ХЛ
2	$\text{Cu}^{+2} + \text{ХЛ}$	8	Сахароза + ХЛ
3	$\text{Sn}^{+2} + \text{ХЛ}$	9	Диэтиламин + СЗВ
4	$\text{Fe}^{+3} + \text{СЗВ}$	10	Сахароза + СЗВ
5	$\text{Cu}^{+2} + \text{СЗВ}$		
6	$\text{Sn}^{+2} + \text{СЗВ}$		

Анионы, неметаллы не рассматривались, так как результаты предварительных исследований показали их одинаковую степень избирательности к виду ВР. Модельные растворы готовились по двум схемам:

1. При одинаковой массе ВР (100 г/л) органических и неорганических загрязнителей.

2. При постоянной концентрации загрязнителей (по различной концентрации ВР).

Статистика измерений равна 7.

В последующих опытах требовалось выявить — имеют ли одинаковый или разный отклик загрязнители у ХЛ и СЗВ?

Приготавливались модельные растворы с ионами Fe^{+3} , различной концентрации, но постоянной массы ВР (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав модельных растворов при изменении температуры рН среды, времени взаимодействия $m_{\text{ХЛ}} = 100 \text{ мг/л}$; $m_{\text{Fe}^{+3}} = 5 \text{ г/л}$

Факторы воздействия	Условия взаимодействия	Концентрация иона Fe^{+3} г/л в растворе через 20 ч, г/л
Изменение температуры	Нагревание раствора на 10°C через каждые 20 ч	0,8...1,0
рН	Исходный раствор рН = 6,8. Уменьшали рН на 1 и увеличивали на 1 г/л, т. е. рН = ± 1 к исходному значению	0,89...1,1
Перемешивание	70 об./мин в течение 10 ч с перерывом через 2 ч	0,76...0,8

Величины концентраций загрязнителей превышали нормативные показатели.

Изменение концентрации загрязнителей в водных средах определяли через двое суток.

В работе приводится описание эксперимента для соединений железа (III) ввиду ограниченного объема текста.

На рис. 2, видно, что через 20...24 ч в растворе наступает резкое снижение концентрации ионов железа (III).

Максимальный эффект очистки достигает 78...80 % в среде с ХЛ.

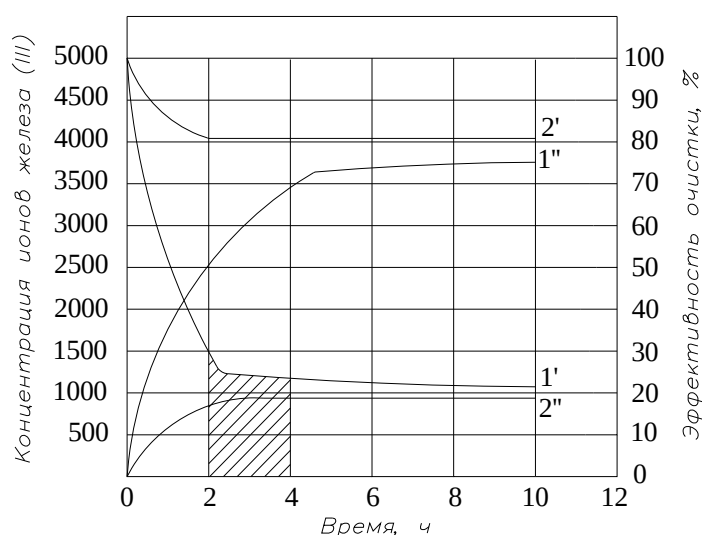


Рис. 2. Изменение концентрации ионов железа (III) и эффективности очистки: 1 — в среде ХЛ; 2 — в среде СЗВ

Концентрация Fe^{+3} (соль FeCl_3) составляет 5000 мг/л.

Кривые 1', 2' — изменение концентрации ионов Fe^{+3} в ХЛ и СЗВ.

Кривые 1'', 2'' — эффективность очистки в ХЛ и СЗВ.

Концентрации соли железа (III) брались в диапазоне от 2,5 г/л до 10 г/л. Исследовали только соли трехвалентного железа, так как достигалась большая сходимость результатов. Вероятно, при использовании солей железа (III), требуется более короткий промежуток времени (не более 2 ч) определения его способности аккумулироваться ВР. При более длительном промежутке времени Fe^{+2} переходит частично в Fe^{+3} , что приводит к искажению результата.

Для более точных данных необходимо проводить физическое моделирование в специальных реакторах, где проводится обеспечение стабильности окислительных функций ВР, т. е. необходимо подавить все процессы в ВР, кроме хемосорбции. Такого оборудования даже в специальных биохимических лабораториях пока нет.

На рис. 3 представлена зависимость эффективности очистки для растворов с ионами Fe^{+3} различных концентраций от массы ХЛ.

Обозначенные исследования по аккумуляции ВР ионов Fe^{+3} далее проводились лишь с ХЛ, так как ее эффективность очистки в 2,5 и более раз превышает в аналогичных условиях СЗВ.

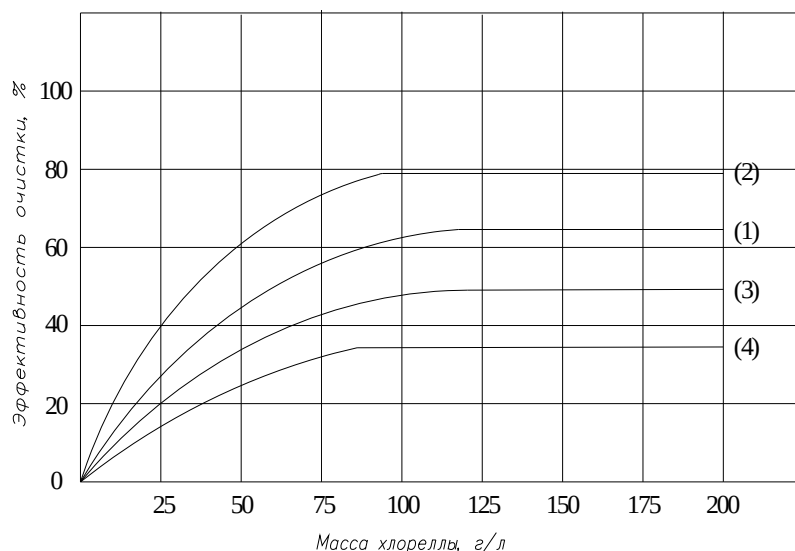


Рис. 3. Зависимость эффективности очистки от массы ХЛ при различных концентрациях ионов железа Fe(III)

Кривые 1—4 соответствуют концентрации ионов железа Fe(III) от 2,5; 5; 7,5; 10 г/л.

Аналогичные данные получены для ионов Cu^{+2} , Sn^{+2} и частично для щелочных и щелочноземельных металлов.

Анализ результатов позволил сделать выводы: большой отклик неорганические ионы получают у ХЛ, максимальное поглощение (до 78...80 %) достигается через 1,5...2 сут. при соотношении загрязнителя и ХЛ 1 : 2; можно уменьшать концентрацию загрязнителя в 50...115 раз, но зависимость по эффективности сохраняется, если концентрация иона Fe^{+3} выше, то ХЛ (также и СЗВ) погибает, так как происходит, вероятно, отравление клеток.

Аналогичные выводы относятся ко всем катионам металлов загрязнителям [19—24]. Однако аккумулярующая способность ХЛ по отношению к металлам в пределах 14...17 % меняется, она возрастает при увеличении атомной массы или радиуса иона. Если расположить в ряд Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , Fe^{+3} , Cu^{+2} , Sn^{+2} , то желаемый аккумулярующий эффект будет достигнут быстрее для иона Sn^{+2} , затем Cu^{+2} и далее соответственно.

При исследовании раствора, в котором содержатся ионы Cu^{+2} , Fe^{+3} , Sn^{+2} , эффект очистки также достигает 78...80 %, но из всей массы ХЛ отклик получает не 40...42 % массы (из 100 г), а больший процент, но не более 65...68 %. То есть в исследовании не были достигнуты условия, когда близкая к 100 % масса откликалась на загрязнение. Подобное, вероятно, обусловлено определенными пространственными эффектами. Рассмотрение этого вопроса выходит за рамки данной статьи, хотя и представляет несомненный интерес.

Как показали данные анализа сухого остатка на ион Fe^{+3} через различные промежутки времени (от 10 до 60 ч) при исходной концентрации ионов Fe^{+3} , равной 5 г/л, в сухом остатке Fe^{+3} находится в свободном виде и не образует в клетках водоросли устойчивое металлоорганическое вещество — субстрат гуминового продукта.

В лабораторных условиях доказано, что силы взаимодействия ионов Fe^{+3} с ХЛ значительны, так как исследуемая водная среда с ХЛ подвергалась воздействию различных факторов (изменение температуры, pH, перемешивание), но десорбция не происходила. Изменение концентрации ионов железа происходит в пределах 8...10 %, о чем свидетельствуют данные табл. 2.

Таким образом, постоянство состава водной среды после поглощения соответствующей массы неорганического загрязнителя ХЛ сохраняется.

Далее проведены исследования по определению величины наиболее эффективной массы СЗВ, при которой предполагается достижение эффекта очистки неорганических ионов не менее 76...80 %.

На рис. 4 представлена зависимость эффективности очистки от массы СЗВ при различных концентрациях ионов железа (III).

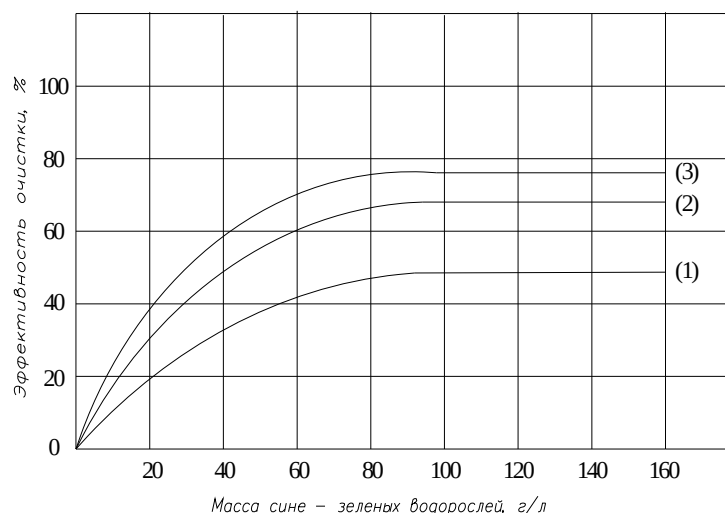


Рис. 4. Зависимость эффективности очистки от массы СЗВ при различных концентрациях ионов железа (III): кривые 1—3 — концентрация ионов Fe^{+3} от 0,5 до 5 г/л: 1 — 1,0 г/л; 2 — 2,5 г/л; 3 — 5 г/л

Таким образом, в ХЛ включаются дополнительные участки и в зависимости от концентрации загрязнителя доля работающих участков разная. Установлено, что при концентрации загрязнителя в пределах 0,05% сорбируется не более 24...27 % массы ВР. Эта величина не зависит от температуры среды, объемов воды, времени (пробы исследовались в течение 24 мес. в лабораторных условиях).

Следовательно, у ХЛ существует барьер для неорганических загрязнителей, определяемый их концентрациями. Каждые 5...8 % загрязнителя (для всех катионов металлов и анионов) в процесс аккумуляции (очистки воды) включаются 10...12 % массы ХЛ.

Были проведены более 1200 опытов, но 100 % работающей биомассы не удалось получить. Ее максимальный рабочий отклик составляет 40...43 %, т. е. 40...43 г массы от 100 г исходной массы ХЛ.

Как уже отмечено, при увеличении концентрации загрязнителя до величин, соответствующих залповому выбросу неочищенных промышленных сточных вод, гибель ХЛ происходит в течение 30...34 ч (что также отмечено и для СЗВ).

Выводы:

в период цветения происходит ингибирование, снижение реакционной способности ВР, среди которых до 90 % приходится на СЗВ в любое время года;

доказано, что масса ВР (в частности, для ХЛ) для неорганических загрязнителей не должна превышать соотношение концентраций ХЛ : ионы железа (III) = 1: 4. Например, при содержании иона железа (III) = 1 г/л для максимального извлечения его из водной среды (80 %) требуется 4 г работающей биомассы, т. е. общая масса ХЛ = 40 г/л;

избыток ВР также замедляет, точнее, блокирует процесс взаимодействия загрязнителя и ВР (это, вероятно, процесс хемосорбции). Таким образом, в условиях Нижней Волги на сегодняшний день, максимальный эффект очистки от неорганических загрязнителей способен достичь ХЛ (76...78 %).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алимов А. Ф. Введение в продукционную гидробиологию. Ленинград: Гидрометеоздат, 1989. 152 с.
2. Левич А. П., Максимов В. Н., Булгаков Н. Г. Теоретическая и экспериментальная экология планктонных водорослей. Управление структурой и функциями сообществ: учеб. пособие. М.: Изд-во НИЛ, 1997. 184 с.
3. Остроумов С. А. О некоторых вопросах поддержания качества воды и самоочищения // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 3. С. 337—346.
4. Богданов Н. И. Биологическая реабилитация водоемов. 3 изд., доп. и перераб. Пенза: РИО ПГСХА, 2008. 126 с.
5. Багдасарян А. С. Эффективность использования тест-систем при оценке токсичности природных сред // Экология и промышленность России. 2007. С. 44—48.
6. Богданов Н. И. Биологические аспекты борьбы с «цветением» воды синезелеными водорослями в Пензенском водохранилище // Водохозяйственный комплекс России: состояние, проблемы, перспективы: материалы конф. Пенза, 2003. С. 23—24.
7. Храменков С. В. Идеология водного хозяйства в XXI веке // Жилищное и коммунальное хозяйство. 2011. С. 24—27.
8. Богданов Н. И. Штамм микроводоросли *Chlorella vulgaris* — продуцент биомассы: пат. Рос. Федерации № 1751981; Бюл. № 4.
9. Кружилин И. П., Мелихов В. В., Богданов Н. И. Биотехнологические методы решения проблемы «цветения» водоемов Южных регионов России // 7-й Международный конгресс «Вода: экология и технология»: сб. докл. Ч. I. М., 2006. С. 20—21.

10. Богданов Н. И. Биологические основы предотвращения «цветения» Пензенского водохранилища синезелеными водорослями. 2 изд., перераб. и доп. Пенза: РИО ПГСХА, 2007. 76 с.
11. Богданов Н. И. Штамм микроводоросли *Chlorella vulgaris* BIN для получения биомассы и очистки сточных вод: пат. Рос. Федерации № 2192459. Бюл. № 31.
12. Биологическая мелиорация водоемов Волгоградской области / Н. И. Богданов, В. В. Мелихов, И. П. Кружилин и др. // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: материалы III Международной научн. конф. Минск — Нарочь, 2007. С. 85—86.
13. Методы физиолого-биохимического исследования водорослей. Киев: Наукова думка, 1975. 247 с.
14. Музафаров А. М., Таубаев Т. Т. Культивирование и применение микроводорослей. Ташкент: Фан, 1984. 133 с.
15. Совершенствование методов анализа воды в период биообрастаний / Л. В. Боронина, Э. П. Доскина, А. А. Сахарова, Ю. Н. Гончар, Г. Л. Гиззатова // Научный потенциал регионов — на службу модернизации: межвузовский сб. науч. ст. Астрахань: ГАОУ АО ВПО «АИСИ», 2013. С. 113—120.
16. Сахарова Н. А., Сахарова А. А., Гиззатова Г. Л. К вопросу о факторах, влияющих на процессы самоочищения искусственных водоемов // Потенциал интеллектуально одаренной молодежи — развитию науки и образования: материалы II Международного науч. форума молодых ученых, студентов и школьников, г. Астрахань, 20—24 мая 2013 г. Астрахань: ГАОУ АО ВПО «АИСИ», 2013. С. 342—345.
17. Новиков Ю. В., Ласточкина К. О., Болдина З. Н. Методы исследования качества воды водоемов. М.: Медицина, 1990. 400 с.
18. Fiskesjö G. The Allium test as a standard in environmental monitoring // *Hereditas*. 1985. Vol. 102. Iss. 1. Pp. 99—112. DOI: 10.1111/j.1601-5223.1985.tb00471.x
19. Ostroumov S. A. Biological filtering and ecological machinery for self — purification and bioremediation in aquatic ecosystems: towards a holistic view // *Rivista di Biologia*. 1998. Vol. 91. Pp. 221—232.
20. Ostroumov S. A. Polyfunctional role of biodiversity in processes leading to water purification: current conceptualizations and concluding remarks // *Hydrobiologia*. 2002. V. 469. P. 203—204.
21. Ostroumov S. A. Developing fundamental concepts in aquatic and general ecology: from aquatic and ecological research to applications relevant to sustainability // *Ecol. Studies, Problems, Solutions*. 2003. Vol. 6. P. 28—33.
22. Способ повышения надежности функционирования систем водного хозяйства / Ю. И. Олянский, А. А. Болеев, А. А. Сахарова, Д. О. Игнаткина, П. Ф. Юрин, А. А. Войтюк // Интернет-вестник ВолГАСУ. Серия: Политематическая. 2013. Вып. 2(27). Ст. 39. URL: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
23. Москвичева Е. В., Сахарова А. А., Войтюк А. А. Определение влияния состава речных вод на скорость биообрастания металлических конструкций водозаборных сооружений // Перспективы развития строительного комплекса: материалы VII Международной науч.-практич. конф. профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов, 28—31 октября 2013 г. Астрахань: ГАОУ АО ВПО «АИСИ», 2013. Т. 1. С. 233—237.
24. Предотвращение биологического обрастания металлических конструкций в системах водного хозяйства / Е. В. Москвичева, А. А. Болеев, А. А. Сахарова, А. А. Войтюк, Н. А. Сахарова, М. А. Самойленко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. : Строительство и архитектура. 2013. Вып. 34 (53). С. 107—113.

© Москвичева Е. В., Сахарова Н. А., Сахарова А. А., Батманов В. П., Сон В. В.,
Корнилова Ю. Б., 2016

Поступила в редакцию
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Определение условий, влияющих на процесс взаимодействия загрязнителей и водных растений / Е. В. Москвичева, Н. А. Сахарова, А. А. Сахарова, В. П. Батманов, В. В. Сон, Ю. Б. Корнилова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 63—73.

Об авторах:

Москвичева Елена Викторовна — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Сахарова Наталья Алексеевна — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Сахарова Анастасия Андреевна — ассистент кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Батманов Виктор Павлович — д-р мед. наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, vbatmanov@mail.ru

Сон Владислав Васильевич — канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры химии, Волгоградский аграрный университет. Российская Федерация, 4000002, г. Волгоград, пр. Университетский, 26, viv_vgasu@mail.ru

Корнилова Юлия Борисовна — инженер кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

E. V. Moskvicheva, N. A. Sakharova, A. A. Sakharova, V. P. Batmanov, V. V. Son, Yu. B. Kornilova

DETERMINATION OF CONDITIONS INFLUENCING THE PROCESS OF INTERACTION OF POLLUTANTS AND WATER PLANTS

The article describes the researches on determination of concentration of chlorella and blue-green alga at which the reservoir is cleaned to the maximum.

During blossoming period inhibition, decrease in alga concentration ability, takes place. The authors reveal direct dependence of indexes, such as colour, weighed substances, DV_5 , dichromate value (DV) on concentration of water plants (WP).

Key words: alga, water plants, blossoming period.

REFERENCES

1. Alimov A. F. *Vvedenie v produkcionnyy gidrobiologiyu* [Introduction to manufacturing hydrobiology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 152 p.
2. Levich A. P., Maksimov V. N., Bulgakov N. G. *Teoreticheskaya i eksperimental'naya ekologiya planktonnykh vodoroslei. Upravlenie strukturoi i funktsiyami soobshchestv* [Theoretical and experimental ecology of planktonic algae. Management of the structure and functions of communities]. Moscow, Publishing House NIL, 1997. 184 p.
3. Ostroumov S. A. [About some issues of maintenance of the quality of water and self-cleaning]. *Vodnye resursy* [Water Resources], 2005, 32(3), pp. 337—346.
4. Bogdanov N. I. *Biologicheskaya reabilitatsiya vodoemov* [Biological rehabilitation of water reservoirs]. Penza, Perm State Agricultural Academy Publ., 2008. 126 p.
5. Bagdasaryan A. S. [Efficiency of use of test systems at the assessment of toxicity of the environments]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2007, pp. 44—48.
6. Bogdanov N. I. [Biological aspects of protection against water bloom with blue-green algae in the Penza water reservoir]. *Vodokhozyaistvennyi kompleks Rossii: sostoyanie, problemy, perspektivy: materialy konf.* [Water management complex of Russia: state, problems, prospects. Proc. of Conf.]. Penza, 2003. Pp. 23—24.
7. Khramenkov S. V. [Ideology of water management in XXI century]. *Zhilishchnoe i kommunal'noe khozyaistvo* [Residential and public services], 2011, Pp. 24—27.
8. Bogdanov N. I. *Shtamm mikrovodorosli Chlorella vulgaris — produtsent biomassy* [Chlorella vulgaris microalgae strain — a biomass producer. Patent RF, no. 1751981].

9. Kruzhilin I. P., Melikhov V. V., Bogdanov N. I. [Biotechnological methods of problem solution of water reservoir bloom in the Southern regions of Russia]. *7-i Mezhdunarodnyi kongress «Voda: ekologiya i tekhnologiya»: sb. dokl. Ch. I* [7th Int. Congress "Water: ecology and technology". P. I]. Moscow, 2006. Pp. 20—21.
10. Bogdanov N. I. *Biologicheskie osnovy predotvrashcheniya «tsveteniya» Penzenskogo vodokhranilishcha sinezelenymi vodoroslyami* [Biological principals of prevention of water bloom with blue-green algae in the Penza water reservoir]. Penza, Perm State Agricultural Academy Publ., 2007. 76 p.
11. Bogdanov N. I. *Shtamm mikrovodorosli Chlorella vulgaris BIN dlya polucheniya biomassy i ochistki stochnykh vod* [Chlorella vulgaris BIN microalgae strain for preparation of biomass and wastewater treatment]. Patent RF, no. 219245.
12. Bogdanov N. I., Melikhov V. V., Kruzhilin I. P. [Biological melioration of water reservoirs in Volgograd Oblast]. *Ozernye ekosistemy: biologicheskie protsessy, antropogennaya transformatsiya, kachestvo vody: materialy III Mezhdunarodnoi nauchn. konf.* [Lake ecosystems: biological processes, anthropogenic transformation, quality of water. Proc. III Int. Sci. Conf.]. Minsk — Naroch', 2007. Pp. 85—86.
13. *Metody fiziologo-biokhimicheskogo issledovaniya vodoroslei* [Methods of physiological and biochemical research of algae]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1975. 247 p.
14. Muzafaro A. M., Taubaev T. T. *Kul'tivirovanie i primeneniye mikrovodoroslei* [Cultivation and use of microalgae]. Tashkent, Fan Publ., 1984. 133 p.
15. Boronina L. V., Doskina E. P., Sakharova A. A., Gonchar Yu. N., Gizzatova G. L. [Improvement of methods of water analysis in biofouling period]. *Nauchnyi potentsial regionov — na sluzhbu modernizatsii: mezhvuzovskii sb. nauch. st.* [Scientific resources of regions — for the benefit of modernization: interuniversity Set of scient. works]. Astrakhan, GAOU AO VPO "AISI", 2013. Pp. 113—120.
16. Sakharova N. A., Sakharova A. A., Gizzatova G. L. [Towards the factors that influence the self-cleaning processes in artificial reservoirs]. *Potentsial intellektual'no odarennoi molodezhi — razvitiyu nauki i obrazovaniya: materialy II Mezhdunarodnogo nauch. foruma molodykh uchenykh, studentov i shkol'nikov, g. Astrakhan', 20—24 maya 2013 g.* [Potential of the intelligently gifted youth — for the development of science and education. Proc. of II Int. Sci. Forum of Young Scientists, Students and Pupils, Astrakhan city, 20—24 May, 2013]. Astrakhan, GAOU AO VPO "AISI", 2013. Pp. 342—345.
17. Novikov Yu. V., Lastochkina K. O., Boldina Z. N. *Metody issledovaniya kachestva vody vodoemov* [Methods of research of water quality in reservoirs]. Moscow, Meditsina Publ., 1990. 400 p.
18. Fiskesjö G. The Allium test as a standard in environmental monitoring. *Hereditas*, 1985, 102(1), pp. 99—112. DOI: 10.1111/j.1601-5223.1985.tb00471.x
19. Ostroumov S. A. Biological filtering and ecological machinery for self — purification and bioremediation in aquatic ecosystems: towards a holistic view. *Rivista di Biologia*, 1998, vol. 91, pp. 221—232.
20. Ostroumov S. A. Polyfunctional role of biodiversity in processes leading to water purification: current conceptualizations and concluding remarks. *Hydrobiologia*, 2002, vol. 469, pp. 203—204.
21. Ostroumov S. A. Developing fundamental concepts in aquatic and general ecology: from aquatic and ecological research to applications relevant to sustainability. *Ecol. Studies, Problems, Solutions*, 2003, vol. 6, pp. 28—33.
22. Olyanskii Yu. I., Boleev A. A., Sakharova A. A., Ignatkina D. O., Yurin P. F., Voityuk A. A. [The way to increase reliability of water carriage system functioning]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2013, no. 2(27), paper 39. Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
23. Moskvicheva E. V., Sakharova A. A., Voityuk A. A. [Determination of the influence of composition of river waters on the speed of biofouling on metal structures of water intake]. *Perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa: materialy VII Mezhdunarodnoi nauch.-praktich. konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava, molodykh uchenykh i studentov, 28—31 oktyabrya 2013 g.* [Development prospects for the construction complex. Proc. VII Int. Conf.]. Astrakhan, GAOU AO VPO "AISI", 2013. Vol. 1. Pp. 233 — 237.
24. Moskvicheva E. V., Boleev A. A., Sakharova A. A., Voityuk A. A., Sakharova N. A., Samoyilenko M. A. [Prevention of biological fouling of metal constructions water carriage systems]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2013, iss. 34(53), pp. 107—113.

For citation:

Moskvicheva E. V., Sakharova N. A., Sakharova A. A., Batmanov V. P., Son V. V., Kornilova Yu. B. [Determination of conditions influencing the process of interaction of pollutants and water plants]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 63—73.

About authors:

Moskvicheva Elena Viktorovna — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Sakharova Natal'ya Alekseevna — Postgraduate student of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Sakharova Anastasiya Andreevna — Assistant of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Batmanov Viktor Pavlovich — Doctor of Medical Science, Professor of Health and Safety in Construction and Municipal Services Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, vbatmanov@mail.ru

Son Vladislav Vasil'evich — Candidate of Chemical Science, Docent, Docent of Chemistry Department, Volgograd Agricultural University. 26, Universitetskii Prospekt, Volgograd, 400002, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Kornilova Yuliya Borisovna — Engineer of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

УДК 628.33

**Е. В. Москвичева, И. В. Стрепетов, В. П. Батманов, Э. П. Доскина,
Е. Л. Ханова, М. А. Суворова**

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ПРОЦЕСС ФИЛЬТРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАГРУЗКИ ИЗ НЕФТЕОТХОДА

Предлагается экономичный и эффективный метод очистки нефтесточков (после механической очистки) с использованием сорбента из нефтеотхода (СиНО). Изучены химический состав, физико-химические свойства и характеристики отходов нефтепереработки; определены закономерности их модификации полистиролом для получения нового СиНО для очистки нефтесодержащих сточных вод; найдены физико-химические и технологические показатели полученного СиНО, необходимые для его использования для очистки воды от нефтепродуктов; исследованы его изотермы сорбции.

Данный сорбент из нефтеотхода, с одной стороны, позволяет утилизировать отходы за вода и отходы полимеров, с другой — дает возможность получить дешевый эффективный материал для очистки сточных вод. Удобно и экономически выгодно использовать СиНО, полученный из отходов нефтеперерабатывающего завода на самом предприятии, имеющем проблемы с очисткой своих нефтесодержащих стоков на очистных сооружениях.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сорбент из нефтеотхода, сточные воды, нефтепереработка, загрузка фильтра, фильтрование, нефтепродукт.

Процесс фильтрования определяется множеством технологических параметров, в том числе высотой фильтрующего материала, гидродинамическими режимами процесса, температурой [1—3]. Очень часто более эффективным может оказаться применение менее долговечной, но обеспечивающей большую производительность фильтра загрузки. Кроме этого, материалы, применяемые в качестве загрузок водоочистных фильтров, должны иметь необходимую гранулометрическую структуру, химическую стойкость и высокую фильтрующую способность. Сорбент из нефтеотхода (СиНО), имеющий в своем составе оксиды металлов, характеризуется высокой устойчивостью к механическим нагрузкам и химическому разрушению, низкой насыпной плотностью, высокоразвитой поверхностью, достаточно высокой нефтеемкостью, и следовательно, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к фильтрующим загрузкам.

Испытания различных фракций разработанного СиНО проводились на лабораторной фильтровальной установке. Загрузку адсорбера производили сверху. По мере заполнения промежутка между сетками в адсорбер при помощи стержня опускали насадку. Разборку адсорбера и удаление слоя СиНО выполняли в обратном порядке. Фильтрование загрязненной воды проводили при $pH = 7,0$ в следующем порядке: открывали воду на адсорбер, устанавливали расход воды и при заданных параметрах сверху пропускали воду через насадку, снизу собирали очищенную воду и анализировали на содержание нефтепродукта гравиметрическим и фотоколориметрическим методами.

Влияние температуры модельной сточной воды на процесс фильтрования изучали при высоте слоя СиНО в фильтровальной колонке 100 мм, используя модельные растворы с начальной концентрацией 5, 10 и 20 мг/л. Удельный расход воды, проходящей через колонку, был равен $7,0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Изучение влияния температуры модельной сточной воды на процесс фильтрования показало, что при понижении температуры повышается эффективность удаления нефтепродуктов (табл. 1) (рис. 1).

Т а б л и ц а 1

Влияние температуры воды на степень очистки при удельном расходе $7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Начальная концентрация нефтепродуктов в воде C_0 , мг/л	Размер фракций SiHO , мм	Степень очистки при различных температурах, %, при			
		10 °C	20 °C	30 °C	50 °C
5	0,1...0,5	98,60	98,40	97,80	97,20
	1,0...5,0	95,90	95,30	94,50	93,90
	5,0...10,0	88,50	87,90	85,70	81,80
10	0,1...0,5	99,05	98,80	98,30	97,60
	1,0...5,0	96,70	96,40	95,20	94,50
	5,0...10,0	89,70	88,80	86,90	82,80
20	0,1...0,5	99,50	99,30	98,95	98,30
	1,0...5,0	97,60	97,25	96,10	95,25
	5,0...10,0	90,85	90,40	88,45	84,90

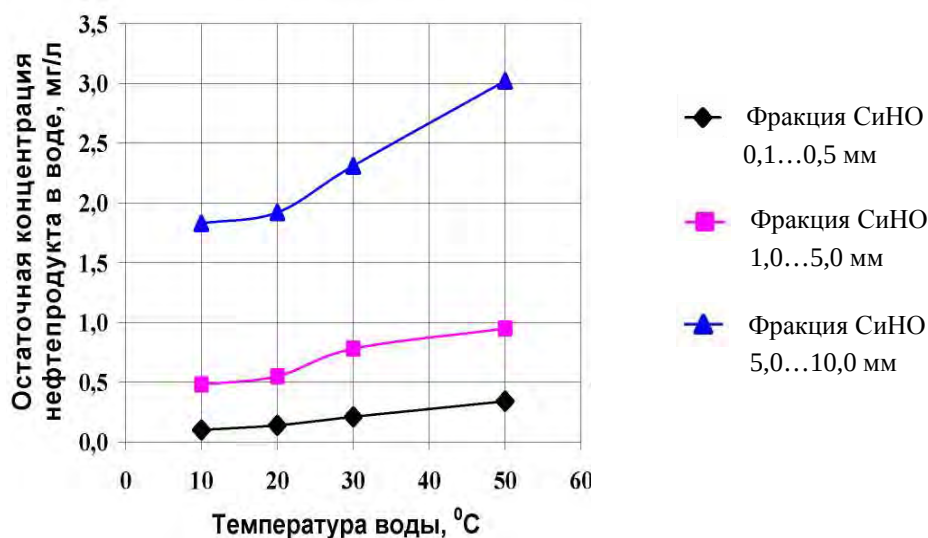


Рис. 1. Зависимость концентрации нефтепродуктов в отфильтрованной воде от температуры при использовании различных фракций SiHO и начальной концентрации нефтепродуктов в воде 20 мг/л

Это можно объяснить тем, что при повышении температуры воды снижается вязкость нефтепродукта и облегчается его стекание при фильтровании в последующие по направлению потока слои сорбента. Тем самым более полно используется весь объем фильтрующего слоя, но при этом происходит снижение эффективности очистки.

Также полученные данные свидетельствуют, что с увеличением начальной концентрации нефтепродуктов эффективность очистки увеличивается. При температуре 20 °С и начальной концентрации нефтепродуктов в воде до 20 мг/л, размере частиц фракции СиНО, не превышающем 5 мм, степень очистки воды составляет более 95 %.

Изучение процесса фильтрования модельных растворов через слой СиНО показало, что степень очистки изменяется в зависимости от удельного расхода воды. При этом немаловажную роль играет фракционный состав фильтрующей загрузки. Объемную скорость модельной сточной воды, измеренную в мл/с пересчитывали на объемный расход V (м³/с) или на удельный расход, измеряемый в м³/(м²·ч). Начальная концентрация нефтепродуктов в воде составляла 10 мг/л. Данные, полученные в этой серии экспериментов, приводятся в табл. 2. Указанные значения показателей очистки достигались при комнатной температуре спустя некоторое время после начала работы фильтра, а в начальный период фильтрования они превосходили табличные значения.

Т а б л и ц а 2

*Показатели очищенной воды
при различных удельных расходах модельной сточной воды ($C_0 = 10$ мг/л)*

Номер опыта	Удельный расход воды, м ³ /(м ² ·ч)	Содержание нефтепродуктов в очищенной воде, мг/л		
		Размер фракции СиНО: 0,1...0,5 мм	Размер фракции СиНО: 1,0...5,0 мм	Размер фракции СиНО: 5,0...10,0 мм
1	1,0	0,02	0,09	1,10
2	1,5	0,02	0,11	1,12
3	2,1	0,03	0,14	1,16
4	3,0	0,05	0,19	1,22
5	4,1	0,07	0,21	1,30
6	5,2	0,09	0,24	1,47
7	6,4	0,10	0,27	1,65
8	7,0	0,10	0,31	1,90
9	8,0	0,19	0,39	2,51
10	9,0	0,28	0,59	3,37

Как видно из полученных данных, при применении мелких фракций сорбента степень извлечения нефтепродуктов выше. Так, содержания нефтепродуктов в очищенной воде после фильтрования через слой СиНО высотой 100 мм для смеси фракций СиНО 0,1...0,5 мм уложились в интервал 0,03...0,12 мг/л, для смеси фракций СиНО 1,0...5,0 мм — в интервал 0,1...0,3 мг/л, а для смеси фракций СиНО 5...10 мм соответствующий показатель очистки колеблется в пределах 1,1...1,9 мг/л при тех же удельных расходах воды вплоть до 7 м³/(м²·ч). Степень очистки при этом составляет, соответственно, не менее 98,8 %, 96,9 % и 81,0 %.

При удельных расходах модельной сточной воды до 7 м³/(м²·ч) и температуре 20 °С снижение концентрации нефтепродукта в фильтрате до

практически отсутствия может быть достигнуто увеличением площади и времени контакта загрязненной воды с сорбентом, т. е. применением фракции СиНО с малыми размером частиц и увеличением высоты сорбирующего слоя СиНО в фильтре.

Расчет критериев Рейнольдса, характеризующих гидродинамические режимы потоков в заполненном сорбентом адсорбере при удельных расходах 7,0 (Rei) и 1,0 (Яег) м³/(м²·ч), приведен ниже [4]:

$$R_{e_1} = \frac{W_1 D \rho}{\mu} = \frac{0,95 \cdot 10^{-2} \cdot 39,40 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^{-3}} = 374,3;$$

$$R_{e_2} = \frac{W_2 D \rho}{\mu} = \frac{0,67 \cdot 10^{-3} \cdot 39,40 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^{-3}} = 26,40,$$

где W_1 и W_2 — линейные скорости модельной загрязненной воды (м/с), измеренные при указанных расходах; D — диаметр фильтра, м; ρ — плотность жидкости, 10 кг/м³.

Измерения гидравлического сопротивления слоя СиНО показали, что по мере возрастания удельного расхода загрязненной воды оно возрастает. Результаты измерений приведены в табл. 3. Как видно из табличных данных, применение загрузок с различным фракционным составом не влияет сильно на перепад давления, очевидно вследствие того, что при указанных расходах линейные скорости воды в адсорбере низкие и гидродинамический режим потока ламинарный ($Re < 2300$). Но тем не менее, с увеличением дисперсности используемого СиНО гидравлическое сопротивление растет.

Для дальнейших исследований была взята фракция СиНО размером 1,0...5,0 мм.

Были проведены эксперименты, в которых меняли удельный расход воды при постоянном значении высоты загрузки СиНО 40 мм (фракция 1,0...5,0 мм). Графические зависимости эффективности очистки воды, загрязненной нефтепродуктами, от пропущенного объема при различных удельных расходах воды, представлены на рис. 2.

Таблица 3

Показатели гидравлического сопротивления фильтрующей массы при различных расходах модельной сточной воды

Номер опыта	Удельный расход воды, м ³ /(м ² ·ч)	Сопротивление СиНО, мм вод. ст.		
		Размер фракции СиНО: 0,1...0,5 мм	Размер фракции СиНО: 1,0...5,0 мм	Размер фракции СиНО: 5,0...10,0 мм
1	6,4	380	330	317
2	5,5	277	240	228
3	4,6	245	221	212
4	3,5	232	208	201

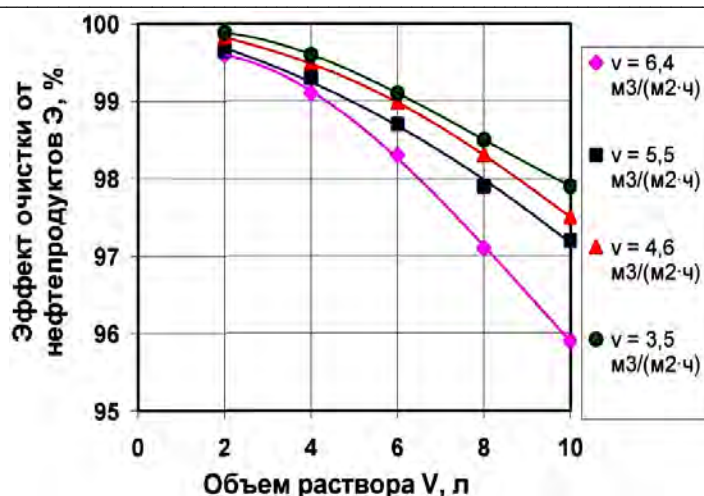


Рис. 2. Зависимость эффекта очистки стоков $\mathcal{E}$, загрязненных нефтепродуктами, от объема раствора V , пропущенного через слой СиНО (фракция 1,0...5,0 мм) при различном удельном расходе воды

Анализируя зависимости, представленные на рис. 2, можно сделать вывод, что эффективность очистки при расходах воды 3,5; 4,6 и 5,5 м³/(м²·ч) практически одинакова. В начальный момент ($V < 7$ л) при всех расходах воды достигалась эффективность более 98 %. С увеличением расхода до 6,4 м³/(м²·ч) наблюдается уменьшение эффективности, поэтому оптимальным можно считать расход воды 5...6 м³/(м²·ч).

Были проведены эксперименты, в которых варьировали высоту загрузки СиНО (фракция 1,0...5,0 мм) при постоянном значении удельного расхода воды 5,5 м³/(м²·ч). Графические зависимости эффективности очистки воды, загрязненной нефтепродуктами, от пропущенного объема при различной высоте загрузки СиНО представлены на рис. 3.

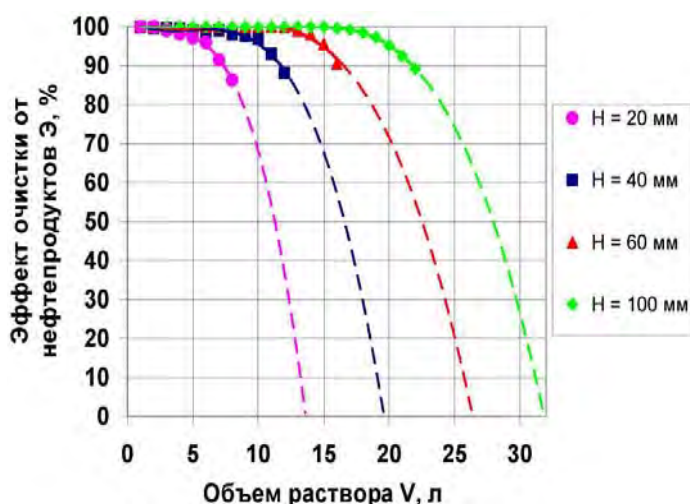


Рис. 3. Зависимость эффекта очистки стоков $\mathcal{E}$, загрязненных нефтепродуктом, от объема раствора V , пропущенного через слой СиНО (фракция 1,0...5,0 мм) при различной высоте слоя загрузки H

Используя различную высоту слоя СиНО в колонке: 20, 40, 60 и 100 мм (см. рис. 3), мы убедились в том, что по истечении некоторого промежутка времени профиль фронта адсорбции становится практически неизменным и перемещается по направлению потока.

Об этом говорит и распределение сорбированных нефтепродуктов на СиНО (фракция 1,0...5,0 мм) в фильтровальной установке вдоль слоя СиНО (количество нефтепродуктов, сорбированное СиНО, уменьшается вдоль высоты СиНО, максимально — в верхней части загрузки СиНО).

При удельном расходе 5...6 м³/(м²·ч) до проскока нефтепродуктов в фильтрат было отфильтровано 25 л модельной сточной воды через ряд последовательно расположенных слоев СиНО. Перед разборкой слоев через фильтр сверху вниз была пропущена дистиллированная вода. Анализ показал отсутствие в ней нефтепродуктов, что говорит о достаточной прочности связывания нефтепродуктов с СиНО. Далее фильтр был разобран, слои СиНО извлечены, отдельно взвешены и подвергнуты экстракции тетрагидрофураном. Результаты анализов после экстракции позволили определить количество извлеченных нефтепродуктов по высоте слоя СиНО (рис. 4).

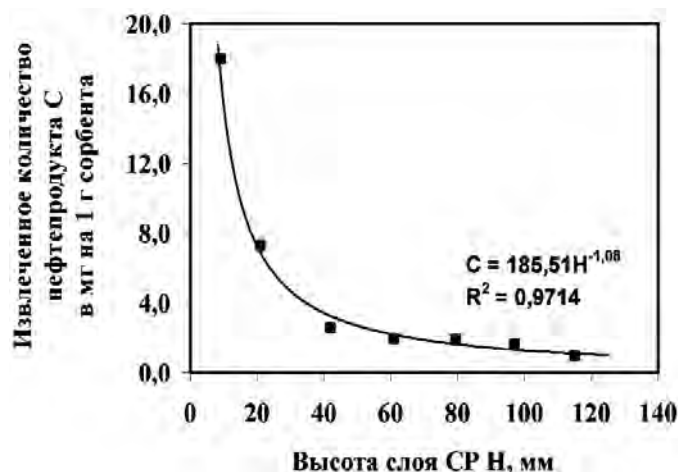


Рис. 4. Зависимость количества удельно извлеченных (поглощенных) нефтепродуктов от высоты слоя CP (расход загрязненной воды 5...6 м³/(м²·ч))

В процессе фильтрования нефтесодержащей воды частицы нефтепродуктов улавливаются первыми по направлению потока слоями сорбента, заполняя часть его пор и насыщая этот объем. Это приводит к тому, что данный слой сорбента уже не в состоянии удерживать дополнительные количества нефтепродуктов, поэтому они в виде пленки стекают по стенкам каналов слоя в направлении потока воды [4]. В какой-то момент времени в данном сечении слоя устанавливается равновесие между количеством нефтепродуктов, прилипающих к поверхности слоя и количеством нефтепродуктов, стекающих из этого слоя в виде пленки в последующие слои, т. е. происходит максимальное насыщение слоя. С течением времени фронт максимальной насыщенности сдвигается к верхней границе насадки, вследствие чего концентрация нефтепродуктов в фильтрате увеличивается. Это является сигналом для отключения установки.

Режим параллельного переноса фронта адсорбции [5], перемещающегося с постоянной скоростью U (что указывает на стационарность процесса), выражается известным уравнением Н. А. Шилова:

$$T = KH - \tau, \quad (1)$$

где T — время защитного действия фильтрующего слоя; K — коэффициент фильтрующего (защитного) действия слоя; τ — потеря времени защитного действия слоя; H — высота неподвижного слоя загрузки.

Для построения зависимости времени защитного действия от высоты слоя СиНО (фракция 1,0...5,0 мм), задавшись требуемой эффективностью процесса очистки воды 98 %, при различных высотах, мы определяли соответствующие объемы фильтрата и тем самым время защитного действия при различных высотах. Графическая зависимость времени защитного действия T от высоты слоя загрузки СиНО (H) представлена на рис. 5

В результате математической обработки графической зависимости (рис. 5) было получено уравнение зависимости времени защитного действия фильтра от высоты слоя СиНО (время T , мин; высота H , мм):

$$T = 1,85H - 7,73. \quad (2)$$

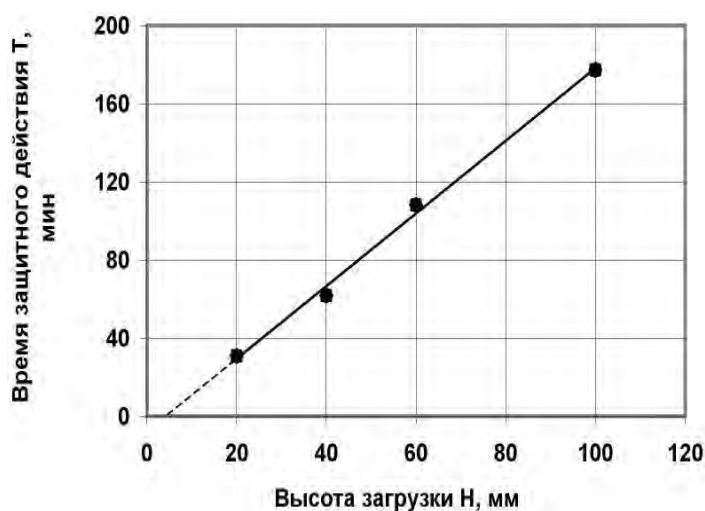


Рис. 5. Зависимость времени защитного действия слоя от высоты слоя загрузки H

Стоит отметить, что экспериментальные данные (см. рис. 4) хорошо аппроксимируются уравнению (1), уравнение (2) выведено с множественным коэффициентом детерминации $R = 0,9963$.

Из уравнения (2) и рис. 4 следует, что при высоте слоя загрузки СиНО (фракция 1,0...5,0 мм) в фильтре более 100 мм, расходе загрязненной воды 5...6 м³/(м²·ч) время защитного действия фильтра составляет более 175 мин, а степень очистки от нефтепродуктов достигает более 98 % при достаточно высокой прочности связывания нефтепродуктов в слое СиНО, что подтверждает выводы о хороших сорбционных свойствах СиНО по нефтепродуктам.

Вывод. Как самый экономичный и эффективный, но менее изученный, для исследования был выбран метод очистки нефтесточков (после сооружений механической очистки) с использованием СиНО.

Изучены химический состав, физико-химические свойства и характеристики отходов нефтепереработки, определены закономерности их модификации полистиролом (получен патент РФ) для получения нового СиНО для очистки нефтесодержащих сточных вод; найдены физико-химические и технологические показатели полученного СиНО, необходимые для его использования для очистки воды от нефтепродуктов; исследованы его изотермы сорбции.

Определены параметры флотационной очистки сточных вод с использованием СиНО в качестве загрузки: ввод СиНО в флотатор целесообразно осуществлять в потоке засасываемого воздуха; размер фракции СиНО — 0,03...0,5 мм; концентрация СиНО — 100...150 мг/л; изучена кинетика флотации и найдены константы флотации при различных режимах работы флотационной установки.

Определены параметры фильтровальной очистки сточных вод с использованием СиНО в качестве загрузки: получено уравнение, позволяющее определить время защитного действия СиНО при различной его высоте; при высоте слоя загрузки СиНО (фракция 1,0..5,0 мм) более 100 мм, расходе загрязненной воды $5.6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ время защитного действия фильтра составляет более 175 мин, достигается степень очистки от нефтепродуктов более 98 % при достаточно высокой прочности связывания нефтепродуктов в слое.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов А. Д. Сорбционная очистка воды. Л.: Химия, 1982. 168 с.
2. Жуков А. И., Карпухина Р. И. Доочистка мазутосодержащих сточных вод // Химия и технология воды. 1991. Т. 13. № 10. С. 19.
3. Лукиных Н. А., Липман Б. Л., Криштул В. П. Методы доочистки сточных вод. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1978. 156 с.
4. Варданян М. А. Доочистка нефтесодержащих сточных вод сорбционным методом на вспученном перлите и разработка технологии: дис... канд. техн. наук. Ереван, 2001. 144 с.
5. Бордунов В. В., Коваль Е. О., Соболев И. А. Полимерные волокнистые сорбенты для сбора нефти // Нефтегазовые технологии. 2000. № 6. С. 30—31.

© Москвичева Е. В., Стрепетов И. В., Батманов В. П., Доскина Э. П., Ханова Е. Л.,
Суворова М. А., 2016

Поступила в редакцию
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Процесс фильтрования с использованием загрузки из нефтеотхода / Е. В. Москвичева, И. В. Стрепетов, В. П. Батманов, Э. П. Доскина, Е. Л. Ханова, М. А. Суворова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 74—83.

Об авторах:

Москвичева Елена Викторовна — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Стрепетов Игорь Васильевич — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Батманов Виктор Павлович — д-р мед. наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, vbatmanov@mail.ru

Доскина Эльвира Павловна — канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Ханова Елена Леонидовна — старший преподаватель кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Суворова Маргарита Андреевна — магистрант кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

**E. V. Moskvicheva, I. V. Strepetov, V. P. Batmanov, E. P. Doskina,
E. L. Khanova, M. A. Suvorova**

FILTRATION PROCESS WITH THE USE OF LOAD FROM OIL REFINERY WASTES

The article offers an economical and effective method of cleaning drains (after mechanical treatment facilities) using sorbent of oil refinery waste (SINO). Chemical composition, physical and chemical properties and characteristics of oil refinery wastes are studied, regularities of their modification by polystyrene in order to get new SINO for cleaning of oily wastewater are determined; physical and chemical and technological characteristics of the received SINO that are necessary for water purification from oil are found; sorption isotherm is studied.

On the one hand, this sorbent of oil waste allows the plant to recycle wastes and waste polymers, on the other hand, it makes it possible to get a cheap effective material for sewage treatment. It is very convenient and cost-effective to use SINO derived from waste oil processing plant at the company having problems with purification of their oily wastewater at treatment plants.

Key words: sorbent of oil waste, wastewater, oil refining, filter loading, filtration, petroleum.

REFERENCES

1. Smirnov A. D. *Sorbtsionnaya ochistka vody* [Sorption water purification]. Leningrad, Khimiya Publ., 1982. 168 p.
2. Zhukov A. I., Karpukhina R. I. [Post-treatment of sewage containing heavy oil]. *Khimiya i tekhnologiya vody* [Chemistry and technology of water], 1991, 13(10), p. 19.
3. Lukinykh N. A., Lipman B. L., Krishtul V. P. *Metody doochistki stochnykh vod* [Sewage post-treatment methods]. Moscow, Stroizdat Publ., 1978. 156 p.
4. Vardanyan M. A. *Doochistka neftesoderzhashchikh stochnykh vod sorbtsionnym metodom na vspuchennom perlite i razrabotka tekhnologii* [Post-treatment of sewage containing oil by the sorption method on expanded perlite and technology development. Cand. Eng. Sci. Diss.]. Erevan, 2001. 144 p.
5. Bordunov V. V., Koval' E. O., Sobolev I. A. [Polymeric fibrous sorbents for oil skimming]. *Neftegazovye tekhnologii* [Oil and gas technologies], 2000, no. 6, pp. 30—31.

For citation:

Moskvicheva E. V., Strepetov I. V., Batmanov V. P., Doskina E. P., Khanova E. L., Suvorova M. A. [Filtration process with the use of load from oil refinery wastes]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 74—83.

About authors:

Moskvicheva Elena Viktorovna — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Strepetov Igor' Vasil'evich — Postgraduate student of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Batmanov Viktor Pavlovich — Doctor of Medical Science, Professor of Health and Safety in Construction and Municipal Services Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, ybatmanov@mail.ru

Doskina El'vira Pavlovna — Candidate of Engineering Science, Professor, Professor of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Khanova Elena Leonidovna — Senior Lecturer of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Suvorova Margarita Andreevna — Master's degree student of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

УДК 628.386

Е. В. Москвичева, Ю. Ю. Юрьев, В. П. Батманов, А. В. Приходченко, А. А. Фомин

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОДУКТА ПЕРЕРАБОТКИ ГАЛЬВАНО- И СОЖ-СОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД

Предлагается принципиально отличающийся от известных, способ обезвреживания гальваносодержащих отходов, позволяющий с высокими технико-экономическими показателями комплексно использовать все содержащиеся компоненты. Исключено образование отходов-осадков после очистки сточных вод, все загрязнители перерабатываются в сырьевой продукт ПЕК. В результате обработки шлама фосфорной кислотой получается масса, устойчивая при хранении, которая может быть рекомендована в качестве микроудобрений для овощных культур.

ПЕК используется в качестве гидроизоляционного материала для кровли, автодорог, полигонов, бассейнов, пластифицирующей пигментной добавки в бетон, кирпич, отделочную плитку.

К л ю ч е в ы е с л о в а: СОЖ, гальваносодержащие отходы, отходы, ПЕК, нефтеотходы, битум, реагент-восстановитель, очистка.

Предлагается способ обезвреживания гальваносодержащих отходов с использованием отходов того же предприятия, содержащих отработанные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), решается задача по утилизации и обезвреживанию гальваносодержащих шламов и отхода с отработанными СОЖ.

Реализация способа исключает понятие «отходы» в производстве, так как все содержащиеся вещества могут быть повторно использованы, в том числе и вода.

Предлагаемая технология не требует импортного дорогостоящего оборудования и специальных дополнительных реагентов.

В данном способе переработки отработанных растворов, содержащих соединения токсичного шестивалентного хрома, восстановление его до трехвалентного отходом промышленного производства в качестве реагента-восстановителя используют отработанные СОЖ на основе эмульсола с индустриальным маслом ИД-20.

Суть способа: к концентрату, содержащему 150...180 г/л хромового ангидрида, добавляется концентрат СОЖ на основе индустриального масла ИД-20, с концентрацией масла 450...470 г/л [1, 2]. Экспериментально выяснено, что оптимальным для реакции является соотношение гальваноконцентрата к СОЖ-концентрату 1:1. Так как процесс экзотермический, то происходит значительное выделение тепла, поэтому вся вода, содержащаяся в растворе, испаряется, доведя степень очистки раствора от хрома до 94...96 %. Продукт взаимодействия — сухой остаток ПЕК, в котором содержится хроморганическое соединение $\text{Cr}(\text{RCOO})_3$ и соединения металлов, согласно данным по химическому анализу гальваностокков.

Проведен анализ химического состава, полученного продукта взаимодействия концентратов (ПЕК). Такой продукт, как показали лабораторные и производственные испытания, может использоваться в различных отраслях, в частности, в качестве кровельной гидроизоляционной мастики, антикорро-

зийной грунтовок металло-железобетонных конструкций, пластифицирующей и пигментной добавки в бетоны и кирпич, гидроизоляционной составляющей в дорожных одеждах, бассейнах, полигонах для отходов.

Использование ПЕКа в резиновой промышленности. Современный технический прогресс с особой остротой ставит вопрос о синтезе резин со свойствами, удовлетворяющими запросы новой техники в области авто- и авиастроения, морского и железнодорожного транспорта, строительной индустрии, электротехнической и машиностроительной промышленности и других отраслях промышленности [1].

Наличие большого ассортимента эластомеров, выпускаемых промышленностью, все же не удовлетворяет всем запросам [3—8]. Решение этих проблем обеспечивается не только созданием новых эластомеров; главное в путях получения резин на основе существующих эластомеров — их модификации и образование структур резин, определяющих их свойства. Достигается это применением активных химикатов-добавок реакционноспособных соединений, взаимодействие которых с эластомерами ведет к созданию различного рода трехмерных сетчатых структур (вулканизатов) — носителей новых качеств резины, как конструкционного материала.

К настоящему времени синтезировано огромное число органических соединений различных классов, которые обладают структурирующим действием в процессах вулканизации. Однако все вулканизирующие агенты имеют один общий недостаток — высокую стоимость.

Анализ литературных данных показывает, что в качестве вулканизирующих агентов для хлорсодержащих полимеров используются дорогостоящие оксиды металлов ZnO , MgO , PbO [9, 10].

Ранее с целью удешевления процесса вулканизации [9, 11, 12], была предпринята попытка замены вулканизирующих агентов металлоотходами от производства синтеза N-метиланилина. Металлосодержащий отход использовался как вулканизирующий агент для хлоропренового каучука и хлорсульфированного полиэтилена. Было показано, что полученные композиции структурированы, их физико-механические показатели близки к показателям характерным для стандартной композиции.

ПЕК содержит ценные компоненты, такие как Zn^{+2} , Ba^{+2} . В данной работе рекомендовано использовать ПЕК в качестве ингредиента полимерных композиции, а именно вулканизирующего компонента для хлоропренового каучука и хлорсульфированного полиэтилена (ХСПЭ). Поэтому в рецептуры на основе этих каучуков вводили ПЕК в дозировках от 10 до 30 м. ч.

Стандартная смесь на основе ХСПЭ имеет белый цвет, но при введении шлама становится коричневой.

Результаты исследования опытных вулканизатов показывают, что при дозировке 10 м. ч. шлама достигается необходимая степень сшивки полимера. Степень набухания в толуоле, четыреххлористом углероде, бензине остается в пределах характерной для стандартной композиции. Это указывает на целесообразность замены оксидов металлов на гальваносодержащий шлам. Для подтверждения этого были проведены исследования по оценке влияния гальваносодержащего шлама на физико-химические свойства вулканизатов в соответствии с ГОСТ 269—66 (СТЭВ 983-89) и ГОСТ 270—64.

При замене оксидов металлов прочность вулканизатов снижается на 8...10 % и остается в пределах допустимых значений для данных полимеров.

При увеличении содержания гальваносодержащего шлама относительное удлинение, эластичность уменьшаются, так как с увеличением содержания вулканизирующего агента увеличивается густота пространственной сетки и вулканизат становится твердым.

При содержании ПЕКа 10 м. ч., относительное удлинение увеличивается, а при дальнейшем увеличении содержания отхода — уменьшается. Прочность на растяжение, на раздир и эластичность уменьшаются. Это объясняется густотой вулканизационной сетки. При увеличении содержания ПЕКа происходит повышение концентрации поперечных связей, что подтверждается повышением твердости и небольшим уменьшением степени набухания. Однако при увеличении дозировки ПЕКа в хлоропреновый каучук физико-химические показатели уменьшаются незначительно и поэтому отход можно использовать как наполнитель для данного полимера.

Гидроизоляционная мастика. Современные темпы и огромный размах строительства в нашей стране требуют производства таких строительных материалов, которые соответствовали бы условиям эксплуатации в самых различных климатических районах, обеспечивая надежность и долговечность зданий и сооружений. Между тем, выпускаемые в настоящее время гидроизоляционные и кровельные материалы не отвечают этим условиям. До сих пор из всех видов строительных работ наименее механизированными являются кровельные и гидроизоляционные. Нефтяной битум по-прежнему является самым распространенным материалом для данных работ. Несмотря на все увеличивающееся производство битума дефицит его достигает более 20 % в целом по стране [8]. Исходя из химического состава ПЕКа была произведена замена части битума на данные отходы при производстве кровельных и гидроизоляционных работ. Известны холодные мастики, представляющие собой смесь битума 90/40, извести-пушонки, асбеста и солярового масла. Данная мастика хорошо склеивает битумные рулонные материалы между собой и приклеивает их к оштукатуренному основанию [13, 14]. Предложено заменять известь, асбест, соляровое масло на ПЕК. Проведены исследования оценки влияния вводимого ПЕКа на физико-химические свойства мастики в соответствии с ГОСТ 26589—94.

При частичной замене битума на ПЕК свойства мастики изменяются незначительно. Физико-механические свойства у мастики с содержанием ПЕКа 20 % удовлетворительные.

Теплостойкость, температура размягчения, водопоглощение, условная вязкость, жизнеспособность такие же, как и у стандартной мастики, а температура хрупкости, прочность сцепления и относительное удлинение превосходят показатели для нее.

Несмотря на увеличивающийся ассортимент выпускаемых полимерных материалов подобного назначения, его доля остается преобладающей. Стоимость полимерных гидроизоляционных мастик пока соизмерима или даже выше стоимости покрытий из битумных материалов. [15—17], поэтому сейчас широкое применение получили полимербитумные материалы.

Для проведения кровельных работ используют горячие полимербитумные материалы. Данные композиции представляют собой однородную смесь битума, наполнителя и полимерных добавок. Для получения полимербитумных композиций, отвечающих требованиям, предъявляемых к гидроизоляционным, необходимы: точная дозировка полимера и битума, их совместимость в технологическом процессе приготовления, невозможность деструкции полимера при термогидродинамической и механической обработке в среде горячего битума с температурой 100...200 °С, а также способность композиции сохранять однородность (при хранении и транспортировке). К таким материалам относится горячая резинобитумная композиция, представляющая собой однородный сплав изоляционного или строительного битума с резиновой крошкой и пластификатором [3—8, 13, 14, 18]. Количество компонентов для приготовления резинобитумной композиции подбирается с учетом ориентировочных соотношений (по ГОСТ 15836—79), в зависимости от требуемых свойств композиции и свойств, применяемых битумов.

Известен состав резинобитумной композиции, где была произведена замена части битума и ингредиентов на ПЕК. Проведены исследования для оценки влияния различного содержания ПЕКа на физико-механические свойства мастики: при замене в битуме наполнителя на ПЕК физико-механические свойства изменяются незначительно; лучшими свойствами обладает мастика с содержанием ПЕКа 15 % (табл. 1, 2).

Т а б л и ц а 1

Состав и свойства стандартной и предлагаемой мастик

Материалы, их состав и свойства	Стандартная мастика	Разработанная мастика
Битум, %	50...53	50
Известь-пушонка, %	18...17	—
Асбест, %	22...30	—
Соляровое масло, %	2...8	—
ПЕК, %	—	27...31
Кокс, %	—	19...20
Теплостойкость в течение 2 ч, °С, не менее	85	86
Температура размягчения по методу кольцо и шар, °С, не менее	95	95
Температура хрупкости, °С	35	42
Водопоглощение, за 24 ч, %	0,5	0,4
Прочность сцепления с основанием, МПа:		
с металлом	0,5	0,6
бетоном	0,5	0,6
Относительное удлинение при 20 °С, %	150	160
Условная вязкость, с	60...100	60...100
Время отверждения, сут.	1...3	0,5...1
Жизнеспособность, с	1...1,5	1...1,5

Т а б л и ц а 2

Состав и свойства резинобитумных композиций

Материалы, их состав и свойства	Стандартная мастика	Разработанная композиция
Битум, %	75	50
Резиновая крошка (ТУ 38-104-30-70), %	10	10
Наполнитель волокнистый	15	—
ПЕК	—	25
Кокс	—	15
Температура размягчения по КиШ, °С, не менее	65	75
Водонасыщенность за 24 ч, %	0,2	0,18
Водонепроницаемость максимальное давление за сутки, МПа	0,5	0,48
Температура хрупкости, °С, не более	–35	–43

Это объясняется тем, что в составе ПЕКа содержатся те же легкие масляные фракции, что и в битуме. При смешивании резиновой крошки с горячим битумом вследствие частичного поглощения масляных фракций она набухает. Нефтяной битум и резиновая крошка в процессе приготовления физически взаимодействуют друг с другом, в результате чего получается новый однородный материал, обладающий лучшими качествами, чем исходный битум: повышается температура размягчения смеси, снижается температура перехода в хрупкое состояние, увеличивается водонепроницаемость покрытия.

Переработка гальваношлама, не содержащего хром VI. В проводимом исследовании изучался шлам-концентрат сточных вод гальванопроизводства, на котором отсутствуют операции с использованием шестивалентного хрома. Следовательно, стадия обезвреживания растворов на основе пероксида Cr^{+6} в Cr^{+3} при обработке органическими соединениями исключается.

С целью выявления областей применения шлама-концентрата в качестве сырьевого источника, определялся химический состав и основные факторы, изменяющие его, включая вымываемость компонентов.

При растворении шлама в воде и высушивании при $t^\circ = 100^\circ\text{C}$ ионы тяжелых металлов остаются в осадке (97,9 % от исходной массы).

Поскольку одним из вариантов утилизации шлама, может быть использование его при приготовлении азотистых и фосфорных минеральных удобрений, то потребовалось изучение поведения осадка при растворении его в азотной и фосфорной кислотах.

Исследованиями установлено, что наибольшее растворение шлама происходит при содержании азотной кислоты 208 г/л и температуре 60°C . При минимальном (10,3 %) выходе нерастворимого шлама в нем содержатся соединения железа и алюминия. По всей вероятности, это ферриты и алюминаты. Остальная часть переходит в раствор в виде азотнокислого железа. В раствор также переходит 80...85 % находящихся в шламе соединений меди и хрома. В следующей серии опытов растворялись десятиграммовые навески высушенного шлама (при соотношении Т : Ж) в технической фосфорной кислоте, получаемой при разложении апатитов серной кислотой, которой пользуются при получении фосфоросодержащих минеральных удобрений. Образцы шлама растворяли 1 ч при температуре 30°C . После растворения шлам

промывали водой из расчета 10 г воды на 10 г исходного осадка, промытую часть высушивали при температуре 100 °С и взвешивали.

В результате выяснилось, что практически полное растворение шлама достигается при избыточном количестве фосфорной кислоты (1:10). Состав раствора стабилен во времени. В твердом остатке имеются незначительные количества соединений меди (менее 0,1 %) (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Характеристики растворимости шлама в воде

Номер пробы	Т:Ж*	Масса шлама после сушки, г	Выход шлама после растворения, %	Примечание
1	1:1	—	—	Паста
2	1:3	—	—	Паста
3	1:10	8,79	87,9	Жидкость
4	1:15	8,79	87,9	Жидкость

* Соотношение твердой и жидкой фаз

Далее изучалась термическая устойчивость рассматриваемого шлама с целью определения области его применения в строительной индустрии.

Анализируемые пробы шлама (массой 10 г) подвергались термической обработке в сушильном шкафу и муфельной печи при температурах 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 °С. Продолжительность термообработки при каждой температуре — 3 ч. После охлаждения пробы взвешивались и выяснялось, что потери масс не происходили. Это объясняется удалением химически связанной влаги, выгоранием органических соединений и разложением сульфатов. После термообработки шлам приобрел темно-красную окраску.

Для установления оптимального времени термообработки шлама пробы нагревались до температуры 600 °С (табл. 4). При этом фиксировалось изменение массы проб. Приведенные результаты свидетельствуют, что устойчивое состояние осадка достигается после 2 ч термообработки.

Т а б л и ц а 4

Данные термообработки шлама

Номер опыта	Продолжительность термообработки, ч	Потери массы пробы, %
1	0,5	8,8
2	1,0	18,4
3	2,0	23,9
4	3,0	24,9
5	4,0	23,8
6	5,0	23,7
7	6,0	23,8

Далее термообработанный шлам использовался в качестве неорганических добавок к строительной массе при получении различного облицовочного декоративного материала.

Положительные результаты позволили рекомендовать его в качестве альтернативного сырьевого источника в производстве облицовочных строительных материалов.

Вывод. На основе результатов проведенных исследований сформулированы следующие данные:

реагентным методом в очищенной воде не могут быть достигнуты нормативные значения концентраций ионов тяжелых металлов, так как 75...80 % их не участвует в осаждении; они входят в состав комплексных ионов, прочность которых обеспечивается тремя устойчивыми фонами рассматриваемой водной среды — катионным, анионным, органическим;

выявлена целесообразность обезвреживания ионов хрома (VI) балластными компонентами СОЖ; исследованы и определены оптимальные условия реакции восстановления хрома (VI) до ионов хрома (III);

разработаны способы переработки отработанных СОЖ, обезвреживания ионов хрома (VI) и утилизации гальваноконцентрата;

исключено образование отходов-осадков после очистки сточных вод, все загрязнители перерабатываются в сырьевой продукт — ПЕК, содержащий пластифицирующие вяжущие компоненты. Его применение: гидроизоляционный материал для кровли, автодорог, полигонов, бассейнов, пластифицирующая пигментная добавка в бетоны, кирпич, отделочную плитку;

в конце обработки фосфорной кислотой шлама (1:10) получается масса, устойчивая при хранении, которая может быть рекомендована в качестве микроудобрений для овощных культур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Москвичева Е. В. Ресурсосберегающие процессы как основа экологически чистых технологий гальванического хромирования из водных и неводных сред. М., 1998. С. 8—45.
2. Москвичев С. С. Разработка ресурсосберегающей технологии очистки сточных вод машиностроительных предприятий: дисс... канд. техн. наук. Волгоград, 2011. 156 с.
3. Пластификаторы и защитные агенты из нефтяного сырья / под ред. И. П. Лукашевича. М.: Химия, 1970. 125 с.
4. Блох Г. А. Органические ускорители вулканизации и вулканизирующие агенты. М.: Химия, 1978. 278 с.
5. Ронкин Г. М. Хлорсульфированный полиэтилен. М.: ЦНИТЭнефтехим, 1977. 312 с.
6. Догадкин Б. А. Химия эластомеров. М.: Химия, 1972. 253 с.
7. Хайкина Л. А. Разработка и исследование полимерных композиций, содержащих соединения, полученные на основе отработанных каталитических компонентов: автореф дисс... канд. техн. наук. Волгоград, 2002. 20 с.
8. Гунн Р. Б. Нефтяные битумы. М.: Стройиздат, 1989. 89 с.
9. Гончарова Т. В. Возможности расширения ассортимента материалов // Применение полимерных материалов в гидротехническом строительстве. Л.: Стройиздат, 1980. 123 с.
10. Манелис Б. Г. Переработка промышленных и бытовых отходов методом сверхадиабатического горения // Тез. докл. II Межд. конгресса по управлению отходами "Вейст-Тэк-2001". М., 2001. С. 416.
11. Голованчиков А. Б., Симонов Б. В. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии. Массообменные процессы. Ч. 4: учеб. пособие. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2001. 117 с.
12. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / Е. В. Аметистов, В. А. Григорьев и др.; под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
13. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / под ред. Г. М. Островского и др. СПб.: Профессионал. 4.2, 2006. 916 с.
14. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Изд. 7-е. М.: ГХИ, 1961. 831 с.
15. Технология гидроизоляционных материалов / под ред. И. В. Рыбьева. М.: Высшая школа, 1991. 121 с.
16. Попченко С. Н. Гидроизоляция сооружений и зданий. Л.: Стройиздат, 1981. 198 с.
17. Кисина А. М., Куценко В. И. Полимер-битумные кровельные и гидроизоляционные материалы. Л.: Стройиздат, 1983. 98 с.

18. Войтович В. А., Зеленцов А. С., Обыденный И. П. В XXI веке гальваношламы будут использовать, а не перерабатывать // Тез. докл. II Межд. конгресса по управлению отходами "Вейст-Тэк-2001". М., 2001. С. 464—468.

© Москвичева Е. В., Юрьев Ю. Ю., Батманов В. П., Приходченко А. В., Фомин А. А., 2016

Поступила в редакцию
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Области применения продукта переработки гальвано- и СОЖ-содержащих сточных вод / Е. В. Москвичева, Ю. Ю. Юрьев, В. П. Батманов, А. В. Приходченко, А. А. Фомин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 84—92.

Об авторах:

Москвичева Елена Викторовна — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Юрьев Юрий Юрьевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Батманов Виктор Павлович — д-р мед. наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, vbatmanov@mail.ru

Приходченко Анна Владимировна — старший преподаватель кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Фомин Алексей Александрович — магистрант кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

E. V. Moskvicheva, Yu. Yu. Yur'ev, V. P. Batmanov, A. V. Prikhodchenko, A. A. Fomin

APPLICATIONS AND PROCESSING GALVAN-COOLANT-CONTAINING WASTEWATER

The authors propose a fundamentally different from the known ones the method of neutralization of galvano-containing wastes that allows to use all the contained components with high technical and economic indicators. Waste generation after sewage purification is excluded, all pollutants are processed into raw product — PEK. The result of slime treatment with phosphoric acid is mass that is storage stable and can be recommended as micronutrients for vegetable crops.

PEK is used as waterproofing material for roofs, roads, testing areas, pools, plasticizing pigmented additives in concrete, bricks, decorative tile.

Key words: coolant, galvano-containing wastes, wastes, PEK, oil refinery wastes, bitumen, reducing agent, cleaning.

REFERENCES

1. Moskvicheva E. V. *Resursosberegayushchie protsessy kak osnova ekologicheskoi chistykh tekhnologii gal'vanicheskogo khromirovaniya iz vodnykh i nevodnykh sred* [Resource-saving processes as the basis of environmentally friendly technologies of galvanic chroming from aqueous and non-aqueous media]. Moscow, 1998. Pp. 8—45.
2. Moskvichev S. S. *Razrabotka resursosberegayushchei tekhnologii ochistki stochnykh vod mashinostroitel'nykh predpriyatii* [Development of resource-saving technology of treatment of sewage of machine-building enterprises. Cand. Eng. Sci. Diss.]. Volgograd, 2011. 156 p.
3. Lukashevich I. P. (ed.). *Plastifikatory i zashchitnye agenty iz neftyanogo syr'ya* [Plasticizers and protective factors from petroleum products]. Moscow, Khimiya Publ., 1970. 125 p.
4. Blokh G. A. *Organicheskie uskoriteli vulkanizatsii i vulkanizuyushchie agenty* [Organic vulcanization accelerators and curing agents]. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 278 p.

5. Ronkin G. M. *Khlorosul'firovannyi polietilen* [Chlorosulfonated polyethylene]. Moscow, TsNITEneftekhim, 1977. 312 p.
6. Dogadkin B. A. *Khimiya elastomerov* [Elastomer Chemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1972. 253 p.
7. Khaikina L. A. *Razrabotka i issledovanie polimernykh kompozitsii, sodержashchikh soedineniya, poluchennye na osnove otrabotannykh kataliticheskikh komponentov* [Development and research of polymer compounds containing compounds received on the basis of exhaust catalytic components. Cand. Eng. Sci. Diss.]. Volgograd, 2002. 20 p.
8. Gunn R. B. *Neftyanые bitumy* [Petroleum bitumen]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1989. 89 p.
9. Goncharova T. V. [Possibilities of expansion of the range of materials]. *Primenenie polimernykh materialov v gidrotekhnicheskoy stroitel'stve* [Use of polymeric materials in hydroengineering construction]. Leningrad, Stroiizdat Publ., 1980. 123 p.
10. Manelis B. G. [Recycling of industrial and household wastes by superadiabatic combustion method]. *Tez. dokl. II Mezhd. kongressa po upravleniyu otkhodami "Veist-Tek-2001"* [Thesis reports of II Int. Congress on the "Veist-Tek-2001" waste management]. Moscow, 2001. P. 416.
11. Golovanchikov A. B., Simonov B. V. *Primenenie EVM v khimicheskoy tekhnologii i ekologii. Massoobmennye protsessy. Ch. 4* [Use of the computer in chemical technology and ecology. Mass exchange processes. P. 4]. Volgograd, Volgograd State Technical University Publ., 2001. 117 p.
12. Ametistov E. V., Grigor'ev V. A. and other. *Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskii eksperiment: Spravochnik* [Heat and mass exchange. Chemical heat experiment: Reference book]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 512 p.
13. Ostrovskii G. M. (ed.). *Novyi spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologii* [New chemist and technologist's reference book. Processes and devices of chemical technologies]. Saint Petersburg, Professional. 4.2 Publ., 2006. 916 p.
14. Kasatkin A. G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Main processes and devices of chemical technology]. Moscow, GKhI Publ., 1961. 831 p.
15. Ryb'ev I. V. (ed.). *Tekhnologiya gidroizolyatsionnykh materialov* [Technology of waterproofing materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 121 p.
16. Popchenko S. N. *Gidroizolyatsiya sooruzhenii i zdaniy* [Waterproofing of constructions and buildings]. Leningrad, Stroiizdat Publ., 1981. 198 p.
17. Kisina A. M., Kutsenko V. I. *Polimer-bitumnye krovel'nye i gidroizolyatsionnye materialy* [Polymer-bitumen roofing and waterproofing materials]. Leningrad, Stroiizdat Publ., 1983. 98 p.
18. Voitovich V. A., Zelentsov A. S., Obyedennyi I. P. [In XXI century galvanic sludge will be used, but not recycled]. *Tez. dokl. II Mezhd. kongressa po upravleniyu otkhodami "Veist-Tek-2001"* [Thesis reports of II Int. Congress on the "Veist-Tek-2001" waste management]. Moscow, 2001. Pp. 464—468.

For citation:

Moskvicheva E. V., Yur'ev Yu. Yu., Batmanov V. P., Prikhodchenko A. V., Fomin A. A. [Applications and processing galvan-coolant-containing wastewater]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 84—92.

About authors

Moskvicheva Elena Viktorovna — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Yur'ev Yuri Yur'evich — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Batmanov Viktor Pavlovich — Doctor of Medical Science, Professor of Health and Safety in Construction and Municipal Services Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, vbatmanov@mail.ru

Prikhodchenko Anna Vladimirovna — Senior Lecturer of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Fomin Aleksei Aleksandrovich — Master's degree student of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

УДК 624.131.37: 624.131.542: 627.8 (470.45)

А. Н. Богомолов^{а, б}, О. Н. Вольская^а, В. В. Подтелков^а, И. В. Якименко^а

^а *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^б *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ ОСАДКОВ ЗЕМЛЯНЫХ И БЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ В ПЕРИОД СТРОИТЕЛЬСТВА И ВРЕМЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ВОЛГОГРАДСКОМ ГИДРОУЗЛЕ

При строительстве Волгоградского гидроузла и в период временной эксплуатации сооружений и их технологического оборудования велись широкие натурные наблюдения. Это дало возможность сделать по принятым конструкциям и способам работ практические выводы. Первый агрегат Волжской ГЭС дал ток в декабре 1958 г., а всю станцию сдали Правительственной комиссии в 1961 г. С тех пор ГЭС исправно работает. За 50 с лишним лет не случилось ни одной серьезной аварии ни на ГЭС, ни на шлюзах. Это результат, во-первых, высококачественного проекта и, во-вторых, принципиальной установки на высокое качество строительных и монтажных работ, о котором постоянно заботились главные инженеры строительства.

Освещение и анализ натурных исследований и наблюдений за осадками гидротехнических сооружений и фильтрации в них является практическим материалом, который позволяет не только изучать поведение сооружений, но и опытным путем подкорректировать проектные расчеты, решения и применяемые методы для их совершенствования.

К л ю ч е в ы е с л о в а: грунтовая плотина, глубинное водопонижение, бетонная плотина, нивелировочная марка, пьезометр, фильтрационный режим, контрольно-измерительная аппаратура.

В связи с уникальностью и огромным масштабом сооружений Волгоградского гидроузла, возводившихся на слабых, легко размываемых нескальных грунтах, а также с применением ряда облегченных и новых конструкций проводились их широкие натурные наблюдения и исследования [1—4].

Задачей одной части наблюдений и натурных исследований было получение материалов о фактическом состоянии и работе сооружений, в частности: осадков, наклонах сооружений, фильтрационного и гидравлического режимах водосбросных сооружений, размывах русла в нижнем бьефе.

Другой задачей было получение данных, необходимых для будущей эксплуатации сооружений и их основного оборудования.

В соответствии с этими задачами тематика исследовательских работ, выполненных на строительстве Волгоградского гидроузла, сводилась к наблюдениям за осадками земляных и бетонных сооружений и фильтрации в них.

Для наблюдений за осадками и наклонами отдельных секций бетонных сооружений в них заложили марки различных типов: боковые, поверхностные и трубы. В основании земляных плотин перед началом их намыва заложили плиты-марки, положение которых точно зафиксировали.

Марка представляет собой стальной цилиндр с полушарием, на которое ставится рейка с навинчивающейся крышкой (рис. 1). Марки, располагаемые на горизонтальных поверхностях, приваривались к анкерной вилке, которая заделывалась в бетон.

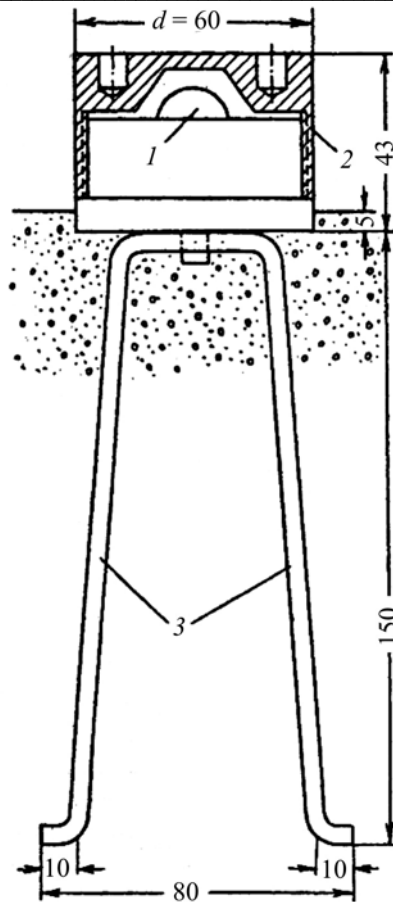


Рис. 1. Поверхностная нивелировочная марка: 1 — марка; 2 — крышка; 3 — анкерная вилка

При необходимости установить марку на вертикальной стенке (боковая марка) анкерная вилка заменялась швеллером или уголком. Если надо было определить осадку основания от нагрузки первого бетонного блока, марка приваривалась к арматурному стержню большого диаметра или к трубе, которые вертикально устанавливались непосредственно на бетонную подготовку (труба-марка). Полная осадка определялась путем нивелирования трубы-марки до и после бетонирования исследуемого блока.

В первое время после укладки бетона в нижний ярус фундаментных плит наблюдалась значительная интенсивность их осадок, достигавшая 1,3...1,8 мм/сут. В дальнейшем в течение 1...2 мес. интенсивность осадок уменьшалась до 0,4...0,5 мм/сут., а в последующем составляла в среднем около 0,1 мм/сут. В последние 2...3 мес. перед затоплением котлована в связи с постепенным прекращением работы глубинного водопонижения осадки затухали.

Непосредственно перед затоплением сооружений наблюдения перенесли с затапливаемых марок на фундаментных плитах на верхние незатапливаемые марки, что обеспечило непрерывность наблюдений (рис. 2).

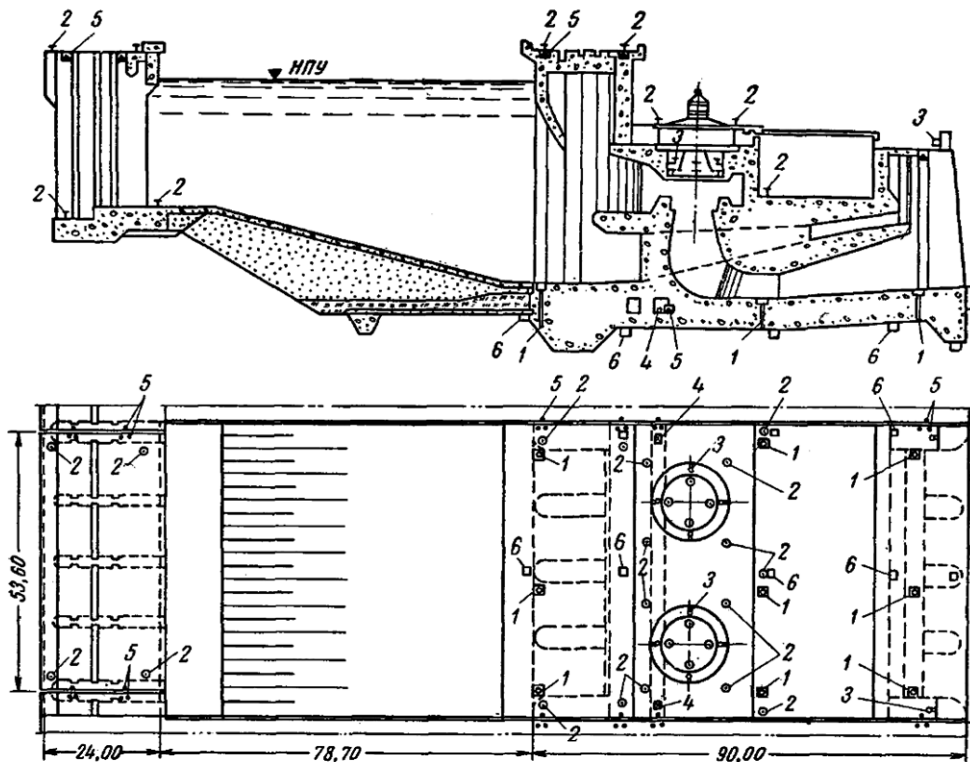


Рис. 2. Размещение контрольно-измерительной аппаратуры в здании гидроэлектростанции: 1 — труба-марка; 2 — поверхностная марка; 3 — боковая марка; 4 — визирный знак; 5 — группа марок щелемера; 6 — водоприемник пьезометра; 7 — плита-марка; 8 — марка; 9 — отвес

Осадки секций здания гидроэлектростанции в период затопления сооружений находились в пределах 4,0...4,5 см, что составило 35...40 % всех осадок к этому времени. Такая сравнительно большая осадка сооружений при их затоплении объясняется резкой пригрузкой сооружений и основания водой. При отметке подпорного уровня около 28 м по всем типовым секциям здания гидроэлектростанции средние осадки составили: по верхней грани — 14,8 см, по низовой — 12,6 см.

Во всех секциях здания гидроэлектростанции нивелированием обнаружили прогиб фундаментных плит вдоль сооружения. После окончания бетонирования основных массивных перекрытий здания и достижения его подводной частью значительной жесткости, прогиб фундаментных плит стабилизировался, достигнув в среднем 2,0...2,5 см.

По водосливной плотине глубина котлована была равна 16 м. В период наполнения водохранилища до навигационной отметки средние осадки по типовым секциям составили: по верхней грани — 10,3 см, по низовой — 8,9 см.

По данным замеров, осадка плит водобоя со времени их укладки до затопления составила около 5,0 см. За это же время водослив имел по низовой грани осадку в среднем около 4,0 см. Таким образом, разность осадок водослива и водобоя по линии их сопряжения была незначительна.

Для получения данных об осадках анкерного понура после его затопления и сопоставления их с осадками водосливной части плотины на основном бетоне заложили и занивелировали плиты-марки (рис. 3).

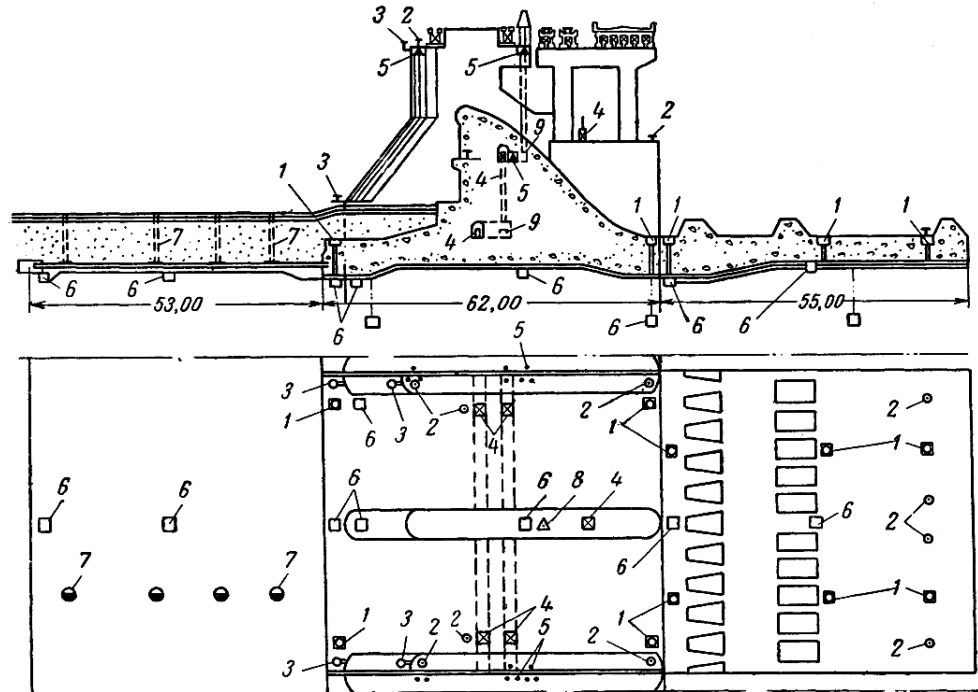


Рис. 3. Размещение контрольно-измерительной аппаратуры в водосливной плотине: 1 — труба-марка; 2 — поверхностная марка; 3 — боковая марка; 4 — визирный знак; 5 — группа марок щелемера; 6 — водоприемник пьезометра; 7 — плита-марка; 8 — марка; 9 — отвес

Непосредственно перед затоплением эти плиты были разбурены (через глинистую пригрузку и ее крепление).

После затопления сооружения плиты-марки с помощью водолазов вновь дважды занивелировали по плавучей рейке. Нивелирование показало, за 2 года наполнения водохранилища осадка понура составила около 7 см. Осадка водослива за этот же период составила по верхней грани в среднем 5,0 см. Таким образом, разность осадок понура и водослива составила всего около 2,0 см.

В котловане судоходного шлюза толщина вынутаго слоя грунта в пределах верхних голов и камер составляла 4...8 м, средних голов — 18 м и нижних камер и голов — 11...26 м.

В эксплуатационный период средние осадки по наружным граням типовых секций верхних камер составили 15,5 см, нижних камер — 13,0 см. Средние осадки голов составили: верхних — 16,0 см, средних — 17,5 см, нижних 11,0 и 15,0 см (рис. 4).

В течение всего периода наблюдений разность осадок смежных секций камер и примыкающих к ним голов находилась в основном в пределах 1,2 см. Наибольшая разность осадок секции камеры и головы составляла 3,0 см.

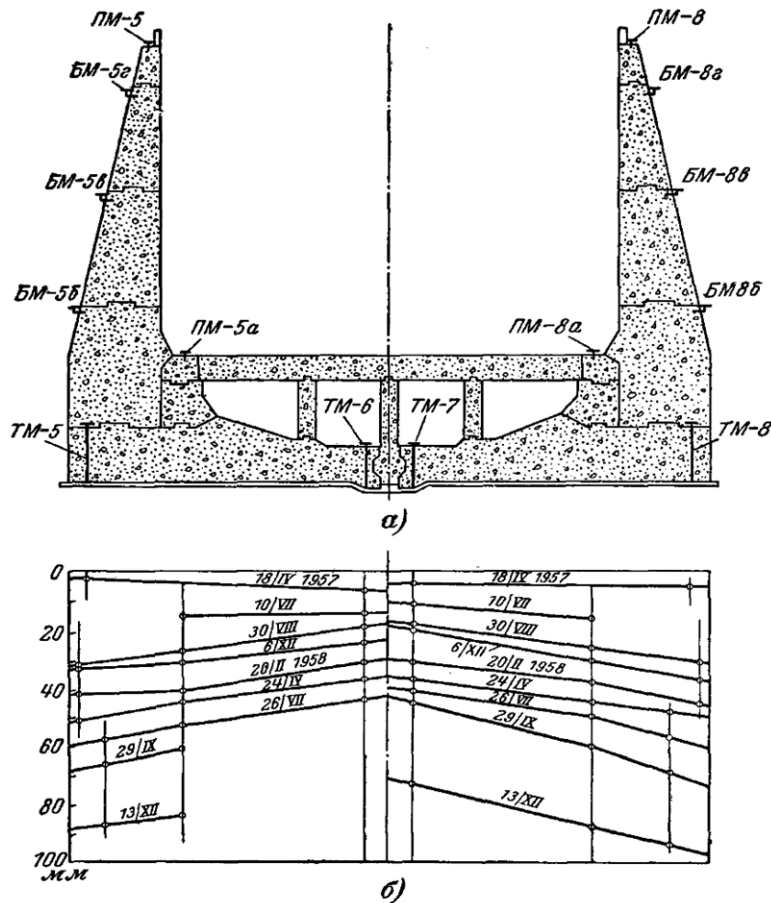


Рис. 4. Схема размещения высотных марок (а) и эпюра осадок секции № 6 верховой камеры правой нитки шлюза (б): ПМ — поверхностная марка; БМ — боковая марка; ТМ — труба-марка

Как на здании гидроэлектростанции, так и на водосливной плотине и судоходном шлюзе отмечались большая интенсивность осадок в начальный период обжатия основания после бетонирования первых ярусов фундаментных плит, уменьшение осадок по прекращении глубинного водопонижения, резкие осадки секций сооружений при их затоплении.

Кроме того, на шлюзе наблюдалась ежегодная осадка камер при их затоплении весной — в среднем на 1,7...1,8 см по верхним и на 0,5...0,6 см — по нижним камерам, а также подъем их при осушении по окончании навигации в среднем на 0,5...1,0 см.

Осадка земляных сооружений и их оснований определялась нивелировкой поверхностных реперов-марок (рис. 5) и глубинных плит-марок (рис. 6), причем первые давали полную осадку, вторые — осадку основания, а их разность — осадку самого тела плотины. Железобетонные плиты, являющиеся основной деталью глубинной плиты-марки, укладывались на основании сооружения до его возведения, нивелировались и засекались в плане.

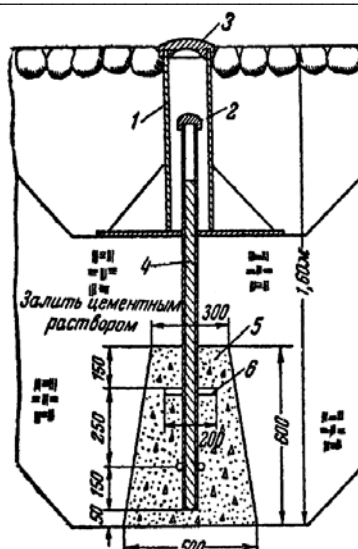


Рис. 5. Поверхностный репер-марка для земляных плотин: 1 — труба $d = 152,4$ мм, $l = 600$ мм; 2 — марка; 3 — крышка; 4 — труба $d = 26,7$ мм; 5 — бетонная призма; 6 — коротыш

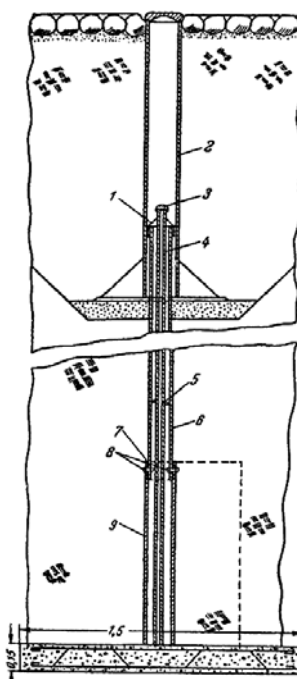


Рис. 6. Глубинная плита-марка: 1 — центрирующая крышка; 2 — труба $d = 21,25$ мм, $l = 1500$ мм; 3 — марка; 4 — труба $d = 25,4$ мм (штанга репера); 5 — направляющий диск; 6 — труба $d = 101,6$ мм (длина по месту); 7 — вкладное кольцо из листовой стали; 8 — свинцовые заклепки, 4 шт., $d = 12$ мм; 9 — труба $d = 228,6$ мм

После окончания работ их положение определялось по засечкам, и вся конструкция для наблюдений монтировалась в буровой скважине (при проектировании желательно избегать закладки плит непосредственно под гребнем, так как это задерживает бурение до полного оформления гребня).

Основным типом пьезометра для грунтовых плотин русловой и пойменной участков явился так называемый пьезометр, установленный в буровых скважинах с обсыпкой их крупнозернистым песком. Замеры уровней воды в трубах малого диаметра (25 мм) достаточно легко и просто производились обычными лотами-«свистками» или специальными электроконтактными приборами.

В строительный период, до выполнения предусмотренного по проекту дренажа, на русловом участке земляной плотины и в некоторых местах пойменных участков имелись выходы фильтрационных вод из банкета и низовой части откосов. При обнаружении в зонах выхода фильтрационного потока выноса грунта эти зоны покрывали временными двухслойными обратными фильтрами из каменной крошки крупностью 1...10 мм и щебня 40...80 мм.

После устройства дренажа в условиях стабильных уровней верхнего и нижнего бьефов, равных соответственно 28,5 и 5,6 м, условия пространственной фильтрации через русловый участок плотины никак не превышал 0,3...0,4 м.

В русловом участке плотины на контакте ее тела с песчано-алевритовыми породами дна Волги пьезометрические уровни в пределах низового клина примерно на 0,5 м ниже, чем в теле плотины, а под этими же породами на глубине 15 м от подошвы плотины превышают уровни в теле плотины не более чем на 6 м. Это свидетельствует о нормальной фильтрации по контакту тела плотины с основанием и отсутствии отрицательного влияния нижних напорных горизонтов на фильтрацию через тело плотины (рис. 7).

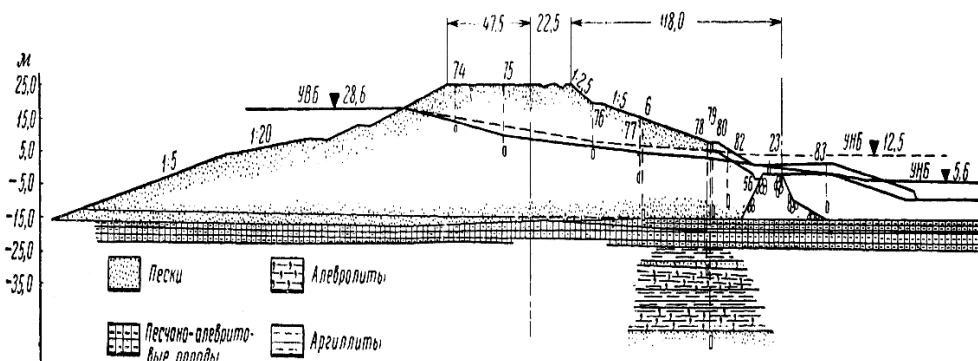


Рис. 7. Профиль по пьезометрическому створу руслового участка плотины: 74, 75 и т. д. — номер пьезометра

На пойменных участках плотины основные наблюдения вели за уровнями фильтрационных вод в нижнем бьефе, где в песчаных русловых отложениях залегает большое количество прослоек и линз связных грунтов, препятствующих свободному равномерному выходу грунтовых вод, вызывающих образование местных сосредоточенных выходов (типа грифонов) и способствующих заболачиванию территории ниже плотины.

По данным пьезометрических наблюдений, отдел исследований Гидропроекта уточнял на месте расположение и число разгрузочных скважин, намеченных в проекте. Фильтрационные расходы дренажа, измеренные на пойменных участках плотины в колодцах, были немного ниже рассчитанных в проекте и составляли: удельные расходы — от 0,1 до 0,4 л/с на 1 пог. м, полные — около 0,5 м³/с.

Заметный эффект в отношении сохранности аппаратуры дала, в частности, ее сигнальная яркокрасная окраска. Применение в пьезометрах пластмассовых водоприемников значительно повысило срок службы.

Материалы наблюдений обрабатывал на месте отдел исследований, что позволяло оперативно принимать инженерные решения по вопросам замоноличивания отдельных блоков, выбора схем маневрирования затворами и т. п.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров А. П. Этапы строительства Сталинградской гидроэлектростанции // Гидротехническое строительство. 1961. № 10.
2. Александров А. П., Кузнецов А. Я. Строительство Сталинградской гидроэлектростанции // Энергетическое строительство. 1961. № 21.
3. Абрамов Ю. С., Емельянов Ф. И. Земляные работы на строительстве Сталинградской ГЭС // Материалы к техническому отчету о строительстве Сталинградской гидроэлектростанции. М.: Гидропроект, 1961. С. 119.
4. Волжская гидроэлектростанция имени съезда КПСС. Альбом чертежей. М.: Госэнергоиздат, 1963.

© Богомолов А. Н., Вольская О. Н., Подтелков В. В., Якименко И. В., 2016

Поступила в редакцию
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Опыт проведения натурных наблюдений и исследований осадков земляных и бетонных сооружений в период строительства и временной эксплуатации на Волгоградском гидроузле / А. Н. Богомолов, О. Н. Вольская, В. В. Подтелков, И. В. Якименко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 93—102.

Об авторах:

Богомолов Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; проф. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, banzaritcyn@mail.ru

Вольская Ольга Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, olgavolska@mail.ru

Подтелков Василий Владимирович — кандидат техн. наук, докторант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Якименко Игорь Валерьевич — соискатель кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1.

A. N. Bogomolov, O. N. Vol'skaya, V. V. Podtelkov, I. V. Yakimenko

EXPERIENCE OF FIELD STUDIES AND RESEARCHES OF SUBSIDENCE OF EARTHWORK AND CONCRETE STRUCTURES DURING CONSTRUCTION AND TEMPORARY OPERATION IN THE VOLGOGRAD HYDROELECTRIC STATION DAM

During the construction of the Volgograd hydroelectric station dam and in the period of temporary operation of buildings and their technological equipment widespread field studies were conducted. This gave the opportunity to make practical conclusions concerning the accepted structures

and methods of work. The first unit of the Volga hydroelectric power station supplied power in December 1958, and the entire station was handed over by the Government Commission in 1961. Since then the hydroelectric power station works correctly. In 50 odd years not a single serious accident happened on the station, or at the gateways. It is the result, firstly, of the high quality of the project and, secondly, the high quality of construction and installation works, that chief engineers constantly took care of.

Coverage and analysis of the field studies and observations of subsidence of waterworks and their filtering is practical data which allows not only to study the behavior of structures, but also to correct designed calculations, decisions and applied methods for their improvement.

Key words: earth dam, deep dewatering, concrete dam, height adjustment mark, piezometer, filtration, instrumentation.

REFERENCES

1. Aleksandrov A. P. [Stages of construction of the Stalingrad hydroelectric power station]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydroengineering construction], 1961, no. 10.
2. Aleksandrov A. P., Kuznetsov A. Ya. [Construction of the Stalingrad hydroelectric power station]. *Energeticheskoe stroitel'stvo* [Energy construction], 1961, no. 21.
3. Abramov Yu. S., Emel'yanov F. I. [Earthwork at the construction of the Stalingrad hydroelectric power station]. *Materialy k tekhnicheskomu otcetu o stroitel'stve Stalingskoi gidroelektrostantsii* [Proc. for the technical report on the construction of the Stalingrad hydroelectric power station]. Moscow, Gidroproekt Publ., 1961. P. 119.
4. *Volzhskaya gidroelektrostantsiya imeni s"ezda KPSS. Al'bom chertezhei* [The Volga hydroelectric power station named after the CPSU congress. Album of drawings]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1963.

For citation:

Bogomolov A. N., Vol'skaya O. N., Podtelkov V. V., Yakimenko I. V. [Experience of field studies and researches of subsidence of earthwork and concrete structures during construction and temporary operation in the Volgograd hydroelectric station dam]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 93—102.

About authors:

Bogomolov Aleksandr Nikolaevich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Vice-Rector for Scientific Research, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation; Professor of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University. 29, Komsomolskii Prospekt, Perm', 614990, Russian Federation, banzaritcyn@mail.ru

Vol'skaya Ol'ga Nikolaevna — Candidate of Engineering Science, Docent of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, olgavolska@mail.ru

Podtelkov Vasilii Vladimirovich — Candidate of Engineering Science, Doctoral student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, z_genrih@mail.ru

Yakimenko Igor' Valer'evich — Postgraduate degree seeker of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК: 556.16//45/(282/247/41)

С. М. Мусаелян, Е. В. Щекочихина, О. Н. Вольская, Ю. И. Олянский

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

**ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС И НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДЕКЛАРАЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ
СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ГИДРОУЗЛА**

Проведенный анализ показал, что аварийность на ГТС в России в 2,5 раза превышает среднемировой уровень. Прослеживается тенденция старения сооружений. Причиной аварий на напорных ГТС в основном являются: низкий уровень эксплуатации (45 %); неправильная оценка паводков (20 %); дефекты строителей (25 %); ошибки проектировщиков (10 %). Из них наиболее детально рассмотрена проблема переоценки пропуска максимальных катастрофических расходов через напорные ГТС.

К л ю ч е в ы е с л о в а: водохозяйственный комплекс, гидроузел, гидротехнические сооружения.

В нашей стране создан и функционирует мощный водохозяйственный комплекс. Его основу составляют 65 тыс. объектов гидротехнического назначения, 36 тыс. водозаборных и сбросных сооружений, около 10 тыс. км защитных дамб и водооградительных валов, 29 тыс. водохранилищ, прудов, накопителей жидких отходов с напорными гидротехническими сооружениями (табл.).

Комплекс гидротехнических сооружений России	Напорные ГТС	Безнапорные ГТС, водозаборы	Безнапорные водосбросы	Закрытые дамбы, водооградительные валы, км
	29 388	11 218	25 262	10 000

Из приведенного выше общего количества напорных ГТС, поднадзорных МПР России, 2900 (около 10 %) имеют срок эксплуатации до 10 лет, 5757 (около 20 %) — 10...30 лет, 14500 (около 50 %) — более 30 лет, а для 6240 (20 %) сооружений, имеющих износ 80 % и более, срок ввода в эксплуатацию не установлен.

По статистическим данным на начало 2009 г. в Волгоградской области имелись 6718 гидротехнических сооружений, поднадзорных Министерству природных ресурсов (МПР) России, из которых в Волжском бассейне — 742 (около 11 %). Общая протяженность береговых полос водных объектов составляет 21 620 км. Площадь водоохранных зон рек, водохранилищ и озер составляет 637,1 тыс. га, прибрежных защитных полос — 43,2 тыс. га. Имеющиеся 75 проектов водоохранных зон, разработанных в 1983—1991 гг., требуют коренной корректировки, так как не отражают современное состояние водохозяйственной обстановки и не соответствуют требованиям действующих нормативно-методических документов по проектированию водоохранных и водохозяйственных зон.

Хотя в целом состояние водоохранных зон на большинстве водных объектов на территории области удовлетворительное, вместе с тем нельзя признать удовлетворительным санитарное состояние этих зон на территориях городов Волгоград, Волжский, Камышин, других городских и сельских населенных пунктов. Более того, в связи с отсутствием генеральных планов и проектов развития многих городов области, водоохранные зоны для них до настоящего времени не определены.

Режим хозяйственной деятельности в водоохранных зонах и их прибрежных защитных полосах на значительной части водных объектов не соблюдается из-за наличия на их территории выпусков сточных вод, объектов жилищно-гражданского и производственного назначения, включая животноводческие постройки; складов минеральных удобрений и горючесмазочных материалов; мест складирования и захоронения промышленных, бытовых и сельскохозяйственных отходов.

Негативное воздействие оказывают обрушение берегов водных объектов, недостаточная площадь залужения и облесения земель в водоохранных зонах и их прибрежных полосах.

Из указанных выше 7618 ГТС в федеральной собственности находятся выше 15, субъектов РФ — 29, негосударственной собственности — 686 (около 10 %), остальные — бесхозные (около 90 %). По состоянию эксплуатации: удовлетворительное — 75 (0,01 %), требуют капитального ремонта — 650 (около 10 %), требуют реконструкции — всего 12 (0,002 %), подлежат ликвидации всего 5. По остальным сведений нет. Из указанного общего количества ГТС имеют декларацию безопасности всего 14, подлежат декларированию 75, не имеют декларацию безопасности 61. По остальным опять сведений нет. Отметим, что органом надзора за безопасностью эксплуатации ГТС является Росприроднадзор по Волгоградской области.

Аварийность на ГТС в России в 2,5 раза превышает среднемировой уровень (1 авария на 1000 сооружений с тяжелыми последствиями). Прослеживается тенденция старения гидротехнических сооружений. Большинство малых гидроузлов были построены, в основном, хозяйственным способом, без проектно-сметной документации, с низким качеством. Они предназначались для нужд сельскохозяйственных предприятий, которые в настоящее время не могут обеспечить поддержание их в технически исправном состоянии. Для данного класса ГТС по условиям обеспечения безопасности срок эксплуатации 30 и более лет является критическим (таких сооружений в системе МПР России более 50 %).

Условия пропуска максимального стока воды рек в существенной мере определяют уровень безопасности эксплуатации гидроузлов. Методы расчетов таких расходов, которые могут пропускать различные сооружения, достаточно хорошо разработаны и освещены в отечественной гидрологической науке [1—5].

Для водосливов и трубчатых водосбросов погрешность определения пропускной способности составляет не более 5 %. Тем не менее аварии плотин, связанные с недостаточной пропускной способностью сооружений гидроузлов, является одними из наиболее распространенных (около 25 % всех аварий).

Из общего числа аварий плотин соответствующих типов в связи с переливом через гребень разрушается 25 % плотин из грунтовых материалов и 12 % бетонных плотин. Перелив воды через гребень плотины, связанный с недостаточной пропускной способностью, может быть обусловлен следующими причинами:

необходимостью пропуска паводков с расходами больше расчетных;

отказом гидромеханического оборудования;

недостаточным запасом высоты гребня плотины над уровнем верхнего бьефа;

ошибками при проектировании или эксплуатации водопропускных сооружений.

Из литературы известно, что имели место пропуски максимальных расходов, значительно превышающих расчетные. Так, на гравитационной плотине Зербино (Италия) высотой 16,5 м, построенной в 1924 г., максимальный сбросной расход составлял $700 \text{ м}^3/\text{с}$ при расчетном $400 \text{ м}^3/\text{с}$. Более того, расходы притока в августе 1935 г. достигли $2200 \text{ м}^3/\text{с}$ (повторяемость 1 раз в 200 000 лет) и переливающимся через плотину слоем воды толщиной до 2,2 м; основание со стороны нижнего бьефа было размывто на глубину 20 м. Последующее разрушение плотины привело к гибели 130 человек и большим финансовым потерям. На гидроузле с контрфорсной плотиной Ринкондель-Боннет (Уругвай) в 1959 г. был зафиксирован расход повторяемостью 1 раз в 500 000 лет.

Разрушение Киселевской грунтовой плотины в 1993 г. в России привело к гибели 15 человек и большим материальным ущербом. Авария на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г. привело к гибели 71 человека и колоссальным материальным ущербам.

Часто причиной перелива воды через гребень глухих плотин и разрушений является отказ механического оборудования гидроузлов (гидроузел Мачху в Индии, затопление г. Морва и 68 деревень, погибло 2000 человек). Нередко случаи, когда во время пропуска максимального стока не удается во время открыть затворы; водосбросные отверстия забиваются плавающими телами: арочно-гравитационная плотина Палаг в Швейцарии, где в 1987 г. поток транспортировал к плотине большое количество бревен и обломков леса, которые забились отверстия плотины и вызвали перелив воды через гребень плотины, вследствие чего образовавшаяся воронка за плотиной привела к угрозе потери ее устойчивости.

После паводков малой обеспеченности даже в тех случаях, когда они не приводят к аварии в связи с переливом через гребень плотины, появляется необходимость пересмотра гидрологического ряда и расчетных расходов. Можно привести много примеров гидроузлов, на которых расчетные расходы уточнялись в периоды строительства и эксплуатации. Так, на гидроузле Оуэд-Эль-Макхазин (Марокко) расчетные расходы строительного и эксплуатационного периодов, определенные по девятилетнему ряду наблюдений, составляли 2100 и $3500 \text{ м}^3/\text{с}$. Уже во время строительства был зафиксирован паводок с расходом $3500 \text{ м}^3/\text{с}$, что дало основание к пересмотру значений расчетного расхода; уточненное его значение было получено равным $8600 \text{ м}^3/\text{с}$.

К сожалению, пересмотр расчетных расходов в РФ осуществляется нерегулярно даже для достаточно крупных гидроузлов, что связано с двумя обстоятельствами:

1. На большей части территории России последние десять-пятнадцать лет были относительно маловодными и на большинстве водосбросов пропускались расходы существенно меньше расчетных. Лишь в последние годы наблюдались значительные наводнения на юге России: в Краснодарском крае и Калмыкии.

2. Требования отечественных нормативных документов по назначению расчетных расходов уже длительное время, по крайней мере более 40 лет, являются достаточно высокими.

В связи с тем что значительная часть гидроузлов РФ эксплуатируется уже длительное время (30...40 лет), назрела необходимость проверки значений расчетных расходов с учетом увеличения рядов гидрологических наблюдений и изменившихся условий эксплуатации. Такая проверка своевременна в связи с выходом в 1997 г. Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» и необходимостью составления для них деклараций безопасности. Проверка тем более актуальна, что зарубежные нормы по определению расчетных расходов, особенно принятые в США, в последнее время существенно ужесточились.

Недостаточная пропускная способность сооружений гидроузлов, обнаруженная при анализе более полных гидрологических данных или при изменении условий эксплуатации, приводит к необходимости осуществления режимных или конструктивных мероприятий для уменьшения сбросных расходов или увеличения пропускной способности.

Наиболее кардинальным мероприятием по увеличению пропускной способности действующего гидроузла является реконструкция водосбросных сооружений. Реконструкция производится, как правило, не менее чем через 25...30 лет эксплуатации гидроузла и соответствующего износа сооружений, после их разрушения или после прохождения паводков малой обеспеченности, приведших к изменению расчетных расходов. Значительное внимание вопросам реконструкции для повышения пропускной способности на ряде конгрессов и симпозиумов уделяет Международный комитет по большим плотинам.

Рекомендации сводятся к следующему:

1. Как правило, при реконструкции водосбросов в качестве расчетных принимаются расходы обеспеченностью не более 0,1...0,01 %.

2. В составе гидроузлов с грунтовыми плотинами для обеспечения пропуска увеличенных расходов чаще всего предусматриваются устройство дополнительных водосбросов.

3. Для гидроузлов с грунтовыми плотинами выше 40 м в качестве дополнительных, как правило, используют туннельные водосбросы.

4. В составе гидроузлов с бетонными плотинами для пропуска увеличенных расходов большей частью предусматриваются повышение напора на входе в водосброс.

При составлении декларации безопасности оценка пропускной способности гидроузла должна быть составной частью раздела, посвященного анализу опасностей и риска. При оценке риска аварий, связанных с недостаточной

пропускной способностью и ее ограничениями по условиям работы самих водопропускных сооружений и примыкающих к гидроузлу участкам бьефов, необходимо учитывать следующее:

1. Соответствие обеспеченности расчетных расходов гидроузла его классу, в том числе с учетом условий его работы, с другими хозяйственными объектами.

2. Значения расчетных сбросных расходов с учетом данных гидрологических и метеорологических наблюдений, проведенных в период эксплуатации гидроузла. Корректировку этих расходов желательно проводить не реже 1 раза в 10 лет для гидроузлов I и II класса, в проект которых заложена более низкая обеспеченность расчетных расходов, и не реже 1 раза в 5 лет для всех других гидроузлов, а также после каждого паводка с расходом, близким к расчетному.

3. Соответствие пропускной способности сооружений гидроузла, определенной на основе проекта, лабораторных или натурных данных, расчетным значениям расходов при надлежащих уровнях верхнего бьефа.

4. Работоспособность механического оборудования водопропускных сооружений, включая необходимость дублирования системы его электропитания.

5. Готовность тракта водопропускных и водобойных устройств к пропуску расчетных расходов, обеспечивающая предотвращение опасного развития кавитационного и абразивного износа, значительных гидродинамических нагрузок.

6. Состояние дна и берегов на примыкающих к плотине участках верхнего и нижнего бьефов, которое может повлиять на условия безопасности сооружений при пропуске паводковых расходов (развитие местных размывов и понижение уровней воды в нижнем бьефе, наличие плавающих тел, заиление водохранилища).

7. Ограничение пропускной способности по условиям затопления территорий в бьефах гидроузлов.

Немаловажен факт также о надежности исходных гидрометрических данных, которые служат для определения максимального сбросного расхода 0,01% -ной обеспеченности. Надежность рассчитанных максимальных расходов зависит прежде всего от качества исходных гидрометрических данных. Так, например, если верхняя часть кривой расходов $Q = Q(H)$ хорошо обоснована измерениями или надежна экстраполирована; частота наблюдений обеспечивает регистрацию высшего уровня (расхода) за период половодья или паводка; в ряде наблюдений имеются годы с выдающимися максимумами; ряд наблюдений включает полные циклы водности; продолжительность периода наблюдений для различных зон составляет: лесотундра и лесная — не менее 25 лет, лесостепная — 30 лет, степная — 40 лет, сухостепная и полупустынная — 50 лет, для горных районов — 40 лет.

Если период наблюдений менее указанных значений, результаты расчетов должны быть проанализированы с использованием материалов по рекам-аналогам. При этом параметрам кривой обеспеченности ($\bar{Q}$, C_v , C_s) короткого ряда не должны отличаться от таких же параметров длинного ряда реки-аналога не более чем на 10...15 %. Если же ряд нерепрезентативный, то необходимо применять способ приведения, используя пункты-аналоги.

Для практических целей оценка продолжительности имеющегося ряда наблюдений, достаточного для проведения расчетов, может быть произведена по приближенной зависимости

$$N_{\min} \approx \frac{1}{P_{\%} K_{C_v}},$$

где $N_{\min}$ — минимальная длина ряда, годы; $P_{\%}$ — вероятность превышения (в долях единицы) вычисляемого расхода воды; $K_{C_v} = 2 \dots 3$ в зависимости от коэффициента вариации ($K_{C_v} = 2$ при $C_v = 0,5$ и $K_{C_v} = 3$ при $C_v = 0,5$).

Расчетные максимальные расходы талых и дождевых вод (как и другие расчетные характеристики стока) при наличии данных гидрометрических наблюдений находят с помощью аналитических кривых обеспеченности. Для расчетов используется, как правило, кривые трехпараметрического гамма-распределения, а при достаточном обосновании — биномиальная кривая обеспеченности (при $C_s > 2C_v$).

Расчетный максимальный расход Q_p обеспеченностью $P = 0,01 \%$, при проектировании гидротехнических сооружений I класса необходимо увеличивать на значение гарантийной поправки ΔQ_p , т. е. в гидравлические формулы вводится расход $Q_p + \Delta Q_p$. ΔQ_p вычисляется по формуле С. И. Крицкого и М. Ф. Менкеля:

$$\Delta Q_p = \frac{\alpha E_p}{\sqrt{N}} Q_p,$$

где α — коэффициент, характеризующий гидрологическую изученность рек данной территории (для изученных территорий $\alpha = 1$, слабоизученных $\alpha = 1,5$); N — число лет наблюдений; E_p — величина, характеризующая случайную среднюю квадратичную погрешность расчетного расхода воды, вычисляемая по формуле

$$E_p = \delta_{Q_p} \sqrt{\frac{N}{Q_{\max}}},$$

где δ_{Q_p} — среднеквадратическая ошибка определения расчетного максимального расхода; $Q_{\max}$ — максимальный (наибольший) расход из ряда наблюдений; ΔQ_p не должен превышать 20 % ΔQ_p .

В конце приведем некоторые данные по делению максимальных расходов воды с учетом особо выдающихся максимальных расходов (так называемых «исторических» или «экстремальных»).

При этом возможны два случая:

1. При учете выдающегося максимума расхода, не входящего в непрерывный n -летний ряд данных гидрометрических наблюдений.
2. Выдающийся исторический максимум Q_N , который входит в имеющийся n -летний ряд.

Параметры аналитической кривой обеспеченности вычисляют следующим образом.

При первом случае:

$$\bar{Q} = \frac{1}{N_{n'}} \left(Q_{N'} + \frac{N' - 1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \right);$$

$$C_V = \sqrt{\frac{1}{N'} \left[\left(\frac{Q_{N'}}{Q} - 1 \right)^2 + \frac{N' - 1}{n - 1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{Q} - 1 \right)^2 \right]};$$

при втором случае:

$$\bar{Q} = \frac{1}{N'} \left(Q_{N'} + \frac{N' - 1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \right);$$

$$C_V = \sqrt{\frac{1}{N'} \left[\left(\frac{Q_{N'}}{Q} - 1 \right)^2 + \frac{N' - 1}{n - 2} \sum_{i=1}^{n-2} \left(\frac{Q_i}{Q} - 1 \right)^2 \right]},$$

где $Q_{N'}$ — экстремальный расход, установленный по историческим данным (обычно по оставленным следам или опросу старожилов); N' — продолжительность периода, в течение которого $Q_{N'}$ является наибольшим ($N' > n$); n — продолжительность периода наблюдений.

Анализ накопленных материалов показал, что учет выдающихся максимальных расходов воды при определении расчетного расхода существенно повышает надежность расчетов. По мере накопления данных гидрологических наблюдений придется постоянно повышать величину наибольшего максимального расхода воды, зарегистрированного при наблюдениях в данном пункте. Это приводит к необходимости пересмотра максимального катастрофического сбросного расхода из гидроузлов в сторону его увеличения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 444 с.
2. Международное руководство по методам расчета основных гидрогеологических характеристик. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 247 с.
3. Железняков Г. В., Овчаров Е. Е. Инженерная гидрология и регулирование стока. М.: Колос, 1993. 464 с.
4. Мусаелян С. М. Определение расчетных максимальных расходов воды при проектировании гидротехнических и дорожных водопропускных сооружений: методические указания к курсовому и дипломному проектированию. Волгоград: ВолгГАСА, 2003. 47 с.
5. Мусаелян С. М. Инженерная гидрология: учебное пособие. Волгоград: ВолгГАСУ, 2006. 290 с.

© Мусаелян С. М., Щекочихина Е. В., Вольская О. Н., Олянский Ю. И., 2016

Поступила в редакцию
в марте 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Водохозяйственный комплекс и некоторые аспекты совершенствования декларации безопасности гидротехнических сооружений с учетом пропускной способности гидроузла / С. М. Мусаелян, Е. В. Щекочихина, О. Н. Вольская, Ю. И. Олянский // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 103—110.

Об авторах:

Мусаелян Саркис Мовсесович — д-р техн. наук, проф., проф. кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Щекоцихина Евгения Викторовна — канд. геол.-минерал. наук, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, karnat.1@yandex.ru

Вольская Ольга Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, olgavolska@mail.ru

Олянский Юрий Иванович — д-р геол.-минерал. наук, доц., проф. кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, olyansk@list.ru

S. M. Musaelyan, E. V. Shchekochikhina, O. N. Vol'skaya, Yu. I. Olyanskii

WATER MANAGEMENT SYSTEM AND SOME ASPECTS OF IMPROVEMENT OF SAFETY DECLARATION OF WATERWORKS WITH ACCOUNT OF CAPACITY OF WATERWORKS FACILITY

The analysis showed that the accident rate on GTS in Russia is 2.5 times exceeds the world average one. The tendency of aging of the facilities is observed. The causes of accidents on pressure GTS are mainly low level of exploitation (45 %); incorrect assessment of flooding (20 %); construction defects (25 %); designers' errors (10 %). Of these, the problem of revaluation of passes of maximum catastrophic expenditures through pressure GTS is considered in detail.

Key words: water management system, waterworks facility, waterworks.

REFERENCES

1. *Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Manual on determination of estimated hydrological characteristics]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 444 p.
2. *Mezhdunarodnoe rukovodstvo po metodam rascheta osnovnykh gidrogeologicheskikh kharakteristik* [Guideline on the methods of calculation of main hydrogeological characteristics]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 247 p.
3. Zheleznyakov G. V., Ovcharov E. E. *Inzhenernaya gidrologiya i regulirovanie stoka* [Engineering hydrology and discharge regulation]. Moscow, Kolos Publ., 1993. 464 p.
4. Musaelyan S. M. *Opredelenie raschetnykh maksimal'nykh raskhodov vody pri proektirovaniy gidrotekhnicheskikh i dorozhnykh vodopropusknykh sooruzhenii* [Determination of maximum estimating design discharge when projecting hydroengineering and road culverts]. Volgograd, VSUACE Publ., 2003. 47 p.
5. Musaelyan S. M. *Inzhenernaya gidrologiya* [Engineering hydrology]. Volgograd, VSUACE Publ., 2006. 290 p.

For citation:

Musaelyan S. M., Shchekochikhina E. V., Vol'skaya O. N., Olyanskii Yu. I. [Water management system and some aspects of improvement of safety declaration of waterworks with account of capacity of waterworks facility]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 103—110.

About authors:

Musaelyan Sarkis Movsesovich — Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Shchekochikhina Evgeniya Viktorovna — Candidate of Geological and Mineralogical Science, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, karnat.1@yandex.ru

Vol'skaya Ol'ga Nikolaevna — Candidate of Engineering Science, Docent of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, olgavolska@mail.ru

Olyanskii Yurii Ivanovich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Docent, Professor of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, olyansk@list.ru

УДК 550.83:624.131.1

А. М. Саламов^а, Ф. Г. Габибов^б, Ф. А. Саламов^в, Л. Ф. Габибова^г, А. Н. Богомолов^{д, е}

^а *Институт геологии и геофизики Академии наук Азербайджана*

^б *Азербайджанский научно-исследовательский институт строительства и архитектуры*

^в *Компания British Petroleum*

^г *Компания Baker Hughes*

^д *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^е *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

ОБОБЩЕННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОИСКА ПОДЗЕМНЫХ ПРЕСНЫХ ВОД ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ КОМПЛЕКСНЫМИ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В пределах Куринской депрессии орографически выделяются следующие основные элементы: Аджиноурское плато и Ганых-Агричайская предгорная равнина.

Описываемый массив расположен в Куринской межгорной впадине, составляя часть ее северного борта.

На основании анализа полученной геолого-геофизической информации сделаны следующие выводы:

на территории Аджиноурского плато с севера-востока к юго-западу гравийно и волунно-галечниковые отложения замещаются глинистыми отложениями. Широкое развитие глин в разрезе западной части региона, создавая естественные экраны на пути миграции подземных вод, приводит к повышению степени их минерализации;

анализ распределения по площади величины степени глинистости разреза, позволил совместно с данными бурения и параметрических наблюдений, на основании корреляционных связей, установить преимущественное распространение минерализованной воды в западной части региона и постепенное ее опреснение к востоку.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пресная вода, массив, депрессия, плато, равнина, минерализация, экран, глинистый, миграция, геофизика.

Введение. Использование подземных вод для водоснабжения населенных пунктов в Азербайджане имеет многовековую историю.

До начала XX в. собственно гидрогеологических исследований на территории Республики Азербайджан не проводились. В геологической литературе до конца XIX в. встречаются лишь весьма скудные данные о выходах подземных вод на поверхность земли, минерализации и химическом составе родниковых вод. Так, например, в 1888 г. для обнаружения источников пресной воды вдоль линии Закавказской железной дороги горным инженером И. А. Соколовским велись изыскательские работы, в его отчете приводятся сведения о геологическом строении местности и признаках водоносности горных пород разного возраста.

В пределах Куринской депрессии орографически выделяются следующие основные элементы: Аджиноурское плато и Ганых-Агричайская предгорная равнина (рис. 1).

Территория исследования густо расчленена поперечными ущельями.

Геологическое строение. Описываемый массив расположен в Куринской межгорной впадине, составляя часть ее северного борта. На территории массива наблюдается почти непрерывный стратиграфический разрез от майкопских до четвертичных отложений включительно.

Геологическое строение полосы южного склона Большого Кавказского хребта и Куринской депрессии к настоящему моменту изучено довольно подробно. Комплекс геологических образований Куринской депрессии, прилегающей южному склону Большого Кавказского хребта и к его отрогам по северному борту Ганых-Агричайской предгорной равнины, представлен серией осадочных пород мезокайнозоя.

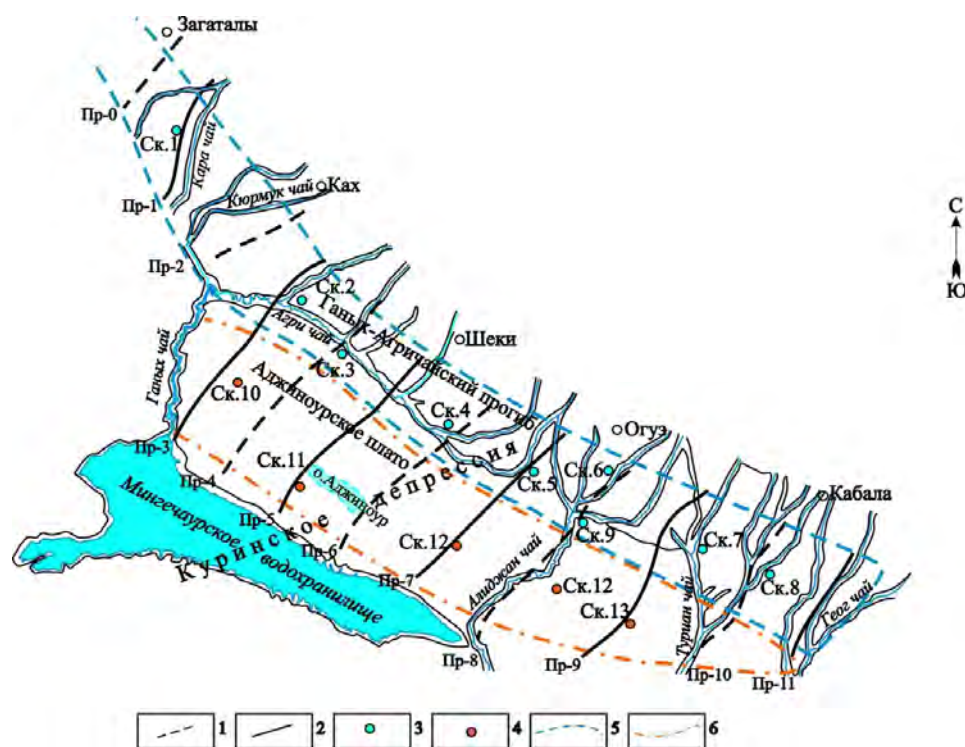


Рис. 1. Схема расположения геофизических профилей: 1, 2 — профили комплексных геофизических исследований методом ВЭЗ-ВП, сейсморазведки (метод МОВ); 3 — скважины, рекомендованные результатами геофизических исследований и реально вскрывшие пресные подземные воды; 4 — скважины, вскрывшие минерализованные воды; 5 — границы распространения пресных подземных вод; 6 — границы распространения минерализованных подземных вод

Четвертичные отложения, имеющие развитие в пределах южного склона Большого Кавказа и заполняющие Ганых-Агричайскую долину, по времени образования и условиям диагенеза подразделяются на современные и древне-четвертичные.

Слагающие Шеки-Закатальскую зону и Аджиноурское плато образования покрыты мощной пачкой четвертичных отложений, представленных аллювиальными, делювиальными, пролювиальными образованиями, охватывающими широкий спектр литологических разностей осадочных пород от грубообломочных конгломератов до глин.

Тектоника. Рассматриваемый регион включает в себя Аджиноурское плато, Шеки-Закатальскую предгорную зону, а также Ганых-Агричайский прогиб, который на севере граничит с Вандамским антиклинорием, а на юге

переходит в зону Аджиноурских поднятий, представленную асимметричными опрокинутыми на юг разрывными надвигами и взбросами, сильно вытянутыми в западном и северо-западном направлениях антиклинальными складками.

Структуры массива с момента своего возникновения и в процессе роста подверглись воздействию агентов денудации, из которых наиболее энергичной была эрозионная деятельность.

Линии тектонических нарушений расчленяют массив склона на отдельные блоки, сохраняющие общекавказское направление.

В тектоническом строении Аджиноурского плато сохраняются специфические черты тектоники Джейранчелской неизменности, но проявляются они в несколько ослабленном виде. В ее строении выделяются два тектонических этажа: Предбакинский и Хазарский.

Территория Аджиноурского плато на западе ограничен р. Ганых, на севере — Ганых-Агричайской долиной, на юге — Минегечаурским водохранилищем и Ширванской степью, на востоке — р. Гирдманчай.

Гидрогеологические условия территории исследования. Несмотря на сильное эрозионное расчленение Джейранчелской неизменности и Аджиноурского плато, эти районы постоянной гидрографической сети не имеют. Расположенные на территории Аджиноурского плато реки Ганых, Алджан-чай, Туриан-чай и Геог-чай, начинаются на южном склоне Большого Кавказа или в Ганых-Агричайской долине прорезают Аджиноур глубокими ущельями, дренируются, уносят свои воды за его пределы.

Основная часть Аджиноурского плато характеризуется чрезвычайной бедностью грунтовых и пластовых вод, что связано с сухим климатом и слабой проницаемостью пород. Водоносные горизонты здесь носят периодический характер. Структурно-литологические особенности строения региона и источники питания подземных вод оказывают большое влияние на водоносность пород и на минерализацию содержащейся в ней воды. Эти параметры варьируют в широких пределах.

Сложность геолого-тектонического строения региона обусловила соответствующую гидрогеологическую ситуацию.

Методика исследований. Применение геофизического комплекса, включающего методы ВЭЗ-ВП и сейсморазведки, позволили изучить литологический состав пород, мощность аллювиальных отложений и их обводнение в долинах рек, оконтурить площади распространения пресных и минерализованных подземных вод [1].

С целью выделения границ пресных и минерализованных вод и учитывая сложное гидрогеологическое условия данного района, во время проведение полевых работ методом ВЭЗ-ВП в методике исследований были произведены некоторые изменения. То есть для детального расчленения геологического разреза на точки наблюдения количество измерений было увеличено в два раза.

Применение данной методики и использование данных бурения, параметрических замеров и электрокаротажа скважин дали возможность в значительной степени однозначно интерпретировать материалы геофизических исследований [2].

Анализ результатов и выводы. Результаты настоящей работы являются кратким обобщением многолетних поисков пресных подземных вод на Куринской межгорной впадине.

По полученным данным проведенных исследований составлены геолого-геофизические разрезы (рис. 2—4) по соответствующим маршрутам и карта результатов геофизических работ, отражающая районирование Куринской депрессии по степени минерализации подземных вод (см. рис. 1).

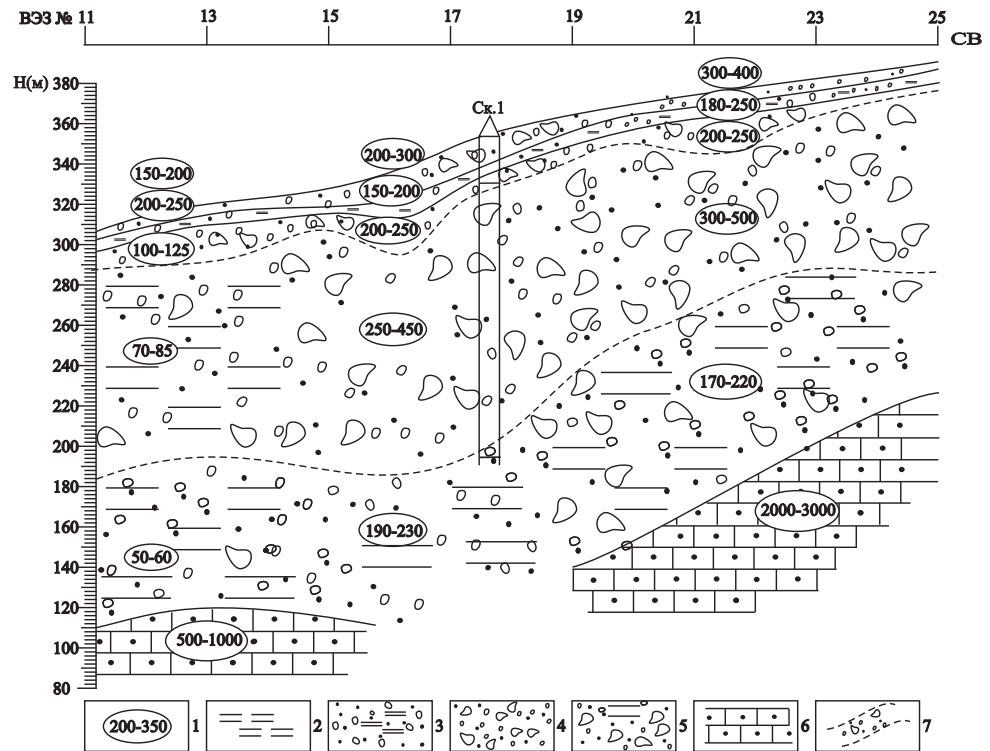


Рис. 2. Литологический разрез по профилю 1, составленный по результатам геофизических исследований методом ВЭЗ: 1 — удельное электрическое сопротивления пород; 2 — глины; 3 — гравийно-галечниковые отложения с глинистым заполнителем; 4 — валунно-галечниковые отложения с песчаным заполнителем; 5 — валунно-галечниковые отложения с песчаным и глинистым заполнителями; 6 — песчанники; 7 — предполагаемый водоносный горизонт

На основании анализа полученной геолого-геофизической информации сделаны следующие выводы:

на территории Аджиноурского плато с севера-востока к юго-западу гравийно и валунно-галечниковые отложения замещаются глинистыми отложениями (см. рис. 2). Широкое развитие глин в разрезе западной части региона, создавая естественные экраны на пути миграции подземных вод, приводит к повышению степени их минерализации;

анализ распределения по площади величины степени глинистости разреза позволил совместно с данными бурения и параметрических наблюдений, на основании корреляционных связей установить преимущественное распространение минерализованной воды в западной части региона и постепенное ее опреснение к востоку.

В Шеки-Закатальской зоне практически повсеместно распространены пресные подземные воды. Геофизическими методами ВЭЗ, ВЭЗ-ВП и сейсморазведкой (МОВ) здесь выявлены и протрассированы коллекторы подземных вод, определена глубина залегания уровня грунтовых вод.

Анализ геолого-геофизических материалов показал частую смену литофаций как по горизонтали, так и по вертикали. Вместе с этим, отмечены общие закономерности в распределении литофаций, что позволило выделить два основных типа разрезов:

- разрез конуса выноса;
- разрез межконусной депрессии.

Разрез конусов выноса изучен по рекам Закатальского и Огузского районов.

В центральной части конуса выноса разрез характеризуется частой сменой литофаций с преобладанием грубообломочного материала.

Сопротивление толщи, представленной здесь чередованием волунно- и гравийно-галечниковых отложений, меняется от 90 до 500 Ом·м в зависимости от заполнителя (глинистого или песчаного).

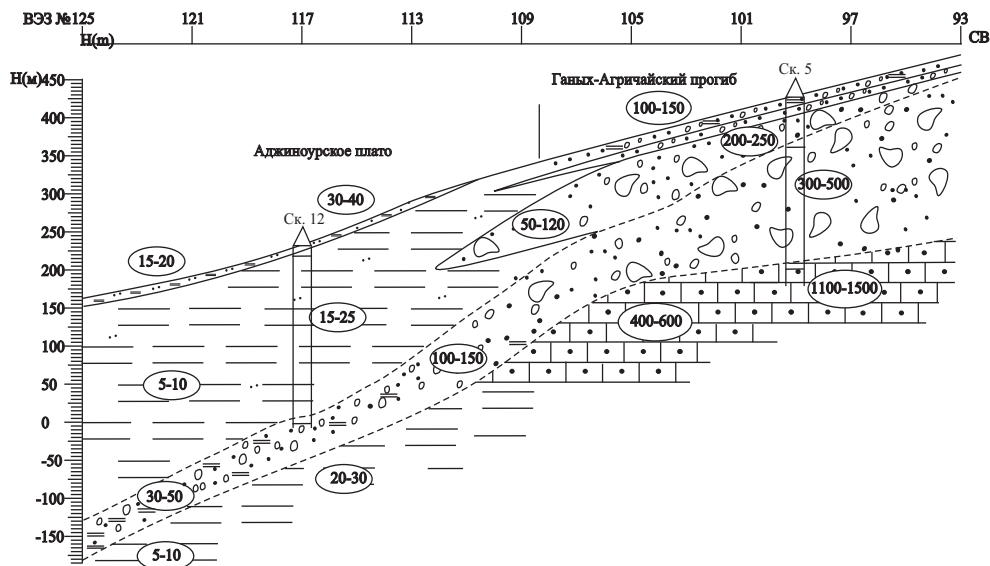


Рис. 3. Литографический разрез по профилю 7, составленный по результатам геофизических исследований методом ВЭЗ

В периферии конуса выноса закономерно прослеживается увеличение содержания в разрезе более мелких фракций. Разрез здесь представлен, в основном, гравийно-галечниковыми отложениями с песчано-глинистым и глинистым заполнителем, песками и глинами, что отмечается понижением удельных сопротивлений до первых десятков и единиц Ом·м.

В межконусных депрессиях разрез также характеризуется частой сменой литофаций, со значительным преобладанием мелких фракций. Здесь в верхней части развиты глинисто-суглинистые отложения сопротивлением порядка 5...40 Ом·м, подстилаемые довольно мощной толщей песка с прослоями и линзами глин.

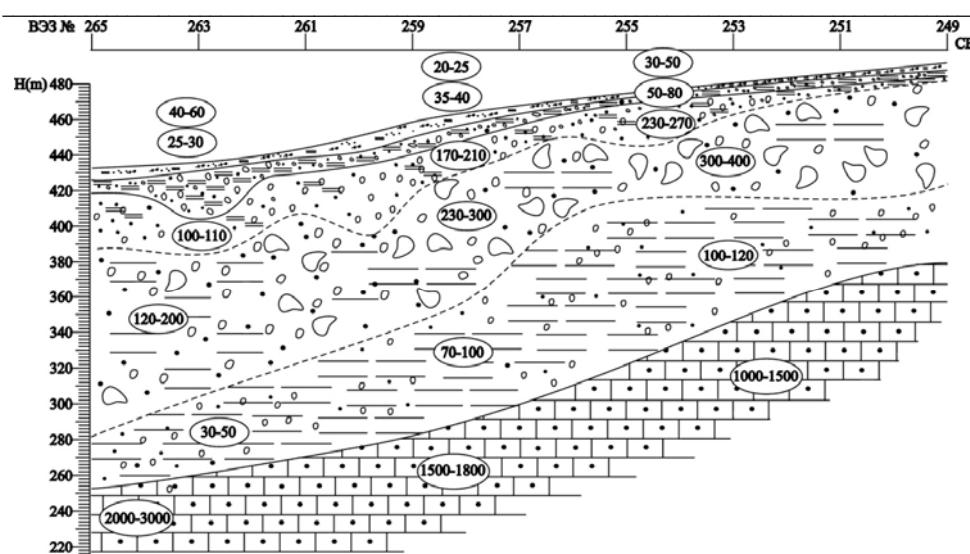


Рис. 4. Литологический разрез по профилю 11, составленный по результатам геофизических исследований методом ВЭЗ

На глубине 150...250 м залегают волунно и гравийно-галечниковые отложения с сопротивлениями 200...500 Ом·м, а на глубине 250...300 м залегают песчаники с сопротивлениями 1000...3000 Ом·м.

Уровень грунтовых вод по данным сейсморазведки (МОВ) составил 5...7 м.

В пределах всего исследованного района в северной части Куринской депрессии наибольший интерес с точки зрения поисков пресных подземных вод представляют волунно- и гравийно-галечниковые отложения с песчаным заполнителем, подстилаемые глинами, создающими водоупор. В других частях территории в пределах исследуемой глубины региональные водоупорные пласты не выделены или не выявлены. Благоприятные условия для поиска воды создают локальные водоупоры, которые представлены пластами и прослоями глин и суглинков.

По результатам геофизических исследований были рекомендованы места заложения проверочных гидрогеологических скважин, которые при бурении дали пресную воду с высоким дебитом и подтвердили литологический состав пород, слагающих регион.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелькановицкий И. М., Ряполова В. И., Хордиайнен М. А. Методы геофизических исследований при поисках и разведке месторождений пресных подземных вод. М.: Недра, 1982. 237 с.
2. Новицкий Г. П. Комплексирование геофизических методов разведки. Л.: Недра, 1974, 256 с.

© Саламов А. М., Габибов Ф. Г., Саламов Ф. А., Габимова Л. Ф., Богомолов А. Н., 2016

Поступила в редакцию
в апреле 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Обобщенный анализ результатов поиска подземных пресных вод для водоснабжения населенных пунктов комплексными геофизическими методами / А. М. Саламов, Ф. Г. Габибов, Ф. А. Саламов, Л. Ф. Габимова, А. Н. Богомолов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 111—118.

Об авторах:

Саламов Аваз Махмуд оглы — д-р геол. наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геофизики Академии наук Азербайджана. Азербайджан, г. Баку, Ясамальский район, проспект Джавида Гусейна, 29А AZ1143, avazsalamov@yandex.ru

Габиров Фахраддин Гасан оглы — д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией, Азербайджанский научно-исследовательский институт строительства и архитектуры, Азербайджан, г. Баку, ул. Д. Алиева, 251, farchad@yandex.ru

Саламов Фируз Аваз оглы — геолог компании British Petroleum, firuz.salamov@bp.com

Габирова Лейли Фахраддин кызы — инженер компании Baker Hughes, farchad@yandex.ru

Богомолов Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; проф. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, banzaritcyn@mail.ru

A. M. Salamov, F. G. Gabibov, F. A. Salamov, L. F. Gabibova, A. N. Bogomolov

GENERAL ANALYSIS OF THE RESULTS OF SEARCHING FOR UNDERGROUND FRESH WATER FOR WATER SUPPLY OF SETTLEMENTS BY COMPLEX GEOPHYSICAL METHODS

Within Kura depression the following main elements are marked out: Ajinaur plateau and Ganikh-Agrichay foothill plain.

The described massive is situated in Kura intermountain depression forming a part of its Northern side.

On the basis of the analysis of the received geological and geophysical data the following conclusions were made:

in the area of Ajinaur plateau from North-East to South-West gravel and boulder-pebble deposits are replaced by clay ones. Wide development of clay in the cross section of the western part of the region, that creates natural screens on the way of underground water migration, leads to the degree increase of their mineralization;

analysis of distribution of clayiness degree in cross-section together with the data of drilling and parametric observations on the basis of correlation links allows to determine the spreading of mineralized water mainly in the western part of the region and its gradual desalination towards East.

Key words: fresh water, massive, depression, plateau, plain, mineralization, screen, clay, migration, geophysics.

REFERENCES

1. Mel'kanovitskii I. M., Ryapolova V. I., Khordikainen M. A. *Metody geofizicheskikh issledovaniy pri poiskakh i razvedke mestorozhdenii presnykh podzemnykh vod* [Methods of geophysical surveys when searching and developing fields of fresh underground waters]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 237 p.
2. Novitskii G. P. *Kompleksirovanie geofizicheskikh metodov razvedki* [Integration of geophysical surveying methods]. Leningrad, Nedra Publ., 1974. 256 p.

For citation:

Salamov A. M., Gabibov F. G., Salamov F. A., Gabibova L. F., Bogomolov A. N. [General analysis of the results of searching for underground fresh water for water supply of settlements by complex geophysical methods]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 111—118.

About authors:

Salamov Avaz Makhmud ogly — Doctor of Geological Science, Senior Research Scientist, Institute of Geology and Geophysics of the Academy of Sciences of Azerbaijan. Azerbaijan, Baku, Yasamal'skii district, Dzhavid Gusein Prospect, 29AAZ1143

Gabibov Fakhraddin Gasan ogly — Doctor of Engineering Sciences, Docent, Head of the Laboratory, Azerbaijan R&D Institute of Civil Engineering and Architecture. Azerbaijan, Baku, 251, Alieva St.

Salamov Firuz Avaz ogly — Geologist of British Petroleum Company

Gabibova Leili Fakhraddin kyzy — Engineer of Baker Hughes Company

Bogomolov Aleksandr Nikolaevich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Vice-Rector for Scientific Research, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation; Professor of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University. 29, Komsomolskii Prospect, Perm', 614990, Russian Federation, banzaritcyn@mail.ru

УДК 502.17+504.03

М. А. Шубин, О. В. Юшин

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

МОНИТОРИНГ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИБРЕЖНЫХ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ВОЛГОГРАДСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Приведены результаты исследования условий и факторов процесса переработки берегов Волгоградского водохранилища. Проводится анализ результатов мониторинга переработки, прогнозные оценки влияния процесса на экологическую безопасность территорий.

К л ю ч е в ы е с л о в а: Волгоградское водохранилище, берега, переработка, факторы, оценка, экологическая безопасность.

Строительство и эксплуатация гидротехнических комплексов, обеспечивающих растущие потребности населения и предприятий в чистой воде, в свете современной геополитической и экономической ситуации имеет чрезвычайно важное значение для народного хозяйства. Устойчивая тенденция к развитию этого вида хозяйственной деятельности определяет актуальность исследований, направленных на всестороннюю оценку влияния строительства и эксплуатации сооружений гидротехнического комплекса на окружающую природную среду. В частности, это касается инженерно-геологических условий территорий, находящихся в сфере воздействия данных сооружений: зданий, домовладений, насосных станций, сопутствующих объектов инфраструктуры.

Результаты проведенных исследований показывают, что строительство и последующая эксплуатация гидротехнических сооружений оказывают заметное влияние на развитие инженерно-геологических процессов и требуют организации системы литомониторинга для наблюдений, прогнозов и управления динамикой их развития [1].

Создание Волгоградского водохранилища в 1958—1961 гг. привело к интенсивному развитию процесса переработки берегов, представляющего серьезную угрозу экологической безопасности населенных пунктов и сооружений на прилегающих территориях.

Процесс формирования берегов весьма активен и наносит значительный ущерб народному хозяйству Волгоградской области. В опасной зоне находятся все без исключения прибрежные населенные пункты, насосные станции, рыбоперерабатывающие предприятия, ценные сельскохозяйственные угодья, а также кладбища и скотомогильники. Интенсивная переработка левого берега на участках сел Молчановка, Бережновка, Никуйково и Левчуновка, превысившая 250...300 м, обусловила необходимость переноса этих населенных пунктов дальше от уреза воды в 1966—1969 гг. Во многих селах разрушены целые улицы с различными постройками и приусадебными участками. Даже на правобережье, в зоне развития слабо размываемых пород, существует реальная угроза разрушения ряда важных объектов. Учитывая это, размещение любых проектируемых объектов и эксплуатация существующих сооружений

в прибрежной зоне Волгоградского водохранилища должны осуществляться на основе мониторинга — стационарного изучения характера и интенсивности развития процесса переработки берегов и прогноза дальнейшего развития этого процесса для обоснования защитных мероприятий.

До 1990 г. эти работы выполнялись Нижневолжской партией Центральной инженерно-геологической и гидрогеологической экспедиции и Волгоградской геологоразведочной экспедицией (ВГРЭ), однако затем объем работ заметно уменьшился и количество участков наблюдений было резко сокращено в связи с недостаточным финансированием. Однако информация о распространении и активности процессов переработки берегов Волгоградского водохранилища, влияющих на населенные пункты, хозяйственные и водные объекты, крайне необходима для принятия решений по дальнейшей эксплуатации и защите прибрежных территорий. Это потребовало продолжения работ по мониторингу переработки берегов Волгоградского водохранилища, которые в 2007—2008 гг. выполнил Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет [2].

Целевым назначением работ являлось изучение интенсивности переработки берегов на участках Волгоградского водохранилища, рек Волги и Ахтубы с целью прогнозирования и разработки рекомендаций по снижению негативного воздействия эрозионно-абразионных процессов на населенные пункты, хозяйственные и водные объекты.

Объектами мониторинга явились участки населенных пунктов, расположенных вдоль берегов Волгоградского водохранилища.

В исследованиях были применены как традиционные инженерно-геологические и геодезические методы для наблюдений за динамикой процессов [3—5], так и современные ГИС-технологии [6—8] обработки данных наблюдений, их хранения и использования. В первую очередь это касается картирования распространения и активности инженерно-геологических процессов с использованием методики создания цифровых карт, а также создания картографического банка данных на основе разработанной методики составления, структуры и содержания инженерно-геологических карт.

Для решения поставленных задач предусматривалось выполнение следующих видов исследований:

- комплексный сбор, обработка и систематизация инженерно-геологической и гидрогеологической информации по городским территориям;

- обследование участков с интенсивными проявлениями экзогенных геологических процессов (ЭГП);

- визуальное обследование стационарных участков проявления ЭГП;

- ревизия и восстановление наблюдательной геодезической сети;

- стационарные наблюдения за переработкой берегов;

- фотодокументация объектов проявления ЭГП;

- составление маршрутных профилей по створам;

- подсчет и снятие основных параметров переработки берегов.

В основу исследований положены новые научные и методологические принципы, к которым, во-первых, относятся концептуальные разработки проблемы литомониторинга, а во-вторых, разработка геоинформационных систем мониторинга на базе ГИС-технологий.

Концепция литомониторинга, разработанная в трудах В. К. Епишина [9], В. Т. Трофимова [10], М. А. Шубина [11], решает вопросы теоретической и практической разработки проблемы на основе перехода от оценки и прогнозирования изменений геологической среды под влиянием инженерно-хозяйственной деятельности к программированию системы контроля и управления изменениями ее состояния.

При этом дальнейшего развития в литомониторинге требует разработка новых средств и методов накопления, обработки и выдачи информации, основанных на принципах геоинформационных систем (ГИС).

Сложившееся в науках о Земле понятие ГИС обычно трактуется как интерактивная информационная система, обеспечивающая сбор, хранение, доступ, отображение пространственно-организованных данных и ориентированная на возможность принятия научно-обоснованных управленческих решений [1].

Целью создания ГИС является оценка, прогнозирование и управление изменениями окружающей среды, что вполне соответствует целям мониторинга в принятой нами концепции. Все этапы разработки ГИС — от сбора, хранения, преобразования информации до моделирования и принятия решений в совокупности с программно-технологическими средствами объединяются под общим названием — геоинформационные технологии (ГИС-технологии) и широко применяются в зарубежных исследованиях динамики оползневых и эрозионно-абразионных процессов [12—15].

Основой разработанной базы геоинформационной системы литомониторинга для Волгоградского водохранилища является цифровая инженерно-геологическая карта инженерно-геологических условий переработки берегов Волгоградского водохранилища масштаба 1: 500 000, для участков наблюдений — цифровые инженерно-геологические карты масштаба 1: 5000 — 1:10 000.

В соответствии с программой работ по результатам сбора материалов и мониторинга сформированы тематические цифровые карты открытого использования масштабов 1: 5000 — 1: 500 000, построенные в соответствии с требованиями к структуре картографического банка данных. Учитывая ежегодную периодичность выполнения мониторинговых исследований, их необходимо постоянно проводить на выделенных участках путем маршрутных обследований и инструментальных наблюдений для пополнения базы данных.

Полученные в процессе ежегодных исследований данные по каждому из слоев формируются в геоинформационную систему мониторинга переработки берегов гидротехнического комплекса Волгоградского водохранилища.

В 2015 г. авторами были проведены мониторинговые наблюдения за развитием процесса переработки берегов Волгоградского водохранилища.

Берега Волгоградского водохранилища резко асимметричны как по морфологии, так и по геологическому строению в связи с особенностями геологического развития и направленностью неотектонических движений. Рельеф правобережья сформирован под преимущественным влиянием положительных тектонических движений, сопровождавшихся эрозионной деятельностью. В рельефе левобережья р. Волги отражены длительные процессы накопления осадков различного генезиса.

В геологическом строении правого берега Волгоградского водохранилища принимает участие широкий комплекс отложений от нижнемеловых до современных. Четвертичные отложения представлены верхнечетвертичными и современными делювиальными и аллювиальными рыхлыми отложениями, которые встречаются на правобережье лишь в устьях балок и речных долин, а также песками, глинами, суглинками и супесями хвалынского и хазарского возраста.

Левобережье Волгоградского водохранилища расположено в пределах Прикаспийской синеклизы и характеризуется слабой расчлененностью рельефа. Здесь четко выделяются область морской аккумуляции, расположенная от оси плотины до устья реки Еруслан, и речной аккумуляции — к северу от р. Еруслан.

Заполнение Волгоградского водохранилища продолжалось в течение 1959—1960 гг. и положило начало развитию активных инженерно-геодинамических процессов переработки берегов и подпора подземных вод на прилегающих территориях.

Размыв берегов начался в 1959 г. при уровне выше 7 м и отмечался в основном на участке от плотины ГЭС до г. Камышина по правому берегу и г. Николаевска по левому берегу. Максимальная переработка в этот период происходила на левом берегу, а также на участках правого берега, сложенных рыхлыми четвертичными отложениями. В 1960 г. общее повышение уровня воды в водохранилище привело к резкому усилению интенсивности размыва, поскольку прибрежная отмель была затоплена, и энергия волнения расходовалась непосредственно на разрушение берегов. При этом были залиты мелководья и на левом берегу водохранилища. По данным Л. В. Кокоулиной [16], к середине мая 1960 г. бровка берега на отдельных участках отступила на величину до 30 м. В последующий период в хвалынских отложениях на участках сел Молчановка, Бережновка, Ровное и других берег ежегодно отступал на 14...30 м, что потребовало переноса ряда сел левого берега на значительное расстояние от уреза воды.

В последние годы развитие процессов переработки берегов Волгоградского водохранилища происходит при относительно стабильном уровне, близком к отметке НПП. Формирование берегов осуществляется за счет подмыва основания склона, выработки ниш и карнизов, обрушения и осыпания выветрелых пород, оползневых процессов, а также за счет накопления и перемещения разрушенного материала. Аккумуляция осуществляется в основном на участках, сложенных песками и супесями, реже глинистыми отложениями, за счет вдольбереговых перемещений наносов.

Исследования, проведенные М. М. Адаш [17], позволили выявить основные факторы переработки берегов Волгоградского водохранилища, к которым относятся:

- коэффициент размываемости пород;
- энергия волнения;
- повторяемость волн высотой более 0,5 м;
- крутизна подводной отмели;
- максимальная высота волны;
- высота абразионного уступа;
- обеспеченность уровня на НПП и выше.

Таким образом, интенсивность процесса переработки берегов водохранилища изменчива во времени и пространстве и зависит от величины коэффициента размываемости пород, волно-энергетических характеристик и параметров склона.

Интенсивность и характер переработки берегов Волгоградского водохранилища определяются различными типами прибрежных склонов.

Берега Волгоградского водохранилища по генетической типизации относятся к абразионным и оползневым, значительно реже встречаются аккумулятивный и нейтральный типы. Среди первой группы основным распространением пользуются обвальные, осыпные и обвально-осыпные типы переработки берегов, сложенные трудноразмываемыми крепкими породами: песчаниками, опоками. Берега, сложенные песками и супесями, относятся к абразионному осыпному типу переработки.

Абразионный обвальный тип. К этому типу относится большая часть берега водохранилища. Наиболее характерными являются участки Камышин, расположенный на правом берегу, и Нижний Балыклеи, находящийся на левом берегу водохранилища.

В геологическом строении участка Камышин принимают участие опоки и опокovidные песчаники сызранской свиты палеогена, интенсивно трещиноватые, в нижней части склона плотные, крепкие, ожелезненные, разбитые трещинами на крупные глыбы. В результате даже небольшой подрезки основания склона это приводит к обрушению глыбового характера. Отступление бровки берегового уступа происходит в основном за счет обвалов трещиноватых опокovidных песчаников в результате выветривания и волновой абразии. Большая площадь водохранилища способствует интенсивной волновой абразии, ширина разгона достигает 22 км. Абразионный уступ на участке имеет высоту 4,5...14,7 м над НПГ. Пляж отсутствует, у уреза и в воде отмечаются обильные накопления и отдельные глыбы опокovidного песчаника от 1,1 до 5,8 м в поперечнике. Скальные породы слабо подвержены размыву, поэтому переработка берега на участке происходит медленно.

Участок Нижний Балыклеи в геоморфологическом отношении расположен на ровной, почти горизонтальной поверхности хвалынской террасы. В геологическом строении участка принимают участие шоколадные глины, местами покрытые желтовато-бурыми суглинками мощностью до 2,0 м. Волнообразующими для участка являются ветры северных, северо-западных, западных и юго-западных румбов. Абразионный уступ высотой 5,8...6,5 м над НПГ обрывается вертикально. Пляж шириной не более 1,5 м, местами отсутствует. У подножья уступа отмечаются обвалы, представленные глыбами и крупными обломками глин плитообразной формы.

Абразионный обвально-осыпной тип. По этому типу идет переработка берегов в основном правобережных участков и отдельных участков левого берега. Наиболее представительными являются наблюдательные участки Пичуга, Горная Пролейка и Дубовка.

Участок Пичуга находится на ровной поверхности правобережной террасы р. Волги. В геологическом строении принимают участие: суглинки темно-коричневые, слабокарбонатизированные, глины зеленовато-серые, опесчаненные с прослойками светло-серого песка, с постепенным переходом в песчаники серые, опокovidные, трещиноватые. Ширина водохранилища в районе

участка достигает 7 км. Волнообразующими являются ветры северо-восточного, восточного, юго-восточного и южного румбов. Высота абразионного уступа увеличивается с северо-востока на юго-запад с 2,4 м до 11,2 м. В северной части участка — пляж песчано-глинистый шириной до 5,5 м, в южной — 1,2...1,5 м. Переработка берега происходит за счет подмыва основания берегового уступа и дальнейшего переноса обрушившегося материала. Основными формами переработки берега на участке являются осыпи песчано-глинистых пород и глыбы песчаников, скапливающиеся у основания уступа.

Абразионный осыпной тип. По этому типу идет переработка в основном на участках левого берега водохранилища в районе распространения Приволжской песчаной гряды. Наиболее характерным является участок Приморск.

Участок расположен на ровной поверхности второй надпойменной террасы р. Волги. Береговой склон сложен тонко-мелкозернистыми песками. Высота абразионного уступа изменяется от 6,8 м до 9,0 м. Уступ обрывистый, в верхней части вертикальный. Пляж песчаный, ширина его составляет 1,7...3,5 м.

Волнообразующими для участка являются ветры северных, северо-западных, западных и юго-западных румбов. Переработка берега идет за счет подмыва основания склона и осыпания песков.

Оползневой тип. Оползневой тип переработки отмечается в районе населенных пунктов Пичуга, Дубовка, Песковатка, Горный Балыклей и др.

Оползневые склоны сложены в верхней части суглинками и супесями, которые залегают на хвалынских шоколадных глинах с прослоями обводненных, тонкозернистых песков. В нижней части разреза отмечаются пески и рыхлые песчаники пролейской, камышинской и сызранской свит палеогена. Оползневые деформации связаны с шоколадными глинами хвалынского возраста и царицынскими глинами палеогена. Основная причина оползневых явлений — переувлажнение хвалынских шоколадных глин и подрезка берегового уступа абразией.

Нейтральные типы переработки берегов характерны для многочисленных заливов водохранилища, где практически отсутствует волновая эрозия.

Аккумулятивный тип переработки берегов отмечается в некоторых мелководных заливах, а также на отдельных участках водохранилища, защищенных от волнового воздействия островами и отмелями. В основном это характерно для участков Дубовка, Горно-Водяное, Горная Пролейка, Приморск.

Рассмотрим результаты мониторинга переработки на примере г. Дубовки (правый берег) и г. Николаевска (левый берег).

Город Дубовка расположен на правом берегу Волгоградского водохранилища в 40 км от г. Волгограда и административно является центром Дубовского района Волгоградской области. Геоморфологически город расположен на эрозионной террасе бакинского возраста. Со стороны р. Волги и р. Дубовочки к указанной террасе прислоняется аккумулятивная хвалынская терраса. По берегу водохранилища в пределах городской черты происходит активный процесс размыва берега (рис. 1), среднегодовая величина которого составляет от 0,48 м в полускальных породах до 4,23 м в хвалынских песчано-глинистых отложениях [18]. Ряд жилых домов оказался на расстоянии 10...30 м от бровки водохранилища.



Рис. 1. Интенсивная переработка берега в г. Дубовке

Прогноз величины переработки берегов по участку Дубовка на период до 2030 г., выполненный в 1980 г. Центральной инженерно-геологической и гидрогеологической экспедицией методом стохастических моделей [17], превышает 150 м, что требует проведения берегоукрепительных мероприятий на наиболее опасных участках. Мониторинговые наблюдения 2015 г. показали, что эти мероприятия успешно выполнены и угроза разрушения берега здесь устранена.

Город Николаевск находится на левом берегу Волгоградского водохранилища в 177 км к северо-востоку от г. Волгограда и является административным центром Николаевского района.

В геоморфологическом отношении г. Николаевск расположен на ровной поверхности хвалынской террасы, имеющей небольшой наклон под углом $2...5^\circ$ в сторону водохранилища. Среднегодовая величина отступления бровки берегового уступа в центральной части участка составляет 0,8...2,2 м, а в северной и южной частях несколько меньше: 0,3...1,0 м. В 1979 г. скорость переработки берега была значительно выше среднееголетних значений и достигала 6,2...9,7 м. Этому способствовал высокий уровень воды в водохранилище, который в летний период был на 0,5...0,7 м выше нормального подпорного горизонта.

Прогноз величины переработки берегов по участку Николаевск соответствует участку Кислово, имеющему аналогичное строение. Величина переработки на период до 2030 г., согласно [17], составляет 40...100 м, что и обусловило необходимость проведения берегоукрепительных мероприятий, которые были успешно завершены к 2015 г. (рис. 2).



Рис. 2. Набережная в г. Николаевске

По данным мониторингового обследования берега, проведенного в 2015 г., в результате значительного снижения уровня воды Волгоградского водохранилища в прибрежной зоне многих участков образовался достаточно широкий и пологий подводный откос. Хотя интенсивность переработки при этом уменьшилась, разрушение берегов водохранилища продолжается, угрожая экологической безопасности территорий и сооружений в прибрежной зоне.

Особо следует отметить экологические условия берегов Волгоградского водохранилища. Однозначно можно оценить экологическое состояние прибрежной зоны как неудовлетворительное, местами опасное. По существу во всех населенных пунктах прибрежная полоса превращена в свалку мусора, бытовых и строительных отходов, особенно в примыкающих к водохранилищу оврагах.

Опасная экологическая ситуация отмечается в южной части пос. Приморск в районе мыса Большой балки. Здесь было расположено старое кладбище, созданное задолго до сооружения водохранилища. В последние годы захоронения интенсивно размываются, в береговом склоне и на мелководье видны разрушенные гробы, останки человеческих тел, черепа, кости (рис. 3). Ни органы местного самоуправления, ни областные власти не предпринимают никаких усилий по переносу захоронений и ликвидации существующей ситуации, что может иметь весьма негативные последствия для экологического состояния этого крупного рыбохозяйственного водоема.



Рис. 3. Размыв захоронений в поселке Приморск

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шубин М. А. Литомониторинг: теоретические и прикладные аспекты. Волгоград: Принт, 2005. 276 с.
2. Шубин М. А., Белгородская М. Ю. Мониторинг процесса формирования берегов крупных водохранилищ Южного федерального округа // Многообразие современных геологических процессов и их инженерно-геологическая оценка: тр. Международной науч. конф. М.: МГУ, 2009. С. 193—195.
3. Akgun A. Assessment of possible damaged areas due to landslide-induced waves at a constructed reservoir using empirical approaches: Kurtun (North Turkey) Dam reservoir area // Nat. Hazard Earth Syst. Sc. 2011. Vol. 11. Iss. 5. Pp. 1341—1350. doi:10.5194/nhess-11-1341-2011, 2011
4. Establishing a monitoring network for an impoundment-induced landslide in Three Gorges Reservoir Area, China / Xianqi Luo, Fawu Wang, Zhenhua Zhang, Ailan Che // Landslides. 2009. Vol. 6. Iss. 1. Pp. 27—37.
5. Lysandros P., Griffiths D. V. Stability assessment of slopes using different factoring strategies // J. Geotech. Geoenviron. Eng. 2012. Vol. 138. Iss. 9. Pp. 1158—1160. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000678](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000678)
6. Шубин М. А. Геоинформационные технологии мониторинга инженерно-геологических процессов // Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем: тр. Международной науч. конф. М.: МГУ, 2007. С. 41—43.
7. Nandi A., Shakoor A. A. GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses // Eng. Geol. 2009. Vol. 110. Iss. 1–2. Pp. 11—20.
8. Getting to know ArcGIS desktop / T. Ormsby, E. Napoleon, R. Burke, C. Groessl, L. Feaster. Redlands: Environmental Systems Research Institute Press, 2001.
9. Епишин В. К., Эжарьян В. Н. Прогноз процесса формирования берегов водохранилищ. М.: Энергия, 1979. 112 с.
10. Теоретические основы инженерной геологии. Социально-экономические аспекты / Е. М. Сергеев, В. Т. Трофимов, П. И. Фадеев и др. М.: Недра, 1985. 260 с.
11. Шубин М. А. Методологические основы программирования литомониторинга // Инженерная геология. 1987. № 6. С. 74—86.
12. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications / Lulseged Ayalew, Hiromitsu Yamagishi, Hideaki Marui, Takami Kanno // Eng. Geol. 2005. Vol. 81. Iss. 4. Pp. 432—445.

13. *Lulseged Ayalew, Hiromitsu Yamagishi*. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan // *Geomorphology*. 2005. Vol. 65. Iss. 1-2. Pp. 15—31.
14. *Nilsen B.* New trends in rock slope stability analyses // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2000. Vol. 58. Iss. 3. Pp. 173—178.
15. *Trigila A., Iadanza C., Spizzichino D.* Quality assessment of the Italian landslide inventory using GIS processing // *Landslides*. 2010. Vol. 7. Iss. 4. Pp. 455—470.
16. *Кокоулина Л. В.* Переформирование берегов Волгоградского водохранилища // Сб. работ Волгоградской ГМО. Л.: Гидрометеиздат, 1975. Вып. 2. С. 4—30.
17. *Адас М. М.* Прогноз переработки берега на 1980—1990 гг. и 1980—2030 гг. на участках Волгоградского водохранилища. М.: Гидрорежимная экспедиция, 1982.
18. *Шубин М. А., Юшин О. В.* Динамика и мониторинг переработки берегов Волгоградского водохранилища // *Антропогенная трансформация геопространства: история и современность*. Волгоград, 2014. С. 394—399.

© Шубин М. А., Юшин О. В., 2016

Поступила в редакцию
в ноябре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Шубин М. А., Юшин О. В. Мониторинг экологической безопасности прибрежных городских территорий Волгоградского водохранилища // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 119—129.

Об авторах:

Шубин Михаил Алексеевич — д-р геол.-минерал. наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, m-shubin@yandex.ru

Юшин Олег Вячеславович — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, yushin035@yandex.ru

M. A. Shubin, O. V. Yushin

ECOLOGICAL SECURITY MONITORING OF THE COASTAL CITY TERRITORIES OF THE VOLGOGRAD RESERVOIR

This article provides the results of the study of conditions and factors of the Volgograd reservoir bank transformation. The analysis of the results of monitoring of the transformation, forecast assessment of its impact on the environmental safety on the territory is given.

Key words: the Volgograd reservoir, banks, transformation, factors, assessment, environmental safety.

REFERENCES

1. Shubin M. A. *Litomonitoring: teoreticheskie i prikladnye aspekty* [Lithomonitoring: theoretical and applied aspects]. Volgograd, Print Publ., 2005. 276 p.
2. Shubin M. A., Belogorodskaya M. Yu. [Monitoring of formation process of waterside of large reservoirs in the Southern Federal District]. *Mnogoobrazie sovremennykh geologicheskikh protsessov i ikh inzhenerno-geologicheskaya otsenka: tr. Mezhdunarodnoi nauch. konf.* [Diversity of modern geological processes and their engineering and geological assessment. Proc. of Int. Conf.]. Moscow, MSU Publ., 2009. Pp. 193—195.
3. Akgun A. Assessment of possible damaged areas due to landslide-induced waves at a constructed reservoir using empirical approaches: Kurtun (North Turkey) Dam reservoir area. *Nat. Hazard Earth Syst. Sc.*, 2011, 11(5), pp. 1341—1350. doi:10.5194/nhess-11-1341-2011, 2011

4. Xianqi Luo, Fawu Wang, Zhenhua Zhang, Ailan Che. Establishing a monitoring network for an impoundment-induced landslide in Three Gorges Reservoir Area, China. *Landslides*, 2009, 6(1), pp. 27—37.
5. Lysandros P, Griffiths D. V. Stability assessment of slopes using different factoring strategies. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2012, 138(9), pp. 1158—1160. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000678](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000678)
6. Shubin M. A. [Geo-informational technologies of monitoring of engineering and geological processes]. *Monitoring geologicheskikh, litotekhnicheskikh i ekologo-geologicheskikh system: tr. Mezhdunarodnoi nauch. konf.* [Monitoring of geological, lithotechnical and ecological and geological systems. Proc. of Int. Conf.]. Moscow, MSU Publ., 2007. Pp. 41—43.
7. Nandi A., Shakoor A. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Eng. Geol.*, 2009, 110(1–2), pp. 11—20.
8. Ormsby T., Napoleon E., Burke R., Groessl C., Feaster L. *Getting to know ArcGIS desktop*. Redlands, Environmental Systems Research Institute Press, 2001.
9. Epishin V. K., Ekzar'yan V. N. *Prognoz protsessa formirovaniya beregov vodokhranilishch* [Forecast of formation process of waterside of reservoirs]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 112 p.
10. Sergeev E. M., Trofimov V. T., Fadeev P. I. and others. *Teoreticheskie osnovy inzhenernoi geologii. Sotsial'no-ekonomicheskie aspekty* [Theoretical principals of engineering geology. Social and economic aspects]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 260 p.
11. Shubin M. A. [Methodological principals of lithomonitoring programming]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology], 1987, no. 6, pp. 74—86.
12. Lulseged Ayalew, Hiromitsu Yamagishi, Hideaki Marui, Takami Kanno. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Eng. Geol.*, 2005, 81(4), pp. 432—445.
13. Lulseged Ayalew, Hiromitsu Yamagishi. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 2005, 65(1–2), pp. 15—31.
14. Nilsen B. New trends in rock slope stability analyses. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2000, 58(3), pp. 173—178.
15. Trigila A., Iadanza C., Spizzichino D. Quality assessment of the Italian landslide inventory using GIS processing. *Landslides*, 2010, 7(4), pp. 455—470.
16. Kokoulina L. V. [Rearrangement of waterside of the Volgograd reservoir]. *Sbornik rabot Volgogradskoi GMO* [Set of works of the Volgograd Hydrometeorological Observatory]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, iss. 2, pp. 4—30.
17. Adas M. M. *Prognoz pererabotki berega na 1980—1990 gg. i 1980—2030 gg. na uchastkakh Volgogradskogo vodokhranilishcha* [Forecast of rearrangement of waterside for 1980—1990 and 1980—2030 in some areas of the Volgograd reservoir]. Moscow, Gidrorezhimnaya ekspeditsiya Publ., 1982.
18. Shubin M. A., Yushin O. V. [Dynamics and monitoring of rearrangement of waterside of the Volgograd reservoir]. *Antropogennaya transformatsiya geoprostranstva: istoriya i sovremennost'* [Anthropogenic transformation of geo-space: history and modern times]. Volgograd, VSUACE Publ., 2014, pp. 394—399.

For citation:

Shubin M. A., Yushin O. V. [Ecological security monitoring of the coastal city territories of the Volgograd reservoir]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 119—129.

About authors:

Shubin Mikhail Alekseevich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Professor of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, m-shubin@yandex.ru

Yushin Oleg Vyacheslavovich — Postgraduate student of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, yushin035@yandex.ru

УДК 502.17+504.03

М. А. Шубин, О. В. Юшин

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕРЕГОУКРЕПИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ВОЛГОГРАДСКОМ РЕГИОНЕ

Исследуется состояние берегоукрепительных сооружений на левом берегу Волгоградского водохранилища в г. Николаевске и укрепительные сооружения Нижнего поселка Волгоградского тракторного завода в г. Волгограде. Функционирование защитных мероприятий рассматривается на основе мониторинга процесса переработки берегов.

Ключевые слова: берегоукрепительные сооружения, переработка, волновое воздействие, набережная, береговая линия.

В практике гидротехнического строительства широко применяется возведение берегоукрепительных сооружений, площадь которых может достигать десятков тысяч квадратных метров. Создание надежных и экономичных берегоукрепительных сооружений требует значительных затрат и имеет большое значение для благоустройства прибрежных территорий. Вместе с возведением новых укрепительных сооружений проводятся работы по инспектированию и ремонту уже построенных конструкций [1]. Необходимость обследования обусловлена тем, что после строительства Волжской ГЭС берега реки Волги активно перерабатываются. Скорость и характер переработки берегов в верхнем и нижнем бьефе различны и в основном зависят от геологического строения, геоморфологических и гидрологических условий. Учитывая это, в 2015 г. было выполнено обследование берегозащитных конструкций, расположенных в г. Николаевске на Волгоградском водохранилище и в Нижнем поселке Волгоградского тракторного завода г. Волгоград.

В 2014 г. было закончено строительство новой очереди берегоукрепления в центральной части города Николаевска. На северо-востоке участок граничит со старой очередью укрепительных сооружений, которые находятся в неудовлетворительном состоянии из-за деформации подпорной стенки (рис. 1).



Рис. 1. Старая очередь берегоукрепительных сооружений

По результатам мониторинга, проведенного в 2007 и 2008 гг., этот крутой участок берега, сложенный хвалынскими глинами, подвергался интенсивному размыву и обрушению. У подошвы берегового уступа повсеместно отмечались обвалы глин, подмытые корни деревьев и кустарников. Высота берегового склона 6 м, среднегодовая величина отступления бровки берегового уступа составляет 2,2 м/г [2—4]. На интенсивность и размеры волнового размыва влияют следующие факторы:

конфигурация береговой линии, ее положение по отношению к волнообразующим ветрам северного, западного и северо-западного направлений;

геолого-литологическое строение берегового склона, состоящего из суглинков и глин;

параметры подводного склона, имевшего крутизну $i = 0,012$ при ширине от 80 до 100 м. Прибрежная отмель при таких параметрах не способна полностью уменьшить волновое воздействие на берег и приостановить дальнейшее разрушение береговой полосы [5, 6].

По данным мониторингового обследования берега, проведенного в 2015 г., в результате значительного снижения уровня воды Волгоградского водохранилища здесь образовался пологий подводный откос шириной свыше 100 м. Хотя интенсивность переработки уменьшилась, размыв берега на данном участке остался ведущим береговым процессом.

Важной задачей инженерно-технических мероприятий при строительстве набережной в г. Николаевске являлась разработка мер по предупреждению чрезвычайной ситуации, возникающей в связи с размывом подводной и обрушением надводной частей склона на участке берегоукрепления.

При выборе типа конструкций защитных сооружений принимался опыт строительства и эксплуатации берегоукрепительных сооружений левого берега Волгоградского водохранилища на участках сел Черобаево, Колышкино, Курнаевка Старополтавского района Волгоградской области

Для берегоукрепительного сооружения в соответствии со СНиП 33-01—2003, п. 5.1.8, принят III класс. Расчетные уровни, в соответствии со СНиП 2.06.04—82*, п. 5, приняты следующими:

1. Максимальная расчетная обеспеченность 5 % (ФПУ) — 15,90 м.
2. Нормальный подпорный уровень (НПУ) — 15,00 м БС.
3. Уровень мертвого объема (УМО) — 13,00 м БС.

При расчете волновых воздействий определяющим явилось сочетание расчетной скорости ветра 30%-й обеспеченности (18,22 м/с) северо-западного направления и отметки форсированного подпорного уровня воды (15,90 м БС).

В процессе проектных проработок было рассмотрено три варианта конструкций берегозащитных сооружений (табл.), спроектированных ЗАО ПИИ «Гипроводстрой» [2]:

Вариант I — конструкция берегоукрепления откосного профиля с упорным волногасящим банкетом, состоящим из каменно-щебеночной призмы и бетонных блоков, уложенных на берме и откосе призмы в один ряд. Защитное покрытие откоса выше банкета состоит из сборных железобетонных плит толщиной 0,15 м по слою 0,2 м щебня.

Вариант II — конструкция берегоукрепления откосного профиля с упорным волногасящим банкетом, состоящим из каменно-щебеночной призмы и бетонных блоков, уложенных на берме и откосе призмы. Защитное покрытие

откоса выше банкета состоит из камня средним диаметром $D_{cp} = 350$ мм, толщиной 0,70 м по двум слоям щебня: 5...40 мм и 40...70 мм толщиной 0,20 м каждый.

Вариант III — конструкция берегоукрепления вертикального профиля из стальных труб с креплением дна перед трубами и устройством разгрузочной призмы и обратного фильтра с тыльной стороны.

Т а б л и ц а

Сравнение объема работ для разных типов укрепления

Номер варианта	Выемка, м ³	Насыпь, м ³	Камень, м ³	Щебень, м ³	Монолитный ж/б, м ³	Сборный ж/б, м ³	Сборный бетон, м ³	Трубы 1020 × 10, т
I	25645	45619	5692	4104	123,6	443,65	2291	—
II	25645	42700	8820	5205	71,8	86,0	2291	—
III	25400	34500	7380	2800	490	315	—	1411

В качестве основного для дальнейшей разработки был принят вариант I. Протяженность выбранного участка берегоукрепительного сооружения с учетом нижнего примыкания составляет 585,0 м. Устойчивость откоса обеспечивается уположением берегового склона с устройством контрбанкета из песка, местного грунта и каменной призмы. Устойчивый профиль берегового укрепления определен с учетом инженерно-геологических условий, динамики размыва берега, амплитуды колебания уровней р. Волги, ее волновых и ледовых режимов. В зоне волнового воздействия ниже отм. 17,80 конструкция крепления откоса принята с упорным волногасящим банкетом. Это призма, состоящая из каменного ядра и защитного покрытия из бетонных блоков, уложенных по гребню банкета в один слой блок $2 \times 1 \times 0,5$ и по откосу блок со стороной 0,5 м (рис. 2).

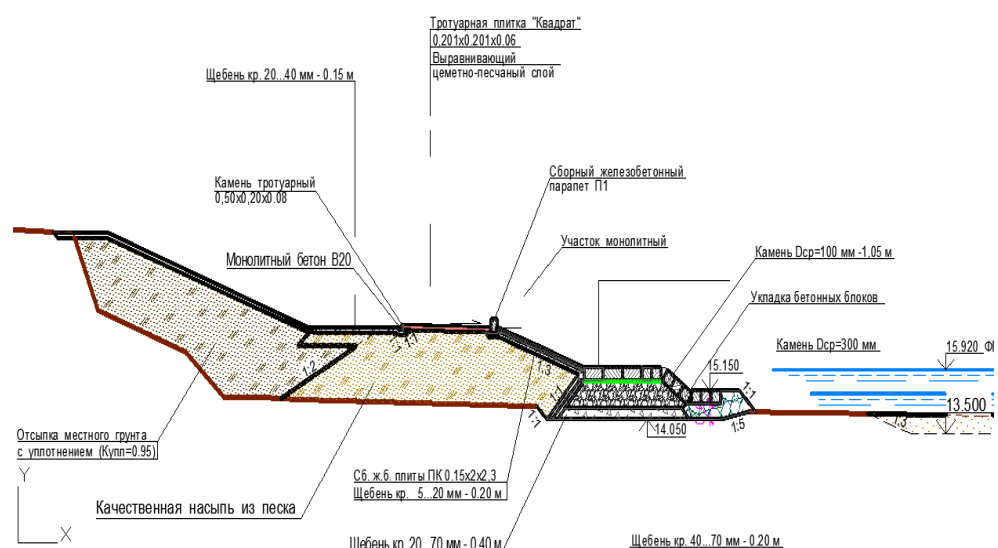


Рис. 2. Схема конструкции берегоукрепления набережной в г. Николаевске

Основными факторами, определяющими волногасящий эффект такого упорного банкета берегоукрепления откосного профиля, являются следующие: тип защитного элемента, пологость и высота откоса, процент пористости в теле призмы. По результатам расчетов воздействия расчетных параметров волн на сооружение, проведенных согласно указаниям СНиП 2.06.04—82, п.п. 1.14—1.19, приняты следующие конструктивные элементы волногасящей призмы:

- масса бетонного блока — 0,30 т (куб со стороной 0,5 м);
- масса бетонного блока — 2,4 т (блок $2 \times 1 \times 0,5$);
- ширина гребня — 4,0 м;
- заложение мористого откоса — 1:1,5;
- отметка верха банкета — 16,00 м БС;
- отметка верха крепления — 17,80 м БС.

Волногасящая упорная призма отсыпается на подготовку из щебня размером 20...70 мм толщиной 0,40 м. Ядро призмы состоит из камня средним диаметром $D_{cp} = 100$ мм. На контакте упорной призмы и песка отсыпается обратный фильтр из двух слоев щебня. Защитное покрытие ядра призмы мористого откоса в пределах упорного банкета до отметки 16,00 м БС выполняется укладкой в один слой бетонных блоков со стороной 0,5 м, на гребне укладываются блоки $2 \times 1 \times 0,5$ м также в один слой.

Защитное покрытие откоса выше отметки 16,00 до отметки 17,50 м БС (зона наката волны) состоит из сборных железобетонных плит ПП $0,15 \times 2 \times 2,3$ и монолитного железобетона по слою щебня толщиной 0,20 м. Узел сопряжения откосной части и горизонтальной поверхности бермы выполняется из монолитного железобетона марки В20 F150 W6. Крепление нижнего примыкания выполнено в виде банкета из камня диаметром $D_{cp} = 350$ мм с отметки верха 17,50 м БС, шириной 3 м и заложением низового откоса.

На берме предусмотрено крепление тротуарной плиткой «Квадрат» по выравнивающему цементно-песчаному слою. В местах, где ширина бермы больше 5 м, крепление выполняется щебнем толщиной 0,15 м.

Выше отметки 17,50 м БС до верхней бровки уположенного откоса по всей длине сооружения предусмотрено крепление поверхности посевом трав по объемной георешетке, заполненной растительным грунтом и суглинистым грунтом выемок.

Для схода с верхней террасы к воде устраиваются три лестницы шириной 3,0 м. Лестничные марши до отметки 16,00 м БС выполняются из монолитного железобетона. Ниже по откосу под воду до отметки 14,00 м БС — ступенчатая укладка из бетонных блоков $3 \times 0,5 \times 0,5$ (рис. 3).

Поверхностный водоотвод и благоустройство территории, прилегающей к берегоукреплению со стороны города, выполняются по отдельному проекту с учетом плана городской застройки¹ [7].

Обследование берегоукрепительных сооружений г. Николаевска показало высокую надежность и эффективность защитных мероприятий, выполненных в 2014 г. В то же время, как указывалось выше, состояние старой очереди берегоукрепления оставляет желать лучшего и требует постоянного контроля.

¹ Берегоукрепление Волгоградского водохранилища в г. Николаевске Волгоградской области. Проектная документация. ЗАО ПИИ «Гипроводстрой». ГК N225/12(11/2012). 53 с.



Рис. 3. Общий вид берегоукрепления в г. Николаевске

В г. Волгограде в настоящее время правый берег р. Волги представляет собой чередование укрепленных участков набережной с участками без какого-либо крепления. Здесь рассматриваются результаты обследования построенной очереди берегоукрепительных сооружений в районе Нижнего поселка Волгоградского тракторного завода. Главной задачей строительства объекта является защита берегового склона от размывов стоковым течением при суточных и сезонных колебаниях уровней реки, от разрушений волновыми и ледовыми нагрузками, защита от интенсивных обвальных процессов и сохранение территории, лежащей в пределах границ города [3, 8, 9].

Конструктивно укрепительные сооружения выполнены подпорными стенами из железобетонных шпунтовых свай с монолитными шапочными балками, анкерными соединениями и устройством дренажа (рис. 4). На выбор способа укрепления берегов реки и определения класса гидротехнического сооружения оказывали влияние:

- требования градостроительных планов участков;
- утвержденная документация по планировке территории;
- технические и функциональные характеристики;
- техничко-экономические показатели;
- характер городской застройки;
- зонирование территории, принятое согласно градостроительному плану;
- перспективы развития прибрежных территорий.

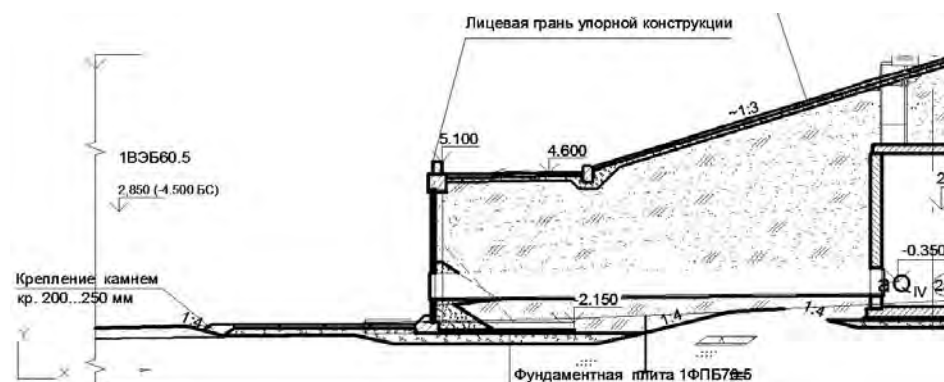


Рис. 4. Схема конструкции берегоукрепления набережной Нижнего поселка Волгоградского тракторного завода г. Волгограда

Особыми условиями строительства являлись интенсивный русловый процесс р. Волги, размыв и обвальное состояние берегового склона.

Шпунтовый ряд забивался на глубину по урезу воды на отметку выше статического уровня воды. Глубина погружения шпунта выбиралась с учетом возможного размыва дна перед стенкой на глубину до 1,5 м. Шпунтовый ряд сверху укреплялся сборной железобетонной шапочной балкой. Бетон для шпунта изготовлялся на портландцементе марки 400...600. В процессе освоения конструкции вертикальной стенки в нее вносились дополнения и изменения, основанные на исследованиях, проведенных с целью уточнения отдельных параметров и улучшения конструктивных решений ряда узлов [10].

На протяжении многих лет этот способ используется в строительстве и является одним из классических методов берегоукрепления. Такой тип укрепления вполне надежен и применяется чаще всего в городах, где увязывается с проектами планировки и включает в себя проезды, прогулочные террасы и причальные устройства (рис. 5). К данному укрепительному сооружению предъявлялись определенные архитектурные требования, поскольку оно находится в городской черте:

надлежащее архитектурное оформление с учетом сохранения всех функций действующих берегоукрепительных конструкций;

предотвращение, устранение или снижение до допустимого уровня отрицательного воздействия действующих и возможных опасных процессов на защищаемую территорию, здания и сооружения;

сохранность особо охраняемых природных территорий, историко-культурных объектов и памятников.



Рис. 5. Общий вид берегоукрепления набережной Нижнего поселка Волгоградского тракторного завода г. Волгограда

Обследование в 2015 г. показало, что железобетон для данного берегоукрепительного сооружения применялся в виде монолитных и сборных плитных покрытий и тюфяков, с соблюдением необходимых технических условий

и технологии строительства, о чем свидетельствуют тонкостенные конструкции из железобетона, которые оказались достаточно долговечными. Так, например, укрепление внешнего откоса сооружения, состоящее из железобетонных плит, до сих пор находится в хорошем состоянии (рис. 6).



Рис. 6. Состояние берегоукрепительных сооружений набережной Нижнего поселка Волгоградского тракторного завода г. Волгограда

Проведенные исследования показали высокую эффективность выполненных берегоукрепительных мероприятий, что позволяет рекомендовать их для дальнейшего применения в целях обеспечения экологической безопасности прибрежных городских территорий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнова Т. Г., Правдивец Ю. П., Смирнов Г. Н. Берегозащитные сооружения: учебник. М.: АСВ, 2002. 303 с.
2. Шубин М. А. Отчет «Мониторинг переработки берегов р. Волги и Волгоградского водохранилища». 2007—2008 г. 183 с.
3. Шубин М. А., Юшин О. В. Динамика и мониторинг переработки берегов Волгоградского водохранилища // Антропогенная трансформация геопроцессов: история и современность. Волгоград: ВолГУ, 2014. С. 394—399.
4. Шубин М. А. Методологические основы программирования литомониторинга // Инженерная геология. 1987. № 6. С. 74—86.
5. Шубин М. А., Белгородская М. Ю. Мониторинг процесса формирования берегов крупных водохранилищ Южного федерального округа // Многообразие современных геологических процессов и их инженерно-геологическая оценка: тр. Международной науч. конф. М.: МГУ, 2009. С. 193—195.
6. Шубин М. А. Литомониторинг: теоретические и прикладные аспекты. Волгоград: Принт, 2005. 276 с.
7. Алтерин И. Е., Быков Л. С., Гуревич В. Б. Укрепление берегов судоходных каналов, рек и водохранилищ. М.: Транспорт, 1973. 216 с.
8. Шубин М. А., Юшин О. В. Проблемы экологической безопасности прибрежных городских территорий Волгоградского водохранилища // Антропогенная трансформация геопро-

странства: история и современность: материалы II Международной науч.-практич. конф. Волгоград: ВолГУ, 2015. С. 416—422.

9. Шубин М. А. Геоинформационные технологии мониторинга инженерно-геологических процессов // Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем: Тр. Международной науч. конф. М.: МГУ, 2007. С. 41—43.

10. Мишин С. И. Указания по проектированию защиты от оползней зданий и сооружений, населенных пунктов. 1973.

© Шубин М. А., Юшин О. В., 2016

Поступила в редакцию
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Шубин М. А., Юшин О. В. Исследование функционирования берегоукрепительных сооружений в Волгоградском регионе // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 130—138.

Об авторах:

Шубин Михаил Алексеевич — д-р геол.-минерал. наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, m-shubin@yandex.ru

Юшин Олег Вячеславович — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, yushin035@yandex.ru

M. A. Shubin, O. V. Yushin

INVESTIGATION OF FUNCTIONING OF BANK PROTECTING STRUCTURES IN THE VOLGOGRAD REGION

The article investigates the state of the bank protecting structures on the left bank of the Volgograd reservoir in Nikolaevsk town and bank protecting construction in Nizhniy poselok of Volgograd tractor plant in the city of Volgograd. Functioning of protective measures is considered on the basis of monitoring of banks transformation process.

Key words: bank protecting structures, transformation, wave action, embankment, bank line.

REFERENCES

1. Smirnova T. G., Pravdivets Yu. P., Smirnov G. N. *Beregozashchitnye sooruzheniya* [Bank protection structures]. Moscow, ASV Publ., 2002. 303 p.
2. Shubin M. A. *Otchet «Monitoring pererabotki beregov r. Volgi i Volgogradskogo vodokhranilishcha»* [Report on “Monitoring of rearrangement of the banks of the Volga River and the Volgograd reservoir”]. 2007—2008, 183 p.
3. Shubin M. A., Yushin O. V. [Dynamics and monitoring of rearrangement of waterside of the Volgograd reservoir]. *Antropogennaya transformatsiya geoprostranstva: istoriya i sovremennost'* [Anthropogenic transformation of geo-space: history and modern times]. Volgograd, VSUACE Publ., 2014, pp. 394—399.
4. Shubin M. A. [Methodological principals of lithomonitoring programming]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology], 1987, no. 6, pp. 74—86.
5. Shubin M. A., Belogorodskaya M. Yu. [Monitoring of formation process of waterside of large reservoirs in the Southern Federal District]. *Mnogoobrazie sovremennykh geologicheskikh protsessov i ikh inzhenerno-geologicheskaya otsenka: tr. Mezhdunarodnoi nauch. konf.* [Diversity of modern geological processes and their engineering and geological assessment. Proc. of Int. Conf.]. Moscow, MSU Publ., 2009. Pp. 193—195.
6. Shubin M. A. *Litomonitoring: teoreticheskie i prikladnye aspekty* [Lithomonitoring: theoretical and applied aspects]. Volgograd, Print Publ., 2005. 276 p.

7. Alperin I. E., Bykov L. S., Gurevich V. B. *Ukreplenie beregov sudokhodnykh kanalov, rek i vodokhranilishch* [Strengthening of the waterside of ship canals, rivers and reservoirs]. Moscow, Transport Publ., 1973. 216 p.

8. Shubin M. A., Yushin O. V. [Problems of ecological safety of coastal urban areas of the Volgograd reservoir]. *Antropogennaya transformatsiya geoprostranstva: istoriya i sovremennost': materialy II Mezhdunarodnoi nauch.-praktich. konf.* [Anthropogenic transformation of geo-space: history and modern times. Pros. of II Int. Conf.]. Volgograd, VSU Publ., 2015. Pp. 416—422.

9. Shubin M. A. [Geo-informational technologies of monitoring of engineering and geological processes]. [Monitoring of geological, lithotechnical and ecological and geological systems. Proc. of Int. Sci. Conf.]. Moscow, MSU Publ., 2007. Pp. 41—43.

10. Mishin S. I. *Ukazaniya po proektirovaniyu zashchity ot opolznei zdaniy i sooruzheniy, nase-lennykh punktov* [Instructions on landslide protection design of buildings, constructions and populated areas]. 1973.

For citation:

Shubin M. A., Yushin O. V. [Investigation of functioning of bank protecting structures in the Volgograd region]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 130—138.

About authors:

Shubin Mikhail Alekseevich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Professor of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, m-shubin@yandex.ru

Yushin Oleg Vyacheslavovich — Postgraduate student of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, yushin035@yandex.ru

УДК 624.072.2:539.214

С. Ю. Калашников, А. В. Старов

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

**УЧЕТ ИНЕРЦИИ ВРАЩЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ
ИДЕАЛЬНО ПЛАСТИЧЕСКИХ МЕМБРАН И ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ НАГРУЗОК**

Рассмотрена задача пластического деформирования круглых мембран и пологих оболочек вращения при воздействии высокоинтенсивных нагрузок с учетом инерции вращения. Получены системы разрешающих уравнений, разработан алгоритм и программа численной реализации задачи на основе метода конечных разностей, дифференциально-разностного метода, в рядах Фурье по функциям Бесселя.

К л ю ч е в ы е с л о в а: круглые мембраны и пологие оболочки, пластическое деформирование, высокоинтенсивные нагрузки, физически и геометрически нелинейные задачи.

Исследование динамического поведения круглых пластинок и пологих оболочек вращения при действии кратковременных нагрузок большой интенсивности является актуальной и сложной задачей вследствие появления больших пластических деформаций и необходимости учета физической и геометрической нелинейностей [1—7].

Алгоритмы решения подобных задач на основе дискретных моделей в упруго вязко пластической постановке с учетом инерции вращения, волновых эффектов, упрочнения, зависимости предела текучести материала от скорости деформирования и других факторов достаточно сложны для численной реализации [8—12].

Целью данной статьи является разработка обоснованно упрощенной методики решения динамических задач с учетом физической и геометрической нелинейностей, а также инерции вращения, пригодной для практического применения.

Использование модели жестко пластического тела в геометрически нелинейной постановке, пренебрегающей упругими деформациями, при условии, что пластические деформации на порядок превышают упругие, как показывают исследования, вполне допустимо [12].

Постановка задачи динамического воздействия нагрузками большой интенсивности на пологие оболочки вращения с учетом больших прогибов на основе нелинейного условия пластичности рассмотрена в работах [13, 14]. В начальный момент времени к оболочке мгновенно прикладывается внутреннее давление, начальное значение которого может превышать несущую способность. В зависимости от интенсивности, длительности и формы импульса деформирование оболочки может состоять из фазы нагружения и фазы затухания движения. Целью является исследование напряженно деформированного состояния в каждый момент времени, определение остаточных пластических деформаций срединной поверхности.

Рассмотрим постановку задачи о динамическом нагружении круглой мембраны или безмоментной оболочки кратковременной нагрузкой прямоугольного типа. В момент времени $t = 0$ к мембране или оболочке мгновенно

прикладывается нагрузка $P = \text{const}$ и действует в течение времени $t = t_p$. Далее нагрузка мгновенно сбрасывается и мембрана или оболочка продолжает деформироваться до полной остановки в момент времени $t = t_k$. Исследуемыми параметрами являются остаточные прогибы и время полной остановки. Уравнения движения круглой мембраны или оболочки в безразмерных координатах и переменных с учетом инерции вращения имеют следующий вид [14]:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{4\rho_0^2}{h^2} \left\{ n_2 - \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho n_1) \right\}, \quad \beta = \frac{h^2}{4\rho_0^2},$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{4}{3} \beta \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) \right] = P(\rho, t) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho n_1 \left(\frac{\partial w}{\partial \rho} + \frac{\partial f}{\partial \rho} \right) \right]. \quad (1)$$

Здесь вводятся безразмерные координаты и переменные:

$\rho = \bar{\rho}/\rho_0$ — радиус-вектор произвольной точки срединной поверхности;

ρ_0 — радиус пластинки; $2h$ — толщина;

$w = 2\bar{w}/h$, $u = 4\bar{u}\rho_0/h^2$ — прогиб и радиальное перемещение;

$n_i = \bar{N}_i/2\sigma_s h$ — продольные усилия;

$P = \bar{P}\rho_0/\sigma_s h^2$ — параметр внешней нагрузки;

σ_s — предел текучести материала, зависящий от скорости пластического деформирования;

$i = 1, 2$ — индексы радиального и окружного направления;

$t = \bar{t}\sqrt{2\sigma_s h / \gamma \rho_0^2}$ — безразмерное время;

γ — масса единицы площади;

$f = f(\rho)$, $\bar{f} = \bar{f}(\bar{\rho})$, $f = 2\bar{f}/h$ — уравнение срединной поверхности в безразмерных и размерных координатах;

$\xi = 2\rho_0^2 / Rh = 4\bar{f}_0 / h$ — параметр начальной кривизны;

$R = (\bar{\rho}_0^2 + \bar{f}_0^2) / 2\bar{f}_0$ — радиус кривизны сферической оболочки.

На размерность соответствующей величины указывает горизонтальная черта. Деформации срединной поверхности и изменения кривизны соответственно равны

$$\bar{\varepsilon}_1 = \frac{h^2}{4\rho_0^2} \left[\frac{\partial u}{\partial \rho} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial \rho} \right)^2 + w\xi \right], \quad \bar{\varepsilon}_2 = \frac{h^2}{4\rho_0^2} \left(\frac{u}{\rho} + w\xi \right),$$

$$\bar{\chi}_1 = -\frac{h}{2\rho_0^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2}, \quad \bar{\chi}_2 = -\frac{h}{2\rho_0^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial w}{\partial \rho}.$$

Граничные условия:

$$n_1(0, t) = n_2(0, t), \quad u(0, t) = \dot{u}(0, t) = 0, \quad w(1, t) = \dot{w}(1, t) = u(1, t) = \dot{u}(1, t) = 0.$$

Начальные условия:

$$w(\rho, 0) = \dot{w}(\rho, 0) = u(\rho, 0) = \dot{u}(\rho, 0) = 0.$$

Учет взаимовлияния мембранных силовых факторов осуществляется на основе поверхности текучести [15, 16] для без моментного напряженного состояния

$$n_1^2 - n_1 n_2 + n_2^2 = n^2 = 1 \quad (2)$$

или поверхности нагружения, аналогичной поверхности текучести [15, 16],

$$n_1^2 - n_1 n_2 + n_2^2 = n^2 = \Phi^2(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, |\text{grad} \varepsilon_i|), \quad (3)$$

$$\Phi(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, |\text{grad} \varepsilon_i|) = 1 + \frac{E^k}{\sigma_s^0} \varepsilon_i + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^n, \quad (4)$$

где E^k — касательный модуль упрочнения; $\dot{\varepsilon}_0$, n — константы, определяемые на основе экспериментальных испытаний с высокими скоростями деформирования при одноосном напряженном состоянии [5—17].

Пренебрегая силами инерции в тангенциальном направлении, из уравнений (1) получим

$$n_2 - \frac{\partial}{\partial \rho}(\rho n_1) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{4}{3} \beta \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) \right] = P(t) - \xi(n_1 + n_2) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \rho n_1 \frac{\partial w}{\partial \rho} \right\}.$$

Уравнение (2) или (3) и первое уравнение (5) имеют единственное решение $n_1 = n_2 = n = \Phi$.

Второе уравнение системы (5) при $\beta = 0$ (без учета инерции вращения) принимает канонический вид [18]

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = P(t) - 2n\xi + a^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} \right), \quad a^2 = n. \quad (6)$$

Решение неоднородного дифференциального уравнения в частных производных гиперболического типа (6) можно получить, используя метод конечных разностей, дифференциально-разностный метод, в рядах Фурье по функциям Бесселя. Целью исследования является выбор наиболее эффективного метода для решения задач динамики пластин и оболочек.

1. Метод конечных разностей. Выполняя аппроксимацию частных производных по времени и пространственной координате конечно-разностными аналогами второго порядка точности [18], дифференциальное уравнение (6) заменим соответствующим конечно-разностным уравнением:

$$w_{i,j+1} = (P_i - 2n\xi)(\Delta t)^2 + 2w_{i,j} - w_{i,j-1} + \left(\frac{\Delta t}{\Delta \rho} \right)^2 n \left\{ w_{i+1,j} - 2w_{i,j} + w_{i-1,j} + \frac{w_{i+1,j} - w_{i-1,j}}{2(i-1)} \right\}, \quad (7)$$

где $\rho_i = \Delta \rho(i-1)$; $t_j = \Delta t(j-1)$; ($j=1, 2, \dots$); $\Delta \rho = \rho_{i+1} - \rho_i = 1/N$; N — целое, ($i=1, 2, \dots, N$).

Для центральной точки оболочки с учетом осевой симметрии при $\rho = 0$ ($i = 1$) уравнение (6) примет вид

$$w_{i,j+1} = (P_i - 2n\xi)(\Delta t)^2 + 2w_{i,j} - w_{i,j-1} + \left(\frac{\Delta t}{\Delta \rho}\right)^2 n \{4w_{i+1,j} - 4w_{i,j}\}. \quad (8)$$

Из начальных условий для старта процедуры на временном слое $j - 1$, $j = 1$, $t_j = \Delta t(j - 1) = 0$ получаем $w_{i,j-1} = (P_i - 2n\xi) \frac{(\Delta t)^2}{2}$.

2. Дифференциально-разностный метод. Выполняя аппроксимацию частных производных по пространственной координате конечно-разностными аналогами второго порядка точности [18], получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений, порядок которой зависит от степени дискретизации ($i = 1, 2, \dots, N$),

$$\frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} = (P_i - 2n\xi) + n \frac{w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}}{(\Delta \rho)^2} + n \frac{w_{i+1} - w_{i-1}}{2(\Delta \rho)^2(i-1)}. \quad (9)$$

Для центральной точки оболочки $\rho = 0$ ($i = 1$)

$$\frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} = (P_i - 2n\xi) + 4n \frac{w_{i+1} - w_i}{(\Delta \rho)^2}. \quad (10)$$

3. Дифференциально-разностный метод повышенной точности. Используя конечно-разностные аналоги производных по пространственной координате четвертого порядка точности [18], получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} = & (P_i - 2n\xi) + n \frac{-w_{i-2} + 16w_{i-1} - 30w_i + 16w_{i+1} - w_{i+2}}{12(\Delta \rho)^2} + \\ & + n \frac{w_{i-2} - 8w_{i-1} + 8w_{i+1} - w_{i+2}}{12(\Delta \rho)^2(i-1)}, \quad (i = 3, \dots, N). \end{aligned} \quad (11)$$

Уравнение (11) для точек $i = 1, i = 2, i = N$ с учетом осевой симметрии принимает вид

$$\frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} = (P_i - 2n\xi) + 2n \frac{-30w_i + 32w_{i+1} - 2w_{i+2}}{12(\Delta \rho)^2}, \quad i = 1, (\rho = 0), \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} = & (P_i - 2n\xi) + n \frac{16w_{i-1} - 31w_i + 16w_{i+1} - w_{i+2}}{12(\Delta \rho)^2} + \\ & + n \frac{-8w_{i-1} + w_i + 8w_{i+1} - w_{i+2}}{12(\Delta \rho)^2(i-1)}, \quad i = 2, (\rho = \Delta \rho), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} = & (P_i - 2n\xi) + n \frac{-w_{i-3} + 4w_{i-2} + 6w_{i-1} - 20w_i + 11w_{i+1} +}{12(\Delta \rho)^2} + \\ & + n \frac{-w_{i-3} + 6w_{i-2} - 18w_{i-1} + 10w_i + 3w_{i+1}}{12(\Delta \rho)^2(i-1)}, \quad i = N, (\rho = 1 - \Delta \rho). \end{aligned} \quad (14)$$

4. Решение в рядах Фурье-Бесселя. Раскладываем нагрузку, превышающую несущую способность оболочки $P - 2n\xi$, и функцию перемещений в ряд Фурье по функциям Бесселя нулевого порядка 1-го рода [19]:

$$P(t) = \sum_{k=1}^{\infty} P_k J_0(\mu_k \rho), \quad w = \sum_{k=1}^{\infty} w_k J_0(\mu_k \rho), \quad (15)$$

$$\text{где } P_k = \frac{2}{J_1^2(\mu_k)} \int_0^1 (P - 2n\xi) J_0(\mu_k \rho) \rho d\rho = \frac{2(P - 2n\xi)}{\mu_k J_1(\mu_k)}.$$

Получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial^2 w_k}{\partial t^2} + \mu_k^2 w_k = P_k, \quad (k = 1, 2, \dots, \infty), \quad (16)$$

решение которой при начальных условиях $w_k = 0, \dot{w}_k = 0$ будет выглядеть так:

$$w_k = P_k [1 - \cos(\mu_k t)] / \mu_k^2, \quad (17)$$

где μ_k — корни уравнения $J_0(\mu_k) = 0$.

В фазе $t \leq t_p$ прогибы, скорости прогибов и ускорения определяются по формулам

$$w_k = \sum_{k=1}^{\infty} P_k [1 - \cos(\mu_k t)] \frac{J_0(\mu_k \rho)}{\mu_k^2}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \sum_{k=1}^{\infty} P_k \sin(\mu_k t) \frac{J_0(\mu_k \rho)}{\mu_k}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \sum_{k=1}^{\infty} P_k \cos(\mu_k t) J_0(\mu_k \rho). \quad (20)$$

В фазе $t \geq t_p$ формулы (18)—(20) меняются:

$$w_k = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ P_k [\cos \mu_k (t - t_p) - \cos(\mu_k t)] - \frac{4n\xi}{\mu_k J_1(\mu_k)} [1 - \cos \mu_k (t - t_p)] \right\} \frac{J_0(\mu_k \rho)}{\mu_k^2}, \quad (21)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ P_k [-\sin \mu_k (t - t_p) + \sin(\mu_k t)] - \frac{4n\xi}{\mu_k J_1(\mu_k)} [\sin \mu_k (t - t_p)] \right\} \frac{J_0(\mu_k \rho)}{\mu_k}, \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ P_k [-\cos \mu_k (t - t_p) + \cos(\mu_k t)] - \frac{4n\xi}{\mu_k J_1(\mu_k)} [\cos \mu_k (t - t_p)] \right\} J_0(\mu_k \rho). \quad (23)$$

5. Метод конечных разностей повышенной точности. Выполняя аппроксимацию частных производных по времени и пространственной координате конечно-разностными аналогами четвертого порядка точности [18], дифференциальное уравнение (6) заменим соответствующим конечно-разностным уравнением

$$w_{i,j+1} = \frac{12}{16} B_i (\Delta t)^2 + \frac{30}{16} w_{i,j} - w_{i,j-1} + \frac{1}{16} (w_{i,j+2} + w_{i,j-2}), \quad (24)$$

где $\vec{B}_i$ — вектор правых частей системы уравнений (11)—(14) на временном слое j . Используя конечно-разностные аналоги производных по временной координате четвертого порядка точности несимметричной структуры [18] и полагая, что выполняется закон линейного ускорения, из (24) можно исключить перемещения на временном слое $j + 2$ с помощью соотношения $w_{i,j+2} = -w_{i,j-2} + 4w_{i,j-1} - 6w_{i,j} + 4w_{i,j+1}$. Система уравнений (24) принимает вид

$$w_{i,j+1} = B_i (\Delta t)^2 + 2w_{i,j} - w_{i,j-1}. \quad (25)$$

Из начальных условий для старта процедуры на временном слое $j-1$, $j=1$, $t_j = \Delta t(j-1) = 0$ получаем $w_{i,j-1} = (P_i - 2n\xi) \frac{(\Delta t)^2}{2}$.

6. Метод конечных разностей с учетом инерции вращения. Согласно (5) при $\beta \neq 0$ система уравнений (7) и (8) принимает вид

$$\begin{aligned} & w_{i-1,j+1} \left[-k + \frac{k}{i-1} \right] + w_{i,j+1} [1+2k] + w_{i+1,j+1} \left[-k - \frac{k}{i-1} \right] = \\ & = 2w_{i-1,j} \left[-k + \frac{k}{i-1} \right] + 2w_{i,j} [1+2k] + 2w_{i+1,j} \left[-k - \frac{k}{i-1} \right] + \\ & + w_{i-1,j-1} \left[-k + \frac{k}{i-1} \right] + w_{i,j-1} [1+2k] + w_{i+1,j-1} \left[-k - \frac{k}{i-1} \right] + B_i (\Delta t)^2, \end{aligned} \quad (7, a)$$

где $\vec{B}_i$ — вектор правых частей системы уравнений (9), (10), $k = \frac{4\beta}{3(\Delta\rho)^2}$.

Для центральной точки оболочки с учетом осевой симметрии при $\rho = 0$ ($i=1$) уравнение (6) примет вид

$$\begin{aligned} & w_{i,j+1} [1+4k] + w_{i+1,j+1} [-4k] = 2w_{i,j} [1+4k] + 2w_{i+1,j} [-4k] - \\ & - w_{i,j-1} [1+4k] - w_{i+1,j-1} [-4k] + B_i (\Delta t)^2. \end{aligned} \quad (8, a)$$

Представляя данную систему в матричном виде $A\vec{w}_{i,j+1} = A(2\vec{w}_{i,j} - \vec{w}_{i,j-1}) + B_i (\Delta t)^2$ или $\vec{w}_i = (2\vec{w}_{i,j} - \vec{w}_{i,j-1}) + A^{-1}\vec{B}_i (\Delta t)^2$, где $\vec{B}_i$ — вектор правых частей системы уравнений (9), (10); $\vec{w}_i$ — вектор перемещений,

$$\vec{w}_i = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_N \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 1+4k & -4k & & \\ -k \left[1 - \frac{1}{2(i-1)} \right] & 1+2k & -k \left[1 + \frac{1}{2(i-1)} \right] & \\ \dots & \dots & \dots & \\ & -k \left[1 - \frac{1}{2(i-1)} \right] & 1+2k & \end{pmatrix}, \vec{B}_i = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_N \end{pmatrix}, (8, \delta),$$

получим систему уравнений, требующую на каждом шаге интегрирования разрешения относительно инерционных членов либо обращения матрицы A с последующим умножением на вектор $\vec{B}_i(\Delta t)^2$.

7. Дифференциально-разностный метод с учетом инерции вращения.

Согласно (5) при $\beta \neq 0$ система уравнений (9), (10) принимает вид

$$-\ddot{w}_{i-1}k \left[1 - \frac{1}{2(i-1)} \right] + \ddot{w}_i(1+2k) - \ddot{w}_{i+1}k \left[1 + \frac{1}{2(i-1)} \right] = B_i. \quad (9, a)$$

Для центральной точки оболочки $\rho = 0$ ($i = 1$)

$$\ddot{w}_i(1+4k) - \ddot{w}_{i+1}4k = B_i, \quad k = \frac{4\beta}{3(\Delta\rho)^2}. \quad (10, a)$$

Представляя данную систему в матричном виде $A\vec{\ddot{w}}_i = \vec{B}_i$ или $\vec{\ddot{w}}_i = A^{-1}\vec{B}_i$, где $\vec{B}_i$ — вектор правых частей системы уравнений (9), (10); $\vec{\ddot{w}}_i$ — вектор ускорений, снова получим систему уравнений, требующую на каждом шаге интегрирования разрешения относительно инерционных членов либо обращения матрицы A , с последующим умножением на вектор $\vec{B}$, что приводит к увеличению машинного времени. Матрица A и вектор B не изменились (8, δ). При $\beta < 0,001$, что соответствует допущениям для тонких пластин $2\beta/2h < 1/20$, матрица A^{-1} оказывается практически единичной.

8. Дифференциально-разностный метод повышенной точности с учетом инерции вращения. Согласно (5) при $\beta \neq 0$ система уравнений (11)—(14) принимает вид

$$\begin{aligned} & \ddot{w}_{i-2} \frac{k}{12} \left[1 - \frac{1}{(i-1)} \right] + \ddot{w}_{i-1} \frac{k}{12} \left[-16 + \frac{8}{(i-1)} \right] + \ddot{w}_i(1+2.5k) + \\ & + \ddot{w}_{i+1} \frac{k}{12} \left[-16 - \frac{8}{(i-1)} \right] + \ddot{w}_{i+2} \frac{k}{12} \left[1 + \frac{1}{(i-1)} \right] = B_i, \quad (i = 3, \dots, N). \end{aligned} \quad (11, a)$$

$$\ddot{w}_i(1+5k) - \ddot{w}_{i+1} \frac{16k}{3} + \ddot{w}_{i+2} \frac{k}{3} = B_i, \quad (i = 1). \quad (12, a)$$

$$\ddot{w}_{i-1} \frac{k}{12} \left[-16 + \frac{8}{(i-1)} \right] + \ddot{w}_i \left[1 + \frac{k}{12} \left(31 - \frac{1}{(i-1)} \right) \right] +$$

$$+ \ddot{w}_{i+1} \frac{k}{12} \left[-16 - \frac{8}{(i-1)} \right] + \ddot{w}_{i-2} \frac{k}{12} \left[1 + \frac{1}{(i-1)} \right] = B_i, \quad (i = 2). \quad (13, a)$$

$$\ddot{w}_{i-3} \frac{k}{12} \left[1 + \frac{1}{(i-1)} \right] + \ddot{w}_{i-2} \frac{k}{12} \left[-4 - \frac{6}{(i-1)} \right] +$$

$$+ \ddot{w}_{i-1} \frac{k}{12} \left[-6 + \frac{18}{(i-1)} \right] + \ddot{w}_i \left[1 + \frac{k}{12} \left(20 - \frac{10}{(i-1)} \right) \right] = B_i, \quad (i = N). \quad (14, a)$$

Представляя данную систему в матричном виде $A \vec{\vec{w}}_i = \vec{\vec{B}}_i$ или $\vec{\vec{w}}_i = A^{-1} \vec{\vec{B}}_i$, где $\vec{\vec{B}}_i$ — вектор правых частей системы уравнений (11)—(14); $\vec{\vec{w}}_i$ — вектор ускорений, матрица A принимает вид

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & & \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} & \\ a_{i,i-2} & a_{i,i-1} & a_{i,i} & a_{i,i+1} & a_{i,i+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & a_{n,n-3} & a_{n,n-2} & a_{n,n-1} & a_{n,n} \end{pmatrix}. \quad (14, б)$$

$$a_{1,1} = 1 + 5k, \quad a_{1,2} = -\frac{16}{3}k, \quad a_{1,3} = \frac{1}{3}k, \quad (i = 1).$$

$$a_{2,1} = \frac{k}{12} \left[-16 + \frac{8}{(i-1)} \right], \quad a_{2,2} = \frac{k}{12} \left(31 - \frac{1}{(i-1)} \right), \quad a_{2,3} = \frac{k}{12} \left[-16 - \frac{8}{(i-1)} \right],$$

$$a_{2,4} = \frac{k}{12} \left[1 + \frac{1}{(i-1)} \right], \quad (i = 2).$$

$$a_{i,i-2} = \frac{k}{12} \left[1 - \frac{1}{(i-1)} \right], \quad a_{i,i-1} = \frac{k}{12} \left[-16 + \frac{8}{(i-1)} \right], \quad a_{i,i} = 1 + 2.5k,$$

$$a_{i,i+1} = \frac{k}{12} \left[-16 - \frac{8}{(i-1)} \right], \quad a_{i,i+2} = \frac{k}{12} \left[1 + \frac{1}{(i-1)} \right], \quad (i = 3, \dots, N).$$

$$a_{n,n-3} = \frac{k}{12} \left[1 + \frac{1}{(i-1)} \right], \quad a_{n,n-2} = \frac{k}{12} \left[-4 - \frac{6}{(i-1)} \right], \quad a_{n,n-1} = \frac{k}{12} \left[-6 + \frac{18}{(i-1)} \right],$$

$$a_{n,n} = 1 + \frac{k}{12} \left(20 - \frac{10}{(i-1)} \right), \quad (i = N).$$

9. Решение в рядах Фурье с учетом инерции вращения. Система обыкновенных дифференциальных уравнений (16) с учетом (5) при $\beta \neq 0$:

$$\frac{\partial^2 w_k}{\partial t^2} + \omega_k^2 w_k = \frac{P_k}{1 + 4/3\beta\mu_k^2}, \quad \omega_k^2 = \frac{\mu_k^2}{1 + 4/3\beta\mu_k^2}, \quad (k=1, 2, \dots, \infty), \quad (16, a)$$

решение которой при начальных условиях $w_k = 0, \dot{w}_k = 0$ выглядит следующим образом:

$$w_k = P_k [1 - \cos(\omega_k t)] / \mu_k^2, \quad (17, a)$$

где μ_k — корни уравнения $J_0(\mu_k) = 0$.

В фазе $t \leq t_p$ прогибы, скорости прогибов и ускорения определяются по формулам

$$w_k = \sum_{k=1}^{\infty} P_k [1 - \cos(\omega_k t)] \frac{J_0(\mu_k \rho)}{\mu_k^2}, \quad (18, a)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \sum_{k=1}^{\infty} P_k \sin(\omega_k t) \frac{J_0(\mu_k \rho) \omega}{\mu_k^2}, \quad (19, a)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \sum_{k=1}^{\infty} P_k \cos(\omega_k t) \frac{J_0(\mu_k \rho) \omega^2}{\mu_k^2}. \quad (20, a)$$

Соответствующие формулы в фазе $t \geq t_p$:

$$w_k = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ P_k [\cos \omega_k (t - t_p) - \cos(\omega_k t)] - \frac{4n\xi}{\mu_k J_1(\mu_k)} [1 - \cos \omega_k (t - t_p)] \right\} \frac{J_0(\mu_k \rho)}{\mu_k^2}, \quad (21, a)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ P_k [-\sin \omega_k (t - t_p) + \sin(\omega_k t)] - \frac{4n\xi}{\mu_k J_1(\mu_k)} [\sin \omega_k (t - t_p)] \right\} \frac{J_0(\mu_k \rho) \omega}{\mu_k^2}, \quad (22, a)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ P_k [-\cos \omega_k (t - t_p) + \cos(\omega_k t)] - \frac{4n\xi}{\mu_k J_1(\mu_k)} [\cos \omega_k (t - t_p)] \right\} \frac{J_0(\mu_k \rho) \omega^2}{\mu_k^2}. \quad (23, a)$$

10. Метод конечных разностей повышенной точности с учетом инерции вращения. Согласно (5) при $\beta \neq 0$ система уравнений (7), (8) принимает вид (7, a)—(8, a), где $\vec{B}_i$ — вектор правых частей системы уравнений (11)—(14).

Матрица A остается в прежнем виде.

Расчеты показывают, что в условиях деформирования, близких к стоячей волне (распределение нагрузки по радиусу определяется функцией Бесселя) влияние инерции вращения незначительно и им можно пренебречь. Для равномерно распределенной нагрузки меняется характер деформирова-

ния. Величина остаточного прогиба с учетом инерции вращения уменьшается, время деформирования несколько увеличивается.

Все методы достаточно эффективны. Наиболее эффективным, естественно, является решение в рядах Фурье. Для пластин и оболочек, вследствие моментности напряженного состояния, разложение функции перемещений в ряд Фурье невозможно.

Остаточные прогибы каждой точки мембраны или оболочки определялись из условия обращения в нуль скорости прогиба. Система обыкновенных дифференциальных уравнений (9)—(14) решалась численным методом Рунге — Кутты четвертого порядка точности.

Решение подобной задачи для мембран без учета инерции вращения получено в работе [20]. Остаточные прогибы круглой мембраны в соответствии с (18) определялись, ограничиваясь 10 членами ряда. Решение данной задачи в рядах Фурье по функциям Бесселя на действие равномерно распределенной нагрузки прямоугольного и треугольного типа было получено в работе [21], ограничиваясь одним членом ряда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boyd D. E. Dynamic Deformations of Circular Membranes // J. Eng. Mech. Div. June 1966. NEM3. Pp. 1—16.
2. Griffith J., Vanzant H. Large deformation of circular membranes under static and dynamic loading // Exp. Mechanics: Proc. of the First Int. Congr. on Experimental Mechanics Held in New York. New York, 1961. November 1—3. Pp. 99—109. doi:10.1016/B978-0-08-013346-1.50010-0
3. Munday G., Newitt D. The deformation of transversely loaded disks under dynamic loads // Philos. Trans. Royal Soc. London. 1963. № 1065 (256). Pp. 1—30.
4. Neuberger A., Peles S., Rittel D. Springback of circular clamped armor steel plates subjected to spherical air-blast loading // International Journal of Impact Engineering. 2009. Vol. 36. Iss. 1. Pp. 53—60.
5. Symonds P. S., Wierzbicki T. Membrane Mode Solutions for Impulsively Loaded Circular Plates // Journal of Applied Mechanics. 1979. Vol. 46. Iss. 1. Pp. 58—64. doi:10.1115/1.3424528
6. Dynamic failure of clamped circular plates subjected to an underwater shock / S. Kazemahvazi, D. Radford, V. S. Deshpande, N. A. Fleck // Journal of Mechanics of Materials and Structures. 2007. Vol. 2. Iss. 10. Pp. 2007—2023. DOI: 10.2140/jomms.2007.2.2007
7. Qiu X., Deshpande V. S., Fleck N. A. Dynamic response of a clamped circular sandwich plate subject to shock loading // Journal of Applied Mechanics. 2004. Vol. 71. Iss. 5. Pp. 637—645. doi:10.1115/1.1778416.
8. Кошур В. Д., Немировский Ю. В. Континуальные и дискретные модели динамического деформирования элементов конструкций. Новосибирск: Наука, 1990. 198 с.
9. Немировский Ю. В. Динамическое сопротивление слоистых пластин из вязкопластических и упрочняющихся материалов // Проблемы прочности и пластичности. 2007. Вып. 69. С. 117—124.
10. Галиев Ш. У., Нечитайло А. В. Влияние моментности на динамическое раздувание и прочность пластин // Проблемы прочности. 1984. № 2. С. 59—63.
11. Галиев Ш. У., Нечитайло А. В. Динамика формоизменения пластин в оболочке вращения. Препринт АН УССР. Институт проблем прочности. Киев, 1985. 48 с.
12. Баженов В. Г., Ломунов В. К., Осетров С. Л. Исследование применимости жесткопластической модели в задачах импульсного деформирования упругопластических пластин при малых и больших прогибах // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Механика предельного состояния. 2008. № 1. С. 64—69.
13. Старов А. В. Полная система уравнений динамического ударного нагружения жесткопластических пологих оболочек вращения с учетом больших прогибов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. № 4. С. 26—31.
14. Старов А. В. Динамика пластических оболочек с учетом упрочнения и чувствительности к скорости деформирования // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 36(55). С. 112—118.
15. Ерхов М. И. Теория идеально пластических тел и конструкций. М.: Наука, 1978. 352 с.

16. Ильюшин А. А. Пластичность. М.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
17. Perrone N. On a simplified method of solving impulsively loaded structures of rate sensitive materials // *Journal of Applied Mechanics*. Vol. 32. Iss. 3. Pp. 489—492. doi:10.1115/1.3627249
18. Кошляков Н. С., Глинер Э. Б., Смирнов М. М. Дифференциальные уравнения математической физики. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит.-ры, 1962. 767 с.
19. Березин И. С., Жидков Н. П. Методы вычислений. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит.-ры, 1962. 464 с.
20. Старов А. В. Динамика пластических круглых мембран при кратковременном нагружении нагрузками большой интенсивности // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2008. Вып. 9(28). С. 51—57.
21. Себекина В. И., Дьячков Г. Ф., Старов А. В. Оценка остаточных перемещений круглых плоских мембран при динамическом нагружении // *Исследования по расчету строительных конструкций и надежности сооружений*: сб. науч. тр. ЦНИИСК им. Кучеренко. М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1987. С. 152—163.

© Калашников С. Ю., Старов А. В., 2016

Поступила в редакцию
в январе 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Калашников С. Ю., Старов А. В. Учет инерции вращения в задачах динамики идеально пластических мембран и оболочек вращения при воздействии высокоинтенсивных нагрузок // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 139—150.

Об авторах:

Калашников Сергей Юрьевич — д-р техн. наук, профессор, действительный член Международной академии наук высшей школы, ректор, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Старов Александр Васильевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительной механики, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, starov1954@mail.ru

S. Yu. Kalashnikov, A. V. Starov

ROTARY INERTIA ACCOUNT IN PROBLEMS OF DYNAMICS OF IDEALLY PLASTIC MEMBRANES AND ROTATION SHALLOW SHELLS AT EFFECT OF HIGH-INTENSITY LOADS

The problem of plastic deformation of circular membranes and rotation shallow shells is considered under the effect of high-intensity loads taking into account rotary inertia. The systems of resolving equations are received, the algorithm and the program of numerical realization of the problem on the basis of finite differences method, differential-incremental method, in Fourier series on Bessel's function are developed.

К е у w o r d s: circular membranes and shallow shells, plastic deformation, high-intensity loads, physically and geometrically non-linear problems.

REFERENCES

1. Boyd E. Dynamic deformations of circular membranes. *J. Eng. Mech. Div.*, NEM3, June, 1966, pp. 1—16.
2. Griffith J., Vanzant H. Large deformation of circular membranes under static and dynamic loading. *Experimental Mechanics*. Proc. of the First Int. Congress on Experimental Mechanics Held in New York, November 1—3, 1961. doi:10.1016/B978-0-08-013346-1.50010-0
3. Munday G., Newitt D. The deformation of transversely loaded disks under dynamic loads. *Philos. Trans. Royal Soc.*, London, 1963, 1065 (256), pp. 1—30.
4. Neuberger A., Peles S., Rittel D. Springback of circular clamped armor steel plates subjected to spherical air-blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(1), pp. 53—60.
5. Symonds P. S., Wierzbicki T. Membrane Mode Solutions for Impulsively Loaded Circular Plates. *Journal of Applied Mechanics*, 1979, 46(1), pp. 58—64. doi:10.1115/1.3424528

6. Kazemahvazi S., Radford D., Deshpande V. S., Fleck N. A. Dynamic failure of clamped circular plates subjected to an underwater shock. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2007, 2(10), pp. 2007—2023. DOI: 10.2140/jomms.2007.2.2007
7. Qiu X., Deshpande V. S., Fleck N. A. Dynamic response of a clamped circular sandwich plate subject to shock loading. *Journal of Applied Mechanics*, 2004, 71(5), pp. 637—645. doi:10.1115/1.1778416.
8. Koshur V. D., Nemirovskii Yu. V. *Kontinual'nye i diskretnye modeli dinamicheskogo deformirovaniya elementov konstruksii* [Continuous and discrete models of dynamic strain of structure elements]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 198 p.
9. Nemirovskii Yu. V. [Dynamic resistance of laminated plates of viscoplastic and hardening materials]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity], 2007, 69, pp. 117—124.
10. Galiev Sh. U., Nechitailo A. V. Effect of instantaneous stressed state on dynamic inflation and strength of plates. *Strength of Materials*, February 1984, 16(2), pp. 219—223.
11. Galiev Sh. U., Nechitailo A. V. *Dinamika formoizmeneniya plastin v obolochke vrashcheniya* [Plate deformation dynamics in rotary shell. AS USSR Pre-print]. Kiev, 1985. 48 p.
12. Bazhenov V. G., Lomunov V. K., Osetrov S. L. [Study of applicability of rigid-plastic model in problems of impulse strain of elasto-plastic plates at small and large deflections]. *Vestnik ChGPU im. I. Ya. Yakovleva. Mekhanika predel'nogo sostoyaniya* [Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State], 2008, no. 1, pp. 64—69.
13. Starov A. V. [The complete system of equations of dynamic loading ideal plastic shallow shells of revolution with taking into account large displacements]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings], 2011, no. 4, pp. 26—31.
14. Starov A. V. [Plastic deformation of circular plates with the rigid fixing of the edge under local loading by a rigid press tool]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 36(55), pp. 112—118.
15. Erkhov M. I. *Teoriya ideal'no plasticheskikh tel i konstruksii* [Theory of ideally plastic bodies and structures]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 352 p.
16. Il'yushin A. A. *Plastichnost'* [Plasticity]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1948. 376 p.
17. Perrone N. On a simplified method of solving impulsively loaded structures of rate sensitive materials. *Journal of Applied Mechanics*, 32(3), pp. 489—492. doi:10.1115/1.3627249
18. Koshlyakov N. S., Gliner E. B., Smirnov M. M. *Differentsial'nye uravneniya matematicheskoi fiziki* [Differential equations of mathematical physics]. Moscow, State Publishing House of Physics and Mathematics Literature, 1962. 767 p.
19. Berezin I. S., Zhidkov N. P. *Metody vychislenii* [Calculation methods]. Moscow, State Publishing House of Physics and Mathematics Literature, 1962. 464 p.
20. Starov A. V. [Dynamics of plastic round membranes charged with short-term highly-intensive loads]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2008, iss. 9(28), pp. 51—57.
21. Sebekina V. I., D'yachkov G. F., Starov A. V. [Assessment of residual movements of round flat membranes at dynamic load]. *Issledovaniya po raschetu stroitel'nykh konstruksii i nadezhnosti sooruzhenii: sb. nauch. tr. TsNIISK im. Kucherenko* [Researches on design of engineering structures and safety of constructions. Set of scientific works of TsNIISK named after V. Kucherenko]. Moscow, TsNIISK named after V. Kucherenko, 1987. Pp. 152—163.

For citation:

Kalashnikov S. Yu., Starov A. V. [Rotary inertia account in problems of dynamics of ideally plastic membranes and rotation shallow shells at effect of high-intensity loads]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 139—150.

About authors:

Kalashnikov Sergei Yur'evich — Doctor of Engineering Science, Professor, Academician of the International Higher Education Academy of Sciences, rector, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Starov Aleksandr Vasil'evich — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Structural Mechanics Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, starov1954@mail.ru

УДК 624.072.2:539.214

С. Ю. Калашников, А. В. Старов

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ТЕОРЕМЫ О ВЗАИМНОСТИ ДЛЯ КРУГЛЫХ МЕМБРАН И БЕЗМОМЕНТНЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Сформулированы теоремы о взаимности мощностей внешней нагрузки и мощностей диссипации энергии, аналогичные теореме о взаимности внешних и внутренних работ в упругих системах (теорема Бетти), позволяющие выполнять расчет круглых мембран и безмоментных оболочек под действием распределенной по любому закону осесимметричной нагрузки на действие приведенной или эквивалентной равномерно распределенной нагрузки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: круглые мембраны и безмоментные оболочки, пластическое деформирование, осесимметричные нагрузки, физически и геометрически нелинейные задачи.

Алгоритмы расчета пластин, круглых мембран и безмоментных оболочек на основе метода предельного равновесия при квазистатическом действии нагрузки в линейной и нелинейной постановках рассмотрены в работах [1—6].

Рассмотрим деформирование круглых мембран и безмоментных оболочек под действием распределенной по любому закону осесимметричной нагрузки $P = P_0 \psi(\rho)$, где P_0 — максимальная интенсивность нагрузки.

Уравнения равновесия безмоментных оболочек в полярной системе координат с учетом допущений теории пологих оболочек записываются в безразмерном виде [7]:

$$n_2 - \frac{\partial}{\partial \rho}(\rho n_1) = 0, \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho n_1 \left(\frac{\partial w}{\partial \rho} + \frac{\partial f}{\partial \rho} \right) \right] - P(\rho) = 0. \quad (1)$$

Граничные условия: $n_1(0) = n_2(0)$, $\frac{\partial w}{\partial \rho}(0) = 0$, $w(1) = 0$, $u(1) = 0$.

Здесь вводятся безразмерные координаты и переменные:

$\rho = \bar{\rho}/\rho_0$ — радиус-вектор произвольной точки срединной поверхности;

ρ_0 — радиус опорного контура;

$2h$ — толщина;

$w = 2\bar{w}/h$, $u = 4\bar{u}\rho_0/h^2$ — прогиб и радиальное перемещение;

$n_i = \bar{N}_i/2\sigma_s h$ — продольные усилия;

$P = \bar{P}\rho_0/\sigma_s h^2$ — параметр внешней нагрузки;

σ_s — предел текучести материала;

$i = 1, 2$ — индексы радиального и окружного направления;

$f = f(\rho)$, $\bar{f} = \bar{f}(\bar{\rho})$, $f = 2\bar{f}/h$ — уравнение срединной поверхности

в безразмерных и размерных координатах;

$\xi = 2\rho_0^2/Rh = 4\bar{f}_0/h$ — параметр начальной кривизны;

$R = (\bar{\rho}_0^2 + \bar{f}_0^2)/2\bar{f}_0$ — радиус кривизны сферической оболочки.

На размерность соответствующей величины указывает горизонтальная черта. Выражения для деформаций и изменения кривизны срединной поверхности имеют вид

$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon}_1 &= \frac{h^2}{4\rho_0^2} \left(\frac{\partial u}{\partial \rho} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial \rho} \right)^2 - w \frac{\partial f^2}{\partial \rho^2} \right), \quad \bar{\varepsilon}_2 = \frac{h^2}{4\rho_0^2} \left(\frac{u}{\rho} - w \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} \right), \\ \bar{\chi}_1 &= -\frac{h}{2\rho_0^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2}, \quad \bar{\chi}_2 = -\frac{h}{2\rho_0^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial w}{\partial \rho}.\end{aligned}\quad (2)$$

Мощность внешней нагрузки и мощность диссипации энергии в безразмерном виде определяется по формуле

$$A = \int_0^1 P_0 \psi \dot{w} \rho d\rho, \quad D = \int_0^1 (\dot{\varepsilon}_1 n_1 + \dot{\varepsilon}_2 n_2 + \dot{\chi}_1 m_1 + \dot{\chi}_2 m_2) \rho d\rho, \quad (3)$$

где $A = \frac{2\bar{A}}{\sigma_s h^3}$, $D = \frac{2\bar{D}}{\sigma_s h^3}$, $\varepsilon_i = \frac{4\dot{\varepsilon}_i \rho_0^2}{h^2}$, $\dot{\chi}_i = \frac{2\dot{\chi}_i \rho_0^2}{h}$ — безразмерные мощность внешней нагрузки, скорость диссипации, скорости деформаций и скорости измерения кривизны срединной поверхности.

Поверхность текучести для безмоментных оболочек со сплошным однослойным сечением, построенная на основе условия пластичности Мизеса [8],

$$n_1^2 - n_1 n_2 + n_2^2 = 1 \quad (4)$$

или поверхности нагружения, аналогичной поверхности текучести [8],

$$n_1^2 - n_1 n_2 + n_2^2 = n^2 = \Phi^2(\varepsilon_i), \quad \Phi(\varepsilon_i) = 1 + \frac{E^k}{\sigma_s^0} \varepsilon_i, \quad (4a)$$

где E^k — касательный модуль упрочнения; $\Phi(\varepsilon_i)$ — функция упрочнения.

Из первого уравнения (1) и (4) следует единственное решение $n_1 = n_2 = n = \Phi(\varepsilon_i)$, тогда распределение перемещений

$$w = w_0 - \frac{P_0}{n} \int_0^\rho \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi \eta d\eta d\eta + \xi \frac{\rho^2}{2}, \quad \frac{P_0}{n} = \left(w_0 + \frac{\xi}{2} \right) \left(\int_0^1 \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi \eta d\eta d\eta \right)^{-1}. \quad (5)$$

Распределение перемещений и скоростей перемещений, согласно (5),

$$w = w_0 \left[1 - \frac{\int_0^\rho \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \eta d\eta d\eta}{\int_0^1 \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi \eta d\eta d\eta} \right] + \frac{\xi}{2} \left[\rho^2 - \frac{\int_0^\rho \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi \eta d\eta d\eta}{\int_0^1 \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi \eta d\eta d\eta} \right], \quad (6)$$

$$\dot{w} = \dot{w}_0 \left[1 - \frac{\int_0^\rho \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi \eta d\eta d\eta}{\int_0^1 \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi \eta d\eta d\eta} \right]^{-1}. \quad (7)$$

Рассмотрим два механизма деформирования, соответствующие нагрузкам $P_{0,i}\psi_i$, $i=1,2$. Мощность внешней нагрузки $P_{0,1}$ (3), (5), (6) на скоростях перемещений, соответствующих механизму ψ_2 (7), равна

$$A = n \int_0^1 \left\{ \left(w_0 + \frac{\xi}{2} \right) \psi_1 \left(\int_0^1 \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi_1 \eta d\eta d\eta \right)^{-1} \dot{w}_0 \left[1 - \frac{\int_0^1 \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi_2 \eta d\eta d\eta}{\int_0^1 \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi_2 \eta d\eta d\eta} \right] \right\} \eta d\eta. \quad (8, a)$$

Интегрируя (8, a) по частям, получим

$$A = n \left(w_0 + \frac{\xi}{2} \right) \dot{w}_0 \int_0^1 \left\{ \int_0^\rho \psi_1 \eta d\eta \int_0^\rho \psi_2 \eta d\eta \left(\int_0^1 \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi_1 \eta d\eta d\eta \int_0^1 \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi_2 \eta d\eta d\eta \right)^{-1} \right\} \frac{d\eta}{\eta}.$$

Последнее выражение не зависит от последовательности индексов 1 и 2. Таким образом, можно сформулировать теорему о взаимности мощностей внешней нагрузки, аналогичной теореме о взаимности работ в упругих системах [9].

Мощность внешней нагрузки, соответствующая механизму 1 на скоростях перемещений, соответствующих механизму 2, равна мощности внешней нагрузки, соответствующей механизму 2 на скоростях перемещений, соответствующих механизму 1.

Мощность диссипации энергии согласно (3) после интегрирования по частям равна

$$D = n \int_0^1 \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} \left(\frac{\partial w}{\partial \rho} - \xi \rho \right) \rho d\rho. \quad (8, б)$$

Подставляя в (8, б) перемещения и скорости перемещений согласно (6) и (7), найдем, что $A = D$ и соответственно

$$D = n \left(w_0 + \frac{\xi}{2} \right) \dot{w}_0 \int_0^1 \left\{ \int_0^\rho \psi_1 \eta d\eta \int_0^\rho \psi_2 \eta d\eta \left(\int_0^1 \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi_1 \eta d\eta d\eta \int_0^1 \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi_2 \eta d\eta d\eta \right)^{-1} \right\} \frac{d\eta}{\eta}.$$

Вторая теорема формулируется аналогично.

Мощность диссипации энергии, соответствующая механизму 1 на скоростях перемещений, соответствующих механизму 2, равна мощности диссипации энергии, соответствующей механизму 2, на скоростях перемещений, соответствующих механизму 1.

Согласно этим теоремам расчет круглых мембран и безмоментных оболочек под действием распределенной по любому закону осесимметричной нагрузки $P = P_0 \psi(\rho)$ можно производить на действие приведенной или эквивалентной равномерно распределенной нагрузки:

$$P^* = P_0 \int_0^1 \psi (1 - \eta^2) \eta d\eta \left[1 - \int_0^1 \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi \eta d\eta d\eta \left(\int_0^1 \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \psi \eta d\eta d\eta \right)^{-1} \right]^{-1}, \quad (9)$$

что значительно упрощает громоздкие математические выкладки.

Далее приводятся решения для круглых мембран и безмоментных оболочек на действие распределенной по любому закону осесимметричной нагрузки, которые также можно получить непосредственно из уравнений (1).

Нагрузка вида $P = P_0 \psi(\rho)$, $\psi(\rho) = \rho^\alpha$ ($0 \leq \alpha \leq \infty$):

$$w = w_0 \left(1 - \rho^{\alpha+2}\right) + \frac{\xi}{2} \left(\rho^2 - \rho^{\alpha+2}\right), \quad w_0 + \frac{\xi}{2} = \frac{P_0}{4n} \frac{4}{(\alpha+2)^2}. \quad (10)$$

Эквивалентная равномерно распределенная нагрузка и минимальное значение P_0 :

$$P^* = P_0 \frac{4}{(\alpha+2)^2}, \quad P_0^{\min} = 2n\xi \frac{(\alpha+2)^2}{4}. \quad (11)$$

Нагрузка вида $P = P_0 \psi(\rho)$, $\psi(\rho) = (1 - \rho^\alpha)$ ($0 \leq \alpha \leq \infty$):

$$w = w_0 \left(1 - \frac{(\alpha+2)^2}{(\alpha^2+4\alpha)} \rho^2 + \frac{4}{(\alpha^2+4\alpha)} \rho^{\alpha+2}\right) - \frac{4\xi}{2(\alpha^2+4\alpha)} (\rho^2 - \rho^{\alpha+2}),$$

$$w_0 + \frac{\xi}{2} = \frac{P_0}{4n} \frac{(\alpha^2+4\alpha)}{(\alpha+2)^2}. \quad (12)$$

Эквивалентная равномерно распределенная нагрузка и минимальное значение P_0 :

$$P^* = P_0 \frac{(\alpha^2+4\alpha)}{(\alpha+2)^2}, \quad P_0^{\min} = 2n\xi \frac{(\alpha+2)^2}{(\alpha^2+4\alpha)}. \quad \dots\dots\dots(13)$$

Нагрузка вида

$P(\rho) = 0$ ($0 \leq \rho \leq a$), $P(\rho) = P$ ($a \leq \rho \leq b$), $P(\rho) = 0$ ($b \leq \rho \leq 1$):

$$w = w_0 + \frac{\xi \rho^2}{2}, \quad (0 \leq \rho \leq a),$$

$$w = w_0 - \frac{P}{4n} \left[(\rho^2 - a^2) - 2a^2 \ln \frac{\rho}{a} \right] + \frac{\xi \rho^2}{2}, \quad (a \leq \rho \leq b),$$

$$w = w_0 - \frac{P}{4n} \left[(b^2 - a^2) - 2(b^2 \ln b - a^2 \ln a) + 2(b^2 - a^2) \ln \rho \right] + \frac{\xi \rho^2}{2},$$

$$(b \leq \rho \leq 1), \quad w_0 + \frac{\xi}{2} = \frac{P}{4n} \left[(b^2 - a^2) - 2(b^2 \ln b - a^2 \ln a) \right]. \quad (14)$$

Эквивалентная равномерно распределенная нагрузка и минимальное значение P_0 :

$$P^* = P \left[(b^2 - a^2) - 2(b^2 \ln b - a^2 \ln a) \right],$$

$$P_0^{\min} = 2n\xi \left[(b^2 - a^2) - 2(b^2 \ln b - a^2 \ln a) \right]^{-1}. \quad (15)$$

При расчете оболочек с учетом моментного напряженного состояния на действие распределенной по любому закону осесимметричной нагрузки (решение для пластин получено в [10—13]), если интенсивность нагрузки $P(\rho) < 2n\xi$, то образуются жесткие зоны в центральной или приопорной части или одновременно. Решения данных задач в аналитическом виде для оболочек с шарнирно неподвижным опиранием и жестким защемлением края получено, однако в связи с увеличением параметров оказалось слишком громоздким. Численное решение (для пластин получено в [14, 15]) в связи с необходимостью отслеживать положение подвижных жестких зон также значительно усложняется. На основании доказанных теорем и с учетом, что оболочка стремится к безмоментному напряженному состоянию, можно выполнять расчет, заменяя параметр начальной кривизны на приведенный или эквивалентный.

Для нагрузок $P = P_0\psi(\rho)$, $\xi^*(\rho) = \xi_0^* \cdot \psi(\rho)$:

$$\xi_0^* = \xi \frac{(\alpha + 2)^2}{4}, \quad \psi(\rho) = \rho^\alpha \quad (0 \leq \alpha \leq \infty), \quad (16)$$

$$\xi_0^* = \xi \frac{(\alpha + 2)^2}{(\alpha^2 + 4\alpha)}, \quad \psi(\rho) = (1 - \rho^\alpha) \quad (0 \leq \alpha \leq \infty), \quad (17)$$

$$\xi_0^* = \xi \left[(b^2 - a^2) - 2(b^2 \ln b - a^2 \ln a) \right]^{-1}, \quad (18)$$

$$\psi(\rho) = 0 \quad (0 \leq \rho \leq a), \quad \psi(\rho) = 1 \quad (a \leq \rho \leq b), \quad \psi(\rho) = 0 \quad (b \leq \rho \leq 1).$$

Решения статических и динамических задач пластических круглых мембран и без моментных оболочек на основе баланса мощностей диссипации энергии и внешней нагрузки [16, 17] или непосредственного интегрирования исходной системы нелинейных уравнений [18—23] достаточно сложны для численного анализа. На основании доказанных теорем можно выполнять статический расчет на действие приведенной или эквивалентной равномерно распределенной нагрузки, а в задачах динамики раскладывать нагрузку по собственным векторам однородной системы дифференциальных уравнений.

Выводы. Сформулированы теоремы о взаимности мощностей внешней нагрузки и мощностей диссипации энергии, аналогичные теореме о взаимности внешних и внутренних работ в упругих системах (теорема Бетти [9]), позволяющие выполнять расчет круглых мембран и безмоментных оболочек под действием распределенной по любому закону осесимметричной нагрузки на действие приведенной или эквивалентной равномерно распределенной нагрузки.

Второе видимое применение доказанных теорем — возможность выполнять расчет, заменяя параметр начальной кривизны на приведенный или эквивалентный, что значительно упрощает аналитические и численные алгоритмы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безухов Н. Н. Расчет за пределом упругости, несущая способность и предельное состояние сооружений // Строительная механика в СССР, 1917—1967. М.: Стройиздат, 1969. С. 212—238.
2. Болотин В. В., Гольденблат И. И., Смирнов А. Ф. Строительная механика. Современное состояние и перспективы развития. М.: Стройиздат, 1972. 191 с.
3. Гвоздев А. А., Проценко А. М. Перспективы приложения теории предельного равновесия для оболочек // Труды VII Всесоюзной конф. по теории оболочек и пластинок (Днепропетровск, 1969 г.). М.: Наука, 1970. С. 736—748.
4. Ольшак В., Савчук А. Неупругое поведение оболочек. М.: Мир, 1969. 144 с.
5. Ольшак В., Мруз З., Пежина П. Современное состояние теории пластичности. М.: Мир, 1964. 243 с.
6. Ржаницын А. Р. Предельное равновесие пластинок и оболочек. М.: Наука, 1983. 288 с.
7. Вольмир А. С. Гибкие пластинки и оболочки. М.: Гостехиздат, 1956. 419 с.
8. Ерхов М. И. Теория идеально-пластических тел и конструкций. М.: Наука, 1978. 352 с.
9. Дарков А. В., Шапошников Н. Н. Строительная механика: учебник для строит. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1986. 607 с.
10. Старов А. В. Пластические деформации круглых пластинок с шарнирным опиранием под действием осесимметричной нагрузки // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 29(48). С. 102—109.
11. Старов А. В. Большие прогибы жесткопластических защемленных по контуру круглых пластинок под действием осесимметричной нагрузки // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. № 2. С. 9—15.
12. Ерхов М. И., Старов А. В. Большие прогибы круглых идеально пластических пластинок при локальном нагружении // Строительная механика и расчет сооружений. 1988. № 6. С. 15—20.
13. Старов А. В. Пластическое деформирование круглых пластинок с жестким защемлением края при локальном нагружении // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 34(53). С. 99—106.
14. Старов А. В. Большие прогибы жесткопластических круглых пластинок с шарнирно неподвижным опиранием края // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2007. Вып. 8(27). С. 48—54.
15. Старов А. В. Большие прогибы жесткопластических пологих оболочек вращения с шарнирно неподвижным опиранием и жестким защемлением края // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2010. Вып. 20(39). С. 45—51.
16. Ge Wang, Hideomi Ohtsubo, Kikuo Arita. Large Deflection of a Rigid Plastic Circular Plate Pressed by a Sphere // J. Appl. Mech. 1998. V. 65. Iss. 2. Pp. 533—535. doi:10.1115/1.2789089.
17. Zaid M. On the carrying capacity of plates of arbitrary shape and variable fixity under a concentrated // J. Appl. Mech. 1958. 25. Pp. 598—602.
18. Nemirovsky Yu. V., Yankovsky A. P. Viscoplastic deformation of reinforced plates with varying thickness under explosive loads // International Applied Mechanics. 2008. Vol. 44. Iss 2. Pp. 188—199.
19. Nemirovsky Yu. V., Yankovsky A. P. Viscoplastic dynamics of isotropic plates of variable thickness under explosive loading // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2007. Vol. 48. Iss. 2. Pp. 250—259.
20. Nemirovskii Yu. V., Romanova T. P. Behavior of rigid-plastic polygonal plates with a rigid insert under blast loads // International Applied Mechanics. 2008. Vol. 44. Iss. 1. Pp. 81—90.
21. Romanova T. P., Nemirovsky Yu. V. Dynamic rigid-plastic deformation of arbitrarily shaped plates // Journal of Mechanics of Materials and Structures. 2008. Vol. 3. Iss. 2. Pp. 313—334.
22. Nemirovsky Y. V., Romanova T. P. Dynamic deformation of rigid-plastic curvilinear plates of variable thickness // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2007. Vol. 48. Iss. 5. Pp. 712—722.
23. Nemirovsky Y. V., Romanova T. P. Dynamic deformation of a curved plate with a rigid insert // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2006. Vol. 47. Iss 2. Pp. 254—265.

© Калашников С. Ю., Старов А. В., 2016

Поступила в редакцию
в январе 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Калашников С. Ю., Старов А. В. Теоремы о взаимности для круглых мембран и безмоментных оболочек при квазистатическом нагружении // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 151—158.

Об авторах:

Калашников Сергей Юрьевич — д-р техн. наук, профессор, действительный член Международной академии наук высшей школы, ректор, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1.

Старов Александр Васильевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1. starov1954@mail.ru

S. Yu. Kalashnikov, A. V. Starov

THEOREMS OF RECIPROCITY FOR CIRCULAR MEMBRANES AND MOMENTLESS SHELLS UNDER QUASISTATIC LOAD

Theorems of reciprocity of powers of external load and powers of energy dissipation, similar to the theorem of reciprocity of external and internal work in elastic systems (the theorem of Betty) are formulated. These theorems allow to calculate circular membranes and momentless shells under the influence of the ax symmetrical load distributed by any law on action of reduced or equivalent evenly distributed load.

К е y w o r d s: circular membrane and momentless shells, plastic deformation, ax symmetrical loads, physically and geometrically non-linear problems.

REFERENCES

1. Bezukhov N. N. [Calculation free of elasticity, bearing capacity and limit state of constructions]. *Stroitel'naya mekhanika v SSSR, 1917—1967* [Structural mechanics in the USSR, 1917—1967]. Moscow, Stroizdat Publ., 1969. Pp. 212—238.
2. Bolotin V. V., Gol'denblat I. I., Smirnov A. F. *Stroitel'naya mekhanika. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Structural mechanics. Current state and further development]. Moscow, Stroizdat Publ., 1972. 191 p.
3. Gvozdev A. A., Protzenko A. M. [Prospects of application of the limit equilibrium theory for shells]. *Trudy VP Vsesoyuznoi konf. po teorii obolochek i plastinok (Dnepropetrovsk, 1969 g.)* [Works of VII All-Union conf. on the theory of shells and plates (Dnepropetrovsk, 1969)]. Moscow, Nauka Publ., 1970. Pp. 736—748.
4. Ol'shak V., Savchuk A. *Neuprugoe povedenie obolochek* [Anelasticity of shells]. Moscow, Mir Publ., 1969. 144 p.
5. Ol'shak V., Mruz Z., Pezhina P. *Sovremennoe sostoyanie teorii plastichnosti* [Current state of the plasticity theory]. Moscow, Mir Publ., 1964. 243 p.
6. Rzhantsyn A. R. *Predel'noe ravновесие plastinok i obolochek* [Limit equilibrium of plates and shells]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 288 p.
7. Vol'mir A. S. *Gibkie plastinki i obolochki* [Flexible plates and shells]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1956. 419 p.
8. Erkhov M. I. *Teoriya ideal'no-plasticheskikh tel i konstruksii* [Theory of ideally plastic bodies and structures]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 352 p.
9. Darkov A. V., Shaposhnikov N. N. *Stroitel'naya mekhanika* [Structural mechanics]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1986. 607 p.
10. Starov A. V. [Plastic deforming of circular plates with hinger support under the action of axissymmetric loading]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2012, iss. 29(48), pp. 102—109.

11. Starov A. V. [Large displacements of rigid-and-plastic round plates rigidly fixed along the contour and subjected to axisymmetric loading]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings], 2011, no. 2, pp. 9—15.
12. Erkhov M. I., Starov A. V. [Large deflections of round ideally plastic plates at local load]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions], 1988, no. 6, pp. 15—20.
13. Starov A. V. [Plastic deformation of circular plates with rigid fixing of the edge at local loading]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2013, iss. 34(53), pp. 99—106.
14. Starov A. V. [Large deflections of round rigid-plastic plates with the hinged-fixed support at the edge]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2007, iss. 8(27), pp. 48—54.
15. Starov A.V. [Large hogs of rigid plastic shallow shells of revolution with hinged-fixed buttress and rigidly fixing edge]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2010, iss. 20(39), pp. 45—51.
16. Ge Wang, Hideomi Ohtsubo, Kikuo Arita. Large Deflection of a Rigid Plastic Circular Plate Pressed by a Sphere. *J. Appl. Mech.*, 1998. 65(2), pp. 533—535. doi:10.1115/1.2789089.
17. Zaid M. On the carrying capacity of plates of arbitrary shape and variable fixity under a concentrated. *J. Appl. Mech.*, 1958, 25, pp. 598—602.
18. Nemirovsky Yu. V., Yankovsky A. P. Viscoplastic deformation of reinforced plates with varying thickness under explosive loads. *International Applied Mechanics*, 2008, 44(2), pp. 188—199.
19. Nemirovsky Yu. V., Yankovsky A. P. Viscoplastic dynamics of isotropic plates of variable thickness under explosive loading. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2007, 48(2), pp. 250—259.
20. Nemirovskii Yu. V., Romanova T. P. Behavior of rigid-plastic polygonal plates with a rigid insert under blast loads. *International Applied Mechanics*, 2008, 44(1), pp. 81—90.
21. Romanova T. P., Nemirovsky Yu. V. Dynamic rigid-plastic deformation of arbitrarily shaped plates. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2008, 3(2), pp. 313—334.
22. Nemirovsky Y. V., Romanova T. P. Dynamic deformation of rigid-plastic curvilinear plates of variable thickness. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2007, 48(5), pp. 712—722.
23. Nemirovsky Y. V., Romanova T. P. Dynamic deformation of a curved plate with a rigid insert. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2006, 47(2), pp. 254—265.

For citation:

Kalashnikov S. Yu., Starov A. V. [Theorems of reciprocity for circular membranes and momentless shells under quasistatic load]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 151—158.

About authors:

Kalashnikov Sergei Yur'evich — Doctor of Engineering Science, Professor, Academician of the International Higher Education Academy of Sciences, rector, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Starov Aleksandr Vasil'evich — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Structural Mechanics Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, starov1954@mail.ru

УДК 624.042.8

С. В. Харланова, В. А. Пшеничкина, В. Л. Харланов

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

АНАЛИЗ ИНТЕНСИВНОСТИ КАЛИФОРНИЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 24.08.2014

Исследованы акселерограммы сильного калифорнийского землетрясения, произошедшего в 2014 году. Рассмотрены различные критерии определения интенсивности землетрясения. Предположительная интенсивность землетрясения составила 9...10 баллов по шкале МСК-64. Проведено сравнение классических критериев — максимального ускорения и спектрального состава акселерограммы с предложенными разными исследователями критериями: интенсивностью Ариаса, абсолютной кумулятивной скоростью, удельной плотности энергии. Построены спектры реакций линейных и нелинейных осцилляторов.

Ключевые слова: интенсивность землетрясения, энергетические критерии, линейный осциллятор, нелинейный осциллятор, малоцикловая усталость.

24 августа 2014 г. в Калифорнии, в районе города Напа (Napa) произошло землетрясение магнитудой 6 по шкале MW^1 . В табл. 1 представлены основные характеристики исследуемого землетрясения.

Таблица 1

Широта	Долгота	Глубина очага, км	Магнитуда
38,22°	122,11°	11,3	6,0

Наибольшая интенсивность зарегистрирована на трех станциях, расположенных вблизи эпицентра. Характеристики акселерограмм по станциям представлены в табл. 2.

Таблица 2

Станция	Эпицентральное расстояние, км	Длина записи, с	Максимальные амплитуды по направлениям, в долях от g
Crockett-Carquinez Br Geotech Array # 1	19,6	150	С—Ю: 5,07g. З—В: 9,6g. Вертикальное: 3,099g
Crockett-Carquinez Br Geotech Array # 2	19,5	150	С—Ю: 1,74g. З—В: 4,16g. Вертикальное: 1,69g
NAPA: Fire Station No.3	12,3	420	С—Ю: 4,18g. З—В: 4,03g. Вертикальное: 3,16g

¹ 8.0 km (5.0 mi) SSW of Napa, CA 08/24/2014 03:20:44 PDT 72282711 6.0// <http://www.strongmotioncenter.org/cgi-bin/CESMD>.

Акселерограммы имеют продолжительность в 150 с и 420 с. Для исследования акселерограмм наибольший интерес представляют участки с максимальной амплитудой. Для станций Crockett-Carquinez Br Geotech Array#1 и Crockett-Carquinez Br Geotech Array#2 они составляют 12 с, для станции NAPA: Fire Station No.3 — 60 с. Интервал записи для всех акселерограмм составляет 0,01 с.

Каждая акселерограмма состоит из трех компонент: С—Ю, В—З и вертикальной. Грунты основания по американской классификации сейсмических свойств относятся: к классу *D* (жесткая почва) для станции Crockett-Carquinez Br Geotech Array#1, к классу *D/E* (жесткая почва/ мягкая глинистая почва) для станции Crockett-Carquinez Br Geotech Array#2 и классу *E* (мягкая глинистая почва) для станции NAPA: Fire Station No.3.

Рассмотрим корреляционную зависимость компонент акселерограмм. Коэффициент корреляции можно оценить по выборочным данным следующим образом [1—3]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}},$$

где $\bar{x}, \bar{y}$ — соответственно средние значения рядов x_i, y_i ($i = 1, 2, \dots, N$).

Результаты анализа представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

1	В—З	С—Ю	2	В—З	С—Ю	3	В—З	С—Ю
С—Ю	–0,01	—	С—Ю	–0,032	—	С—Ю	–0,207	—
Вертик.	0,0642	0,036	Вертик.	–0,176	0,096	Вертик.	0,156	0,001

Анализируя табл. 3, можно увидеть, что статистическая линейная зависимость между компонентами акселерограммы отсутствует.

Построим результирующие акселерограммы, учитывающие все три компоненты. Способ построения результирующей акселерограммы:

1. По трем компонентам определяется максимальная амплитуда

$$a_{\max} = \max_{i=1..n} \sqrt{\ddot{x}_i^2 + \ddot{y}_i^2 + \ddot{z}_i^2}, \quad (1)$$

где $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$ — амплитуды акселерограммы по направлениям; n — количество точек акселерограммы.

2. Определяются направляющие косинусы

$$\alpha = \ddot{x} / a_{\max}, \quad \beta = \ddot{y} / a_{\max}, \quad \gamma = \ddot{z} / a_{\max}, \quad (2)$$

где $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ — ординаты, соответствующие максимальной амплитуде (1).

3. Вычисляются ординаты акселерограммы главного направления с учетом трех компонент

$$\ddot{x}_{g,i} = \alpha \ddot{x}_i + \beta \ddot{y}_i + \gamma \ddot{z}_i. \quad (3)$$

На рис. 1—3 представлены соответственно результирующие акселерограммы каждой станции, вычисленные по формулам (1)—(3):

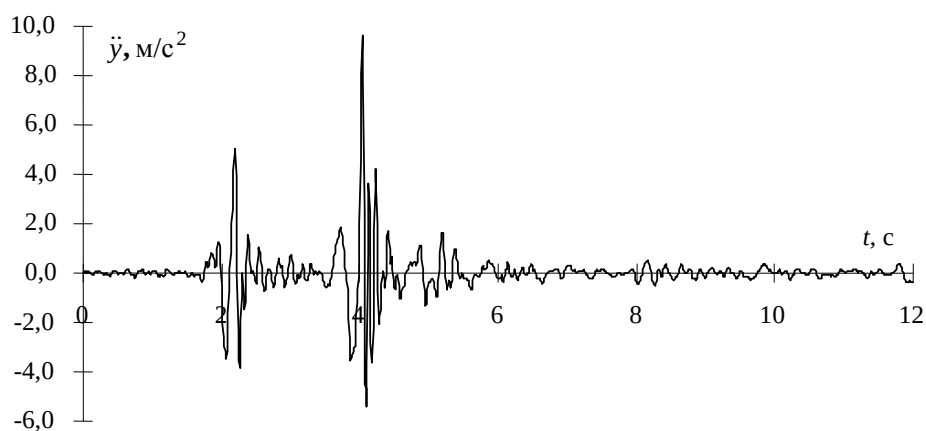


Рис. 1. Результирующая акселерограмма станции Crockett-Carquinez Br Geotech Array#1

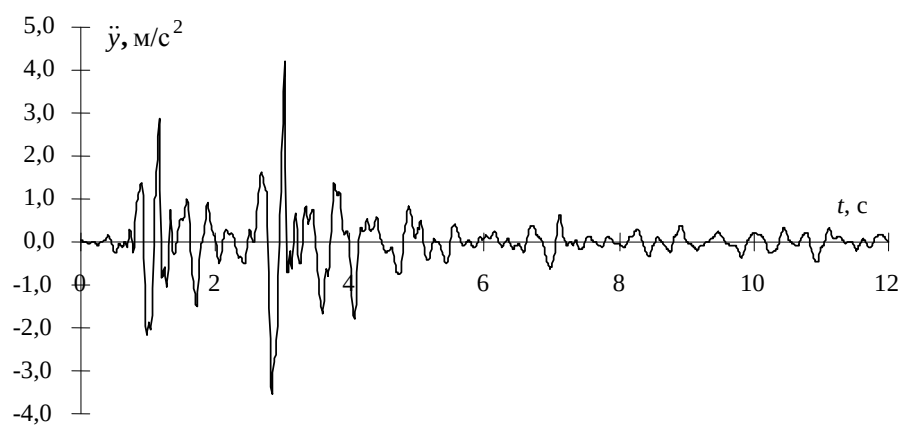


Рис. 2. Результирующая акселерограмма станции Crockett-Carquinez Br Geotech Array#2

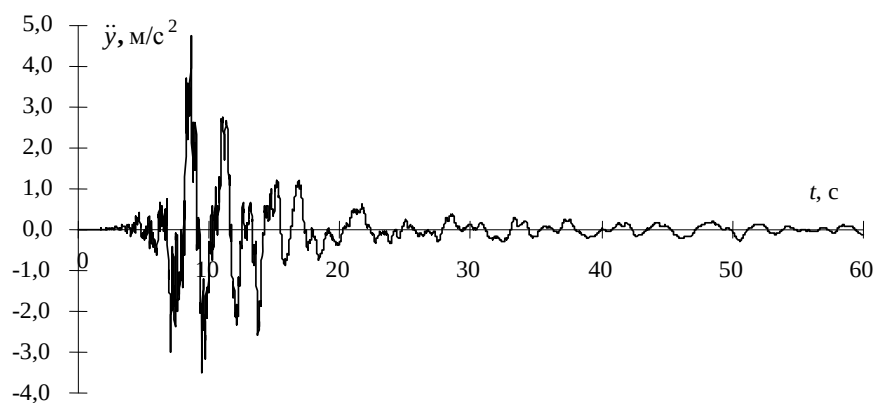


Рис. 3. Результирующая акселерограмма станции NAPA: Fire Station No.3

Интенсивность землетрясения в баллах устанавливается по результатам обследования зданий и сооружений в зависимости от нанесенных повреждений. В открытых источниках нет данных по интенсивности данного землетрясения в районе нахождения сейсмостанций. Судя по фотографиям локальных обрушений можно оценить интенсивность землетрясения 8...9 баллов по шкале МСК-64 [4]. По действующим нормам РФ² критерий бальности определяется по формуле

$$\text{Балл} = 1,44 \ln(\ddot{y}_{o, \max}) + 7, R^2 = 0,7,$$

где R^2 — коэффициент детерминации.

Таким образом, интенсивность землетрясения по шкале МСК-64 для станции Crockett-Carquinez Br Geotech Array#1 равна 10 баллам, для станций Crockett-Carquinez Br Geotech Array#2 и NAPA: Fire Station No.3 — 9 баллам.

В последнее время предложены дополнительные критерии интенсивности, интерпретирующие исключительно акселерограммы землетрясений. Эти критерии подразделяются на три группы:

Первая группа — энергетические критерии — абсолютная кумулятивная скорость (CAV) или критерий импульса³:

$$\text{CAV} = \int_0^t |\ddot{y}_o(t)| dt; \quad (4)$$

интенсивность Ариаса [5]:

$$I_A = \int_0^t \ddot{y}_o(t)^2 dt; \quad (5)$$

удельная плотность энергии (SED)⁴:

$$\text{SED} = \int_0^t (\dot{y}(t))^2 dt. \quad (6)$$

В формулах (4)—(6) $\ddot{y}_o(t)$ — акселерограмма свободной поверхности, $\dot{y}(t)$ — велосигграмма землетрясения, найденная из акселерограммы методом прямого интегрирования.

Вторая группа, характеризующая спектральный состав акселерограммы, включает резонансную частоту акселерограммы $f_{\text{рез}}$ [6], максимальную ординату спектра реакции линейного осциллятора $S_{\beta \max}$ и среднюю величину коэффициента динамичности $S_{\beta \text{ср}}$ в диапазоне 0,25...25 Гц.

² SP 14.13330.2011. Stroitelstvo v sejsmicheskix rajonax / Aktualizirovannaja redakcija SNiP II-7-81*. — М.: ОАО «ЗПП», 2014. — 131 с.

³ EPRI TR-100082. Standardization of the Cumulative Absolute Velocity, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, prepared by Yankee Atomic Electric Company, December 1991.

⁴ EPRI NP- 5930. A Criterion for Determining Expedience of the Operating Basis Earthquake, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, prepared by Jack R. Benjamin and Associates, Inc. July 1988.

Спектр реакции линейного осциллятора S_β [7]:

$$S_\beta(\omega) = \omega^2 y,$$

где ω — круговая частота собственных колебаний; y — перемещение, найденное из велосигаммы методом прямого интегрирования.

Третья группа характеризует критерии, влияющие на накопление повреждений в конструкциях: продолжительность воздействия t_a [8], максимальная скорость колебания грунта $V_{\max}$, остаточное перемещение грунта $Y_{\text{ост}}$.

Найденные значения перечисленных критериев интенсивности результирующих акселерограмм приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Критерий	Станция		
	Crockett-Carquinez Br Geotech Array#1	Crockett-Carquinez Br Geotech Array#2	NAPA: Fire Station No.3
$\ddot{y}_{o, \max}$	9,626	4,226	4,754
I_A	9,513	4,341	23,174
CAV	4,687	4,085	17,881
SED	0,015	0,016	4,107
$V_{\max}$	0,22	0,194	1,332
$Y_{\text{ост}}$	0,035	0,012	0,54
$S_{\beta\max}$	24,16	10,632	11,514
$S_{\beta\text{ср}}$	3,63	1,78	6,258
$f_{\text{рез}}$	10	3,7	0,43

В табл. 4 $\ddot{y}_{o, \max}$ — максимальная амплитуда результирующей акселерограммы.

Энергетические критерии (например, интенсивность Ариаса) для исходной результирующей акселерограммы станции Crockett-Carquinez Br Geotech Array#1», представленной на рис. 4, продолжительностью 150 с и для усеченной (продолжительностью 12 с) различаются незначительно: $I_A = 9,6$ (для исходной) и $I_A = 9,513$ (для усеченной). Для остальных станций картина аналогична. Таким образом, уменьшение длины акселерограммы за счет участков с наименьшей амплитудой не влияет на энергетический состав.

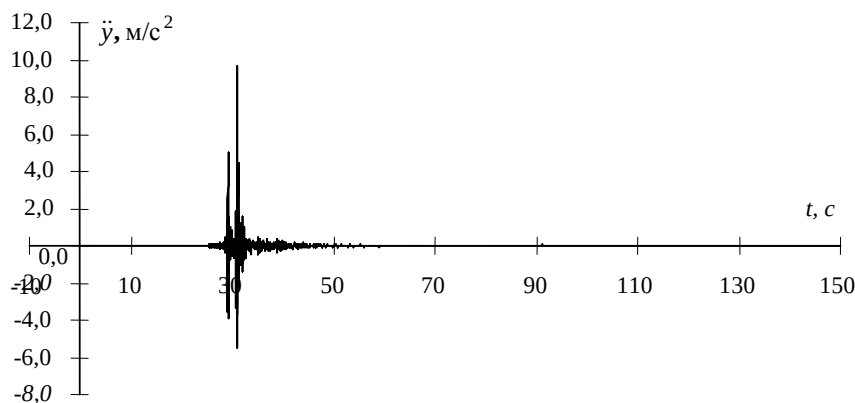


Рис. 4. Исходная результирующая акселерограмма станции Crockett-Carquinez Br Geotech Array#1

Все перечисленные критерии интенсивности землетрясения находятся непосредственно из акселерограммы.

На рис. 5 приведены спектры упругого отпора линейных осцилляторов акселерограмм, зафиксированных каждой из станций, при затухании 5 % критического.

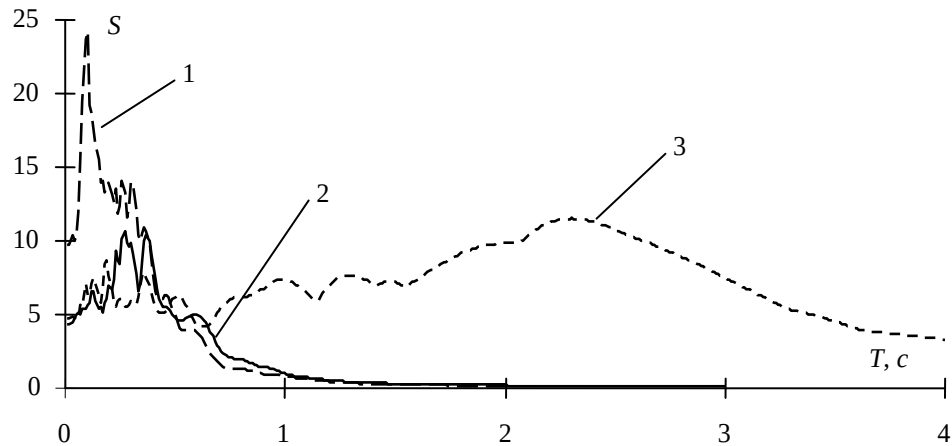


Рис. 5. Спектры упругого отпора линейных осцилляторов для станций: 1 — Crockett-Carquinez Br Geotech Array#1; 2 — Crockett-Carquinez Br Geotech Array#2; 3 — NAPA: Fire Station No.3

Уравнение нелинейного осциллятора без учета продольного изгиба [7]:

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \int_0^{y(t)} \frac{dS}{dy} dy = \ddot{y}_0, \quad (7)$$

где $\ddot{y}$ — вектор ускорения осциллятора; ξ — коэффициент затухания; ω — круговая частота собственных колебаний нелинейного осциллятора; $\dot{y}$ — вектор скорости осциллятора; $\frac{dS}{dy}$ — касательная жесткость нелинейного осциллятора; $\ddot{y}_0$ — акселерограмма землетрясения.

Величина касательной жесткости [13] равна

$$\frac{dS}{dy} = \omega^2 \left(1 + \eta(\mu + 1) \left(\frac{S}{[S]} \right)^\mu \right)^{-1}, \quad (8)$$

где η — отношение пластической деформации к упругой в момент разрушения; μ — показатель нелинейности; $[S]$ — предельный упругий отпор.

Подставляя выражение (8) в (7), получим уравнение нелинейного осциллятора в следующем виде:

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \omega^2 \int_0^{y(t)} \left(1 + \eta(\mu + 1) \left(\frac{S}{[S]} \right)^\mu \right)^{-1} dy = \ddot{y}_0$$

или в приращениях на интервале Δt :

$$\Delta \ddot{y} + 2\xi\omega\Delta\dot{y} + \omega^2 \left(1 + \eta(\mu+1) \left(\frac{S}{[S]} \right)^\mu \right)^{-1} \Delta y = \ddot{y}_0. \quad (9)$$

Уравнение (9) решается методом Ньюмарка [9]. Коэффициенты η и μ определяются из условий:

$$\frac{[S]}{\omega^2}(1+\eta) = y_p; \quad \int_0^{y_p} S(y) dy = W_p,$$

где y_p — максимальное перемещение достигнутое до разрушения образца; W_p — энергия, затраченная для разрушения опытного образца.

В первом приближении η и μ можно получить из диаграммы состояния соответствующего материала. Используя трехлинейную диаграмму деформирования бетона⁵, получим

$$\eta = \left(\varepsilon_{b2} - \frac{R_b}{E_b} \right) \frac{E_b}{R_b}; \quad \mu = \frac{\eta R_b^2}{E_b(\varepsilon_{b2} R_b - W_p) - 0,5 R_b^2} - 2.$$

Одним из основных критериев разрушения строительных конструкций в результате сейсмического воздействия является разрушение в результате достижения максимальной энергии деформирования в одном из пластических полупериодов величины энергии разрушения при статическом действии нагрузки: $W_{\max} = W_p$, где $W_{\max}$ — максимальная энергия деформирования в полупериоде; W_p — энергия разрушения, численно равная площади диаграммы состояния⁵. На основе этого критерия построены спектры для бетона класса B25: $\eta = 6,24$, $\mu = 7,95$. Шаг по периоду 0,01 с.

На рис. 6 приведены спектры упругого отпора нелинейных осцилляторов для бетона класса B25.

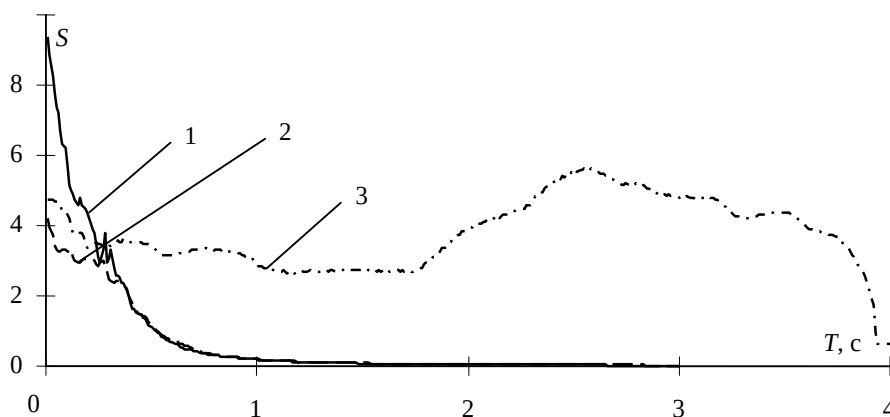


Рис. 6. Спектры упругого отпора нелинейных осцилляторов для бетона класса B25 для станций: 1 — Crockett-Carquinez Br Geotech Array#1; 2 — Crockett-Carquinez Br Geotech Array#2; 3 — NAPA: Fire Station No.3

⁵ СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения / Актуализированная редакция СНиП 52-01—2003. М. : ООО «Аналитик», 2012. 155 с.

Еще одним критерием разрушения строительных конструкций в результате сейсмического воздействия является разрушение в результате малоциклового усталости: $W_{tot}/W_p > [n]$, где W_{tot} — суммарная энергия пластических деформаций за все время воздействия; n — количество пластических полуциклов до полного разрушения, определяемое опытным путем. В первом приближении полагают $n = 10$. При построении спектров учитывалось условие $0,98 \leq W_{max}/W_p < 1$ [10].

На рис. 7 приведены спектры относительной энергии W_{tot}/W_p (коэффициент малоциклового усталости) для трех станций.

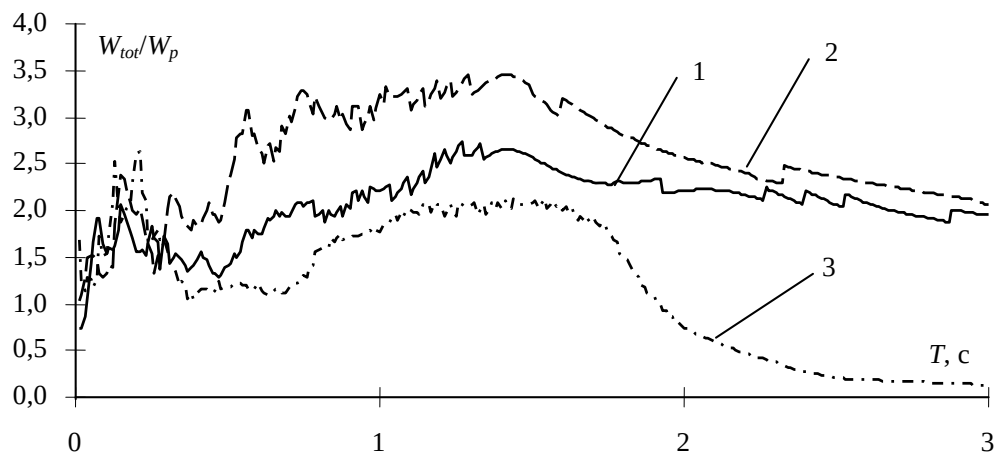


Рис. 7. Спектры относительной энергии W_{tot}/W_p для станций: 1 — Crockett-Carquinez Br Geotech Array#1; 2 — Crockett-Carquinez Br Geotech Array#2; 3 — NAPA: Fire Station No.3

Выводы:

1. Корреляция между компонентами акселерограмм отсутствует, в результате этого были построены результирующие акселерограммы.
2. Энергетические критерии (интенсивность Ариаса, абсолютная кумулятивная скорость и удельная плотность энергии) можно использовать для усекания продолжительных акселерограмм. Удаление участков с наименьшей амплитудой не влияет на энергетический состав акселерограммы.
3. Энергетические критерии не позволяют однозначно установить интенсивность землетрясения.
4. Для определения бальности акселерограммы по шкале МСК-64 наиболее достоверным критерием является максимальная амплитуда акселерограммы.
5. Пики реакций линейных и нелинейных осцилляторов находятся в одном и том же диапазоне частот, хотя максимум реакций нелинейных осцилляторов примерно в 2...2,5 раза меньше соответствующих максимумов линейных осцилляторов.
6. Упругий отпор нелинейных осцилляторов и критерий малоциклового усталости позволяют наиболее полно оценить ущерб от землетрясения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bickel P. J., Doksum K. A. Mathematical Statistics: Basic Ideas and Selected Topics. Vol. 1. Prentice Hall, 2001. 679 p.
2. Sachs L. Statistische Auswertungsmethoden. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972. 548 p.
3. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Краткий курс математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1969. 511 с.
4. Медведев С. В. Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсморайонирование СССР. М.: Наука, 1968. 476 с.
5. Arias A. A measure of earthquake intensity // Seismic design for nuclear power points / (ed. R. J. Hansen). MIT Press. — Cambridge, Massachusetts, 1970. Pp. 438—483.
6. Хачиян Э. Е. О преобладающих периодах колебаний грунтов при землетрясении // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2000. № 4. С. 10—14.
7. Харланов В. Л. Редуцирование реакций неупругих систем при сейсмических воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 1. С. 63—65.
8. Bommer J. J., Martínez-Pereira A. The effective duration of earthquake strong motion // Journal of Earthquake Engineering. 1999. Vol. 3. Iss. 2. Pp. 127—172. DOI:10.1080/13632469909350343
9. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений / А. Ф. Смирнов, А. В. Александров, Б. Я. Лашенников, Н. Н. Шапошников. М.: Стройиздат, 1984. 415 с.
10. Харланов В. Л., Харланова С. В. Спектры реакций нелинейных осцилляторов на акселерограммы землетрясений // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. № 4. С. 67—70.

© Харланова С. В., Пшеничкина В. А., Харланов В. Л., 2016

Поступила в редакцию
в марте 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Харланова С. В., Пшеничкина В. А., Харланов В. Л. Анализ интенсивности калифорнийского землетрясения 24.08.2014 // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 159—168.

Об авторах:

Харланова Светлана Владимировна — канд. техн. наук, доцент кафедры математики и информационных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Пшеничкина Валерия Александровна — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, vap_hm@list.ru

Харланов Владимир Леонтьевич — д-р техн. наук, доцент, проф. кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

S. V. Kharlanova, V. A. Pshenichkina, V. L. Kharlanov

**ANALYSIS OF THE INTENSITY OF THE CALIFORNIAN EARTHQUAKE
IN AUGUST 24, 2014**

Accelerograms of the strong Californian earthquake that happened in 2014 are studied in the article. Various determination criteria for the intensity of the earthquake are considered. Presumptive intensity of the earthquake was 9...10 degrees by MSK-64 scale. The authors compare classical criteria — maximum acceleration and spectral structure of accelerogram with the criteria offered by different researchers: Arias's intensity, absolute cumulative speed, energy specific density. Ranges of reactions of linear and nonlinear oscillators are developed.

Key words: intensity of an earthquake, energy criteria, linear oscillator, nonlinear oscillator, low-cyclic fatigue.

REFERENCES

1. Bickel P. J., Doksum K. A. *Mathematical Statistics: Basic Ideas and Selected Topics*. Vol. 1. Prentice Hall, 2001. 679 p.
2. Sachs L. *Statistische Auswertungsmethoden*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972. 548 p.
3. Smirnov N. V., Dunin-Barkovskii I. V. *Kratkii kurs matematicheskoi statistiki dlya tekhnicheskikh prilozhenii* [Short course in mathematical statistics for engineering appendixes]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 511 p.
4. Medvedev S. V. [International seismic intensity scale]. *Seismoraionirovanie SSSR* [Seismic zoning of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 476 p.
5. Arias A. A measure of earthquake intensity. *Seismic design for nuclear power points* (ed. R. J. Hansen). MIT Press. — Cambridge, Massachusetts, 1970. Pp. 438—483.
6. Khachiyan E. E. [About dominant soil vibration periods at earthquake]. *Seismostoiikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety], 2000, no. 4, pp. 10—14.
7. Kharlanov V. L. [Reduction of reactions of nonelastic systems under seismic loads]. [Structural Mechanics and Analysis of Constructions], 2012, no. 1, pp. 63—65.
8. Bommer J. J., Martínez-Pereira A. The effective duration of earthquake strong motion. *Journal of Earthquake Engineering*, 1999, 3(2). Pp. 127—172. DOI:10.1080/13632469909350343
9. Smirnov A. F., Aleksandrov A. V., Lashchennikov B. Ya., Shaposhnikov N. N. *Stroitel'naya mekhanika. Dinamika i ustoichivost' sooruzhenii* [Structural mechanics. Dynamics and stability of constructions]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1984. 415 p.
10. Harlanov V. L., Harlanova S. V. [Response spectra of nonlinear oscillators for earthquake accelerograms]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions], 2013, no. 4, pp. 67—70.

For citation:

Kharlanova S. V., Pshenichkina V. A., Kharlanov V. L. [Analysis of the intensity of the californian earthquake in august 24, 2014]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 159—168.

About authors:

Kharlanova Svetlana Vladimirovna — Candidate of Engineering Science, Docent of Mathematic and Information Technology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Pshenichkina Valeriya Aleksandrovna — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, vap_hm@list.ru

Kharlanov Vladimir Leont'evich — Doctor of Engineering Science, Docent, Professor of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 624.042.8

В. Л. Харланов, С. В. Харланова

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

МЕТОД РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ЗАДАЧ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ

Многие задачи строительной механики описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями второго порядка. Сюда относятся задачи динамики сооружений, устойчивости, изгиба балок. Как правило, математические модели этих задач представляются линейными дифференциальными уравнениями. Однако в ряде случаев наблюдается нелинейная зависимость между компонентами уравнения. Рассмотрен метод решения дифференциального уравнения, основанный на замене нелинейных членов интегралами их производными.

Ключевые слова: дифференциальное уравнение, нелинейность, динамика, устойчивость, метод конечных элементов, численное интегрирование.

Обыкновенные дифференциальные уравнения второго порядка довольно широко применяются в строительной механике и теории упругости. Решение линейных уравнений с произвольной правой частью не представляет каких либо трудностей. Для решения уравнений с нелинейными членами, как правило, применяются степенные ряды или специальные функции. При этом не существует универсального метода для любых нелинейностей.

Однако такой численный метод существует, если перед началом анализа возможно преобразовать исходное дифференциальное уравнение. Идея метода преобразования нелинейного дифференциального уравнения была предложена в работах [1] и [2] для определения упругих реакций нелинейных систем при сейсмическом воздействии. Теоретическое обоснование метода дано в работе [3]. Идея метода заключается в том, что исходное нелинейное уравнение

$$m \ddot{y}(t) + F_d(t) + F_s(t) = P(t) \quad (1)$$

заменяется эквивалентным

$$m \ddot{y}(t) + \int_0^t \left[\frac{d}{dt} F_d(t) + \frac{d}{dt} F_s(t) \right] dt = P(t).$$

Члены уравнения (1) F_s и F_d нелинейны относительно искомой функции $F_s(t) = F_s\{y(t)\}$ и $F_d(t) = F_d\{\dot{y}(t)\}$.

Осуществив замену переменного (интегрирование подстановкой [4]), получим уравнение нелинейной системы

$$m \ddot{y}(t) + \int_{y(0)}^{\dot{y}(t)} \frac{dF_d}{d\dot{y}} d\dot{y} + \int_{y(0)}^{y(t)} \frac{dF_s}{dy} dy = P(t), \quad (2)$$

где $\frac{dF_d}{d\dot{y}}$ и $\frac{dF_s}{dy}$ — производные нелинейных функций $F_d(t)$ и $F_s(t)$.

При предложенном подходе нелинейные члены уравнения превращаются в константы на шаге интегрирования. Уравнение (2) может быть решено любым прямым методом интегрирования. На интервале интегрирования $[t + \Delta t]$ уравнение (2) линеаризируется

$$m\Delta\ddot{y} + \frac{dF_d}{d\dot{y}}\Delta\dot{y} + \frac{dF_s}{dy}\Delta y = \Delta P, \quad (3)$$

где префикс Δ обозначает приращение соответствующей величины на шаге интегрирования Δt , величины $\frac{dF_d}{d\dot{y}}$ и $\frac{dF_s}{dy}$ определены в конце предыдущего интервала интегрирования.

Уравнение (3) решается методом конечных элементов [5]. Рассмотрим функцию формы в точке $t + \tau$ ($\tau \in [0, \Delta t]$) в виде параболы:

$$y(t + \tau) = a_0 + a_1 \tau + a_2 \tau^2,$$

тогда скорость и ускорение на интервале равны

$$\dot{y}(t + \tau) = a_1 + 2a_2 \tau, \quad \ddot{y}(t + \tau) = 2a_2.$$

Коэффициенты a_0 и a_1 определяются граничными условиями. При $\tau = 0 \rightarrow a_0 = y(t)$, $a_1 = \dot{y}(t)$. Коэффициент a_2 определяется на границах интервала при $\tau = 0$ и $\tau = \Delta t$:

$$\ddot{y}(t) = 2a_2, \quad \ddot{y}(t + \Delta t) = 2a_2,$$

тогда

$$a_2 = \frac{\ddot{y}(t) + \ddot{y}(t + \Delta t)}{4} \quad \text{или} \quad a_2 = \ddot{y}(t) / 2 + \Delta\ddot{y} / 4,$$

где $\Delta\ddot{y} = \ddot{y}(t + \Delta t) - \ddot{y}(t)$ — приращение ускорения на интервале.

Подставив найденные значения коэффициентов a_i в выражения для перемещения и скорости, получим для $\tau = \Delta t$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \dot{y}(t)\Delta t + (\ddot{y}(t) / 2 + \Delta\ddot{y} / 4)\Delta t^2;$$

$$\dot{y}(t + \Delta t) = \dot{y}(t) + (\ddot{y}(t) + \Delta\ddot{y} / 2)\Delta t$$

или, заменив разности $y(t + \Delta t) - y(t)$ и $\dot{y}(t + \Delta t) - \dot{y}(t)$ соответствующими приращениями Δy и $\Delta\dot{y}$, получим

$$\Delta y = \dot{y}(t)\Delta t + (\ddot{y}(t) / 2 + \Delta\ddot{y} / 4)\Delta t^2;$$

$$\Delta\dot{y} = (\ddot{y}(t) + \Delta\ddot{y} / 2)\Delta t,$$

где величины $\ddot{y}(t)$ и $\dot{y}(t)$ определены в конце предыдущего интервала интегрирования.

Выразим приращения скорости и ускорения через приращение перемещения:

$$\Delta\dot{y} = 2\Delta y / \Delta t - 2\dot{y}(t);$$

$$\Delta\ddot{y} = 4\Delta y / \Delta t^2 - 4\dot{y}(t) / \Delta t - 2\ddot{y}(t).$$

Подставив полученные значения приращений в уравнение движения, получим разрешающие уравнение относительно приращения перемещения:

$$\bar{k} \Delta y = \bar{p},$$

где

$$\bar{k} = k + 4m / \Delta t^2 + 2c / \Delta t,$$

$$\bar{p} = m[\Delta \ddot{y}_0 + 4\dot{y} / \Delta t + 2\ddot{y}(t)] + 2c \dot{y}(t),$$

$$\Delta \ddot{y}_0 = \ddot{y}_0(t + \Delta t) - \ddot{y}_0(t).$$

После определения Δy определяются приращения скорости и полные значения перемещений и скоростей в конце интервала:

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \Delta y, \quad \dot{y}(t + \Delta t) = \dot{y}(t) + \Delta \dot{y}.$$

Затем вычисляются нелинейные функции F_d и F_s :

$$F_s(t + \Delta t) = F_s(t) + \frac{dF_s}{dy} \Delta y,$$

$$F_d(t + \Delta t) = F_d(t) + \frac{dF_d}{d\dot{y}} \Delta \dot{y}.$$

Ускорение в конце интервала определяется из уравнения (1):

$$\ddot{y}(t + \Delta t) = [P(t + \Delta t) - F_d(t + \Delta t) - F_s(t + \Delta t)] / m.$$

Метод называется методом Ньюмарка [6] или методом с постоянным ускорением на шаге интегрирования. Приняв функцию формы в виде кубического полинома, можно получить разрешающие уравнения метода линейного ускорения [7]. Никаких существенных преимуществ метод линейного ускорения перед методом Ньюмарка не имеет.

Очевидно, что данный подход может быть применен к любому обыкновенному нелинейному дифференциальному уравнению второго порядка, а не только к уравнению движения.

Рассмотрим несколько примеров применения предложенного метода преобразования уравнения (1) в уравнение (2) для решения нелинейных дифференциальных уравнений:

1. Нелинейный осциллятор с зависимостью Прандтля [8] «упругий отпор — перемещение».

Уравнение линейного осциллятора

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \omega^2 y = p(t),$$

где точки обозначают дифференцирование по времени; ξ — коэффициент затухания; ω — собственная частота колебания осциллятора; $p(t)$ — динамическая нагрузка.

Уравнение соответствующего нелинейного осциллятора

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \int_0^{y(t)} \frac{dS}{dy} dy = p(t),$$

где $\frac{dS}{dy}$ — касательная жесткость, равная ω^2 на упругом участке и этапе разгрузки и 0 в пластической стадии.

Зависимость « $y — S$ » представлена на рис. 1.

В зависимости от значения предельной величины упругого отпора изменяется величина неупругих деформаций. Рассмотрим линейный осциллятор с периодом $T = 0,5$ с без затухания ($\xi = 0$), загруженный одиночным импульсом синусоидальной формы продолжительностью $0,05$ с, с максимальной амплитудой 50 . На рис. 2 колебания линейного осциллятора представлено сплошной линией. Там же приведены колебания нелинейных осцилляторов с ограничением упругого отпора. На рис. 3 приведены диаграммы деформирования осцилляторов в процессе воздействия.

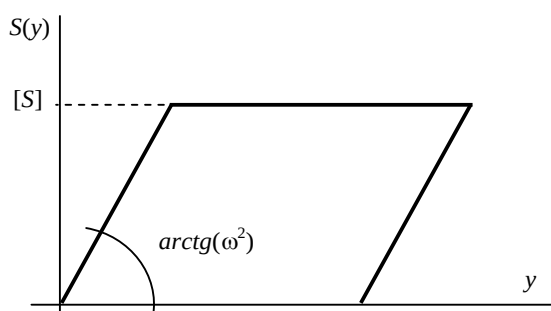


Рис.1. Зависимость «упругий отпор — перемещение» (« $y — S$ »)

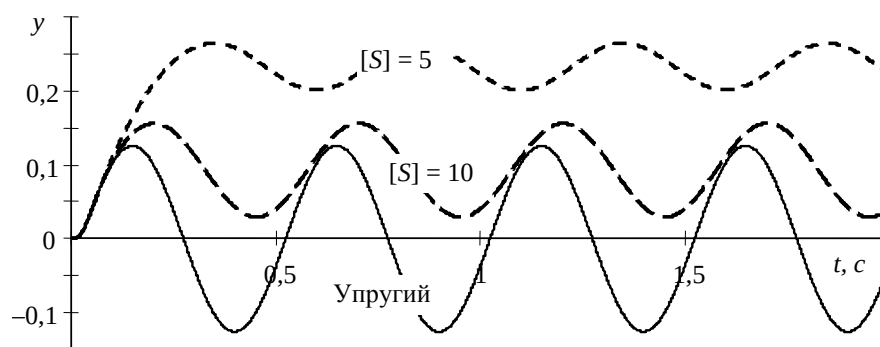


Рис. 2. Перемещения упругого и упруго-пластических осцилляторов в процессе воздействия

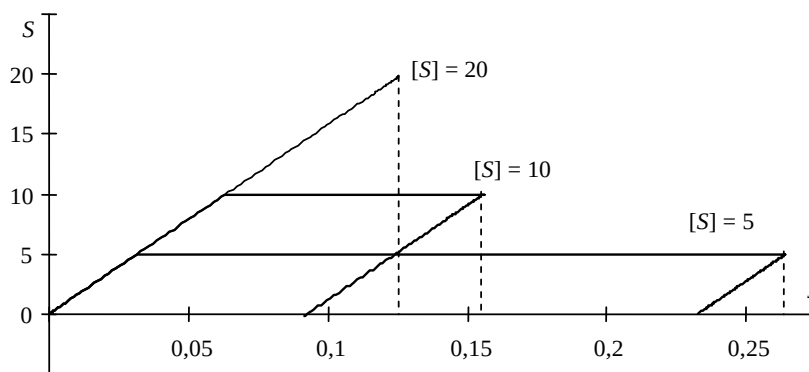


Рис. 3. Диаграммы деформирования упругого и упруго-пластических осцилляторов

Диаграмма состояния нелинейного осциллятора может быть задана более сложной зависимостью:

$$y = \frac{S}{k} \left(1 + \eta \left(\frac{S}{[S]} \right)^m \right),$$

где $[S]$ — предельное значение восстанавливающей силы; η и m — параметры нелинейности; k — начальная жесткость.

Касательная жесткость на интервале интегрирования находится по формуле

$$\frac{dS}{dy} = k \left(1 + \eta(m+1) \left(\frac{S}{[S]} \right)^m \right)^{-1}.$$

Этап разгрузки происходит по линейному закону с жесткостью равной начальной k .

На рис. 4 приведены колебания линейного и нелинейного осцилляторов с периодом колебаний 2 с при воздействии вида

$$p(t) = 20 \sin(5t).$$

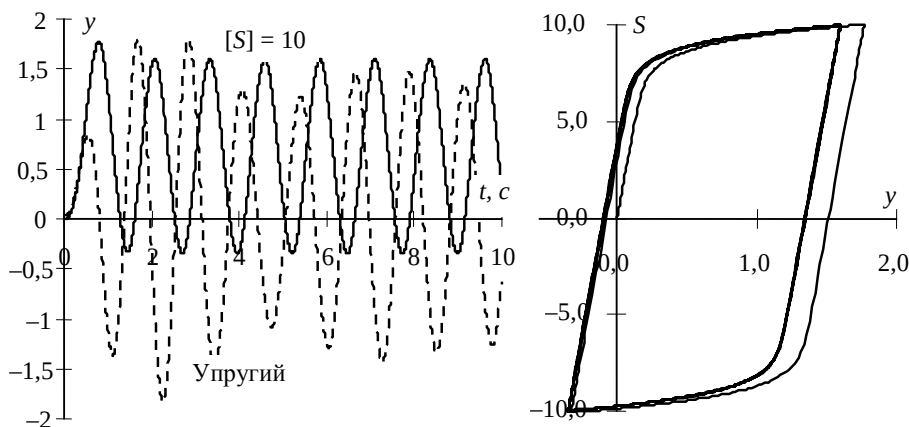


Рис. 4. Перемещения упругого (пунктир) и неупругого осцилляторов в процессе воздействия

2. Применение метода в задачах устойчивости.

Уравнение динамического метода определения критической силы [9] для вертикального стержня с силой, приложенной на его конце

$$J_m \ddot{\varphi} - Pl \sin \varphi + c\varphi = 0, \quad (4)$$

где φ — угол отклонения от вертикали; P — вертикальная сила; l — длина стержня; $c\varphi$ — равновесный момент в опорном сечении.

Решение этого уравнения получено при малых отклонениях верха для линеаризованной системы (устойчивость по Ляпунову [10]).

Для решения уравнения (4) численным методом, оно приводится к виду

$$J_m \ddot{\varphi} - Pl \int_{\varphi(0)}^{\varphi(t)} \cos(\varphi) d\varphi + c\varphi = 0. \quad (5)$$

На интервале интегрирования $\Delta\varphi$ уравнение (5) примет вид

$$J_m \Delta \ddot{\varphi} - Pl \cos(\varphi) \Delta\varphi + c \Delta\varphi = 0,$$

где величина $\cos(\varphi)$ определена в конце предшествующего интервала интегрирования.

После определения искомой функции $\varphi(t)$, вычисляется величина $\cos(\varphi)$.

На рис. 5 представлены колебания стержня при начальном угле отклонении 0,3 рад для двух отношений Pl и c .

Если система устойчива ($Pl \leq c$), то ее колебания происходят вблизи положения равновесия. При этом начальная ветвь всегда нисходящая. Колебания неустойчивой системы происходят вблизи начального угла отклонения. Начальная ветвь, как правило, восходящая. При начальном угле отклонения более 0,4 рад, начальная ветвь нисходящая. Характер колебания при этом сохраняется.

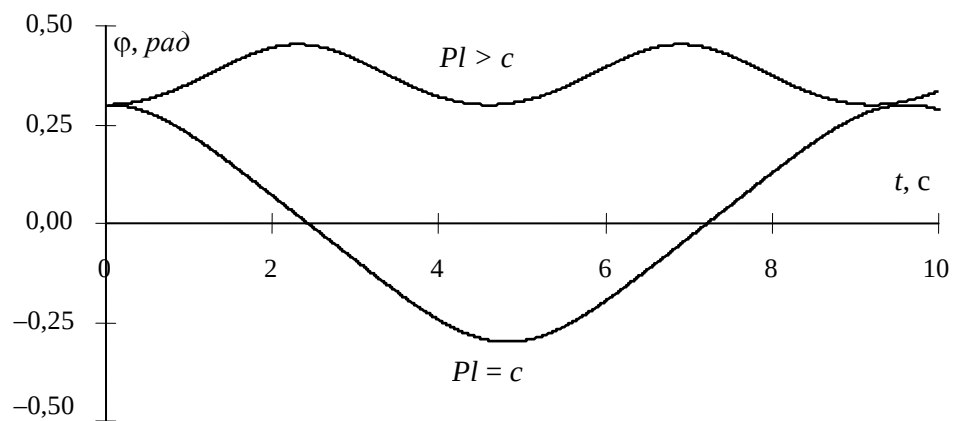


Рис. 5. Решения уравнения (4)

3. Свободные колебания математического маятника при больших углах отклонения.

Моделью математического маятника обычно описываются системы сейсмоизоляции обладающие гравитационной восстанавливающей силой. К таким систем относятся кинематические фундаменты [11], сферические опоры [12,13], фундаменты на тяжах [14].

Уравнения математического маятника в полярных координатах:

$$\ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \sin(\varphi) + c \dot{\varphi}^2 = 0, \quad (6)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; l — длина подвеса; c — демпфирование.

Для большей наглядности диссипация в уравнении (6) пропорциональна квадрату скорости. В принципе, нелинейность может быть задана любой функцией.

Аналитическое решение уравнения (6) весьма громоздко и основано на рядах [15].

Для возможности интегрирования уравнения (6), запишем его в эквивалентной форме:

$$\ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \int_{\varphi(0)}^{\varphi(t)} \cos(\varphi) d\varphi + 2c \int_{\dot{\varphi}(0)}^{\dot{\varphi}(t)} \dot{\varphi} d\dot{\varphi} = 0. \quad (7)$$

На интервале интегрирования уравнение (7) примет вид

$$\Delta\ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \cos(\varphi) \Delta\varphi + 2\dot{\varphi} c \Delta\dot{\varphi} = 0,$$

где φ определено в конце предыдущего интервала.

Колебания маятника длиной $l = 1$ м при начальном отклонении $\varphi(0) = \pi - 0,001$ и $c = 0,01$ представлено на рис. 6.

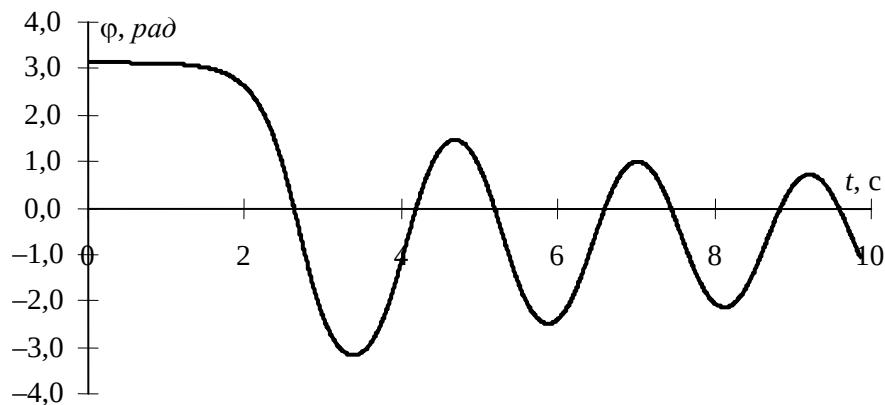


Рис. 6. Колебания математического маятника в полярных координатах

Более наглядно нелинейность колебаний выглядит в декартовых координатах на рис. 7.

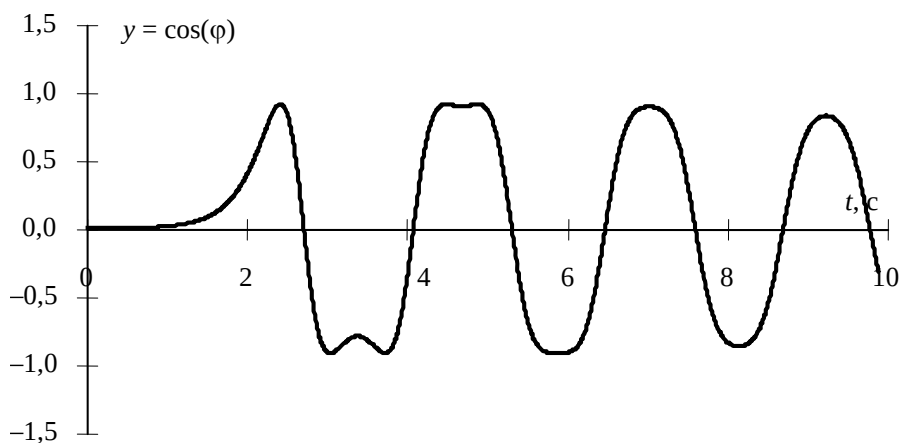


Рис. 7. Колебания маятника в декартовых координатах

Для определения реакций сейсмоизолированного здания, уравнение (7) должно быть представлено в декартовых координатах с возможностью возбуждения точки подвеса [16]:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + \frac{N}{l} \int_0^{y(t)} \frac{1-2(y/l)^2}{\sqrt{1-(y/l)^2}} dy = m\ddot{y}_0,$$

где N — вес массы, приходящейся на один сейсмоизолятор; $\ddot{y}_0$ — акселерограмма точки подвеса.

4. Решение задачи Коши [17].

В приложениях МКЭ при задании функции формы полиномами высоких степеней связь между кривизнами и перемещениями будет нелинейной. В качестве примера рассмотрим зависимость

$$\ddot{y}(x) = 4y(x)^3 \quad (8)$$

с граничными условиями на интервале $[-1, 1]$ $y(-1) = y(1) = 0$.

Уравнение на интервале интегрирования примет вид

$$\Delta\ddot{y} - 12y^2\Delta y = 0.$$

Решение уравнения представлено на рис. 8.

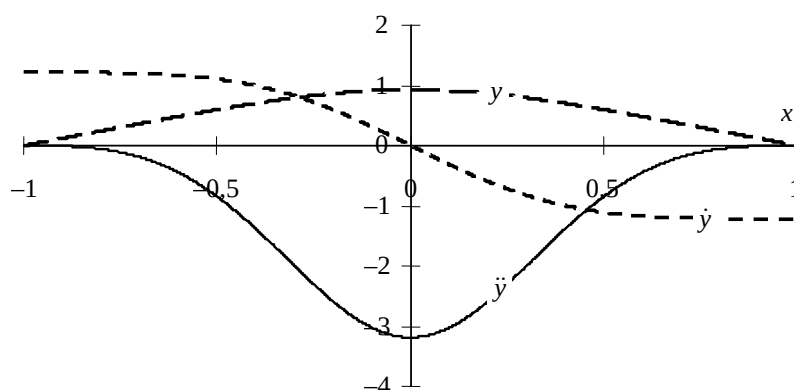


Рис. 8. Решение уравнения (8)

Закключение. Предложенный метод позволяет получить численное решение нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с любым видом нелинейности. Единственное условие — должна существовать первая производная соответствующей нелинейной функции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ржевский В. А., Ибрагимов Р. С., Харланов В. Л. Особенности исследований стержневых железобетонных систем на сейсмические воздействия с учетом физической нелинейности // Архитектура и строительство Узбекистана. 1986. № 8. С. 8—10.
2. Ржевский В. А., Ибрагимов Р. С., Харланов В. Л. Динамический анализ физически нелинейных железобетонных рам с учетом неупругих свойств бетона и арматуры // Строительная механика и расчет сооружений. 1989. № 6. С. 44—48.
3. Харланов В. Л. Детерминированный анализ металлических каркасов на динамические нагрузки высокой интенсивности: монография. Волгоград: ВолгГАСУ, 2006. 134 с.

4. Korn G. A., Korn T. M. Mathematical handbook for scientists and engineers. McGraw-Hill Book Company, 1968.
5. Синицын А. П. Метод конечных элементов в динамике сооружений. М.: Стройиздат, 1978. 231 с.
6. Newmark N. M. A method of computation for structural dynamics // Journal of Engineering Mechanics. 1959. Vol. 85. Iss. 1. Pp. 67—94.
7. Clough R., Penzien J. Dynamics of Structures. New York, 1975.
8. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 592 с.
9. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений: учебник для ВУЗов / А. Ф. Смирнов, А. В. Александров, Б. Я. Лашеников, Н. Н. Шапошников; под ред. А. Ф. Смирнова. М.: Стройиздат, 1984. 416 с.
10. Ляпунов А. М. Собрание сочинений. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 446 с.
11. Черепинский Ю. Д. Сейсмоизоляция зданий. Строительство на кинематических фундаментах. М.: Blue Apple, 2009. С. 51—84.
12. Васюнкин А. Н., Бобров Ф. В. Экспериментальные исследования зданий на опорах в форме эллипсоидов вращения // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 1976. Вып. 4. С. 20—24.
13. MAURER Premium Seismic Isolation with Sliding Isolation Devices for Buildings and Tank Structures. Technical Information. Maurer Söhnes. 28.05.2004 / SPS, 16 p.
14. Обеспечение сейсмической безопасности зданий. Сейсмоизолирующая опора. Технология, наукоемкая продукция. М.: М-во науки и технологии РФ, 1997.
15. Adlaj S. An Eloquent Formula for the Perimeter of an Ellipse // Notices of the AMS. 2012. Vol. 59. Iss. 8. Pp. 1096—1097.
16. Харланов В. Л. Исследование эффективности изоляторов маятникового типа / В. Л. Харланов, И. В. Денисов // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 6. С. 56—58.
17. Timoshenko S. P. History of strength of materials. New York, 1957. 452 p.

© Харланов В. Л., Харланова С. В., 2016

Поступила в редакцию
в марте 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Харланов В. Л., Харланова С. В. Метод решения нелинейных дифференциальных уравнений задач строительной механики // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 169—178.

Об авторах:

Харланов Владимир Леонтьевич — д-р техн. наук, доцент, проф. кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Харланова Светлана Владимировна — канд. техн. наук, доцент кафедры математики и информационных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

V. L. Kharlanov, S. V. Kharlanova

SOLUTION METHOD FOR NONLINEAR DIFFERENTIAL EQUATIONS OF CONSTRUCTION MECHANICS PROBLEMS

Many construction mechanics problems are described by the ordinary differential second-order equations. Problems of dynamics of constructions, stability and beam bending are referred to them. As a rule, mathematical models of these tasks are represented by linear differential equations. However, in many cases nonlinear dependence between equation components is observed. The solution method for differential equation based on replacement of nonlinear members with integrals of their derivatives is considered.

Key words: differential equation, nonlinearity, dynamics, stability, finite elements method, numerical integration.

REFERENCES

1. Rzhetskii V. A., Ibragimov R. S., Kharlanov V. L. [Characteristics of study of bar reinforced concrete systems for seismic impacts in view of physical nonlinearity]. *Arkhitektura i stroitel'stvo Uzbekistana* [Architecture and construction in Uzbekistan], 1986, no. 8, pp. 8—10.
2. Rzhetskii V. A., Ibragimov R. S., Kharlanov V. L. [Dynamic analysis of physically nonlinear reinforced concrete frames in view of inelastic characteristics of concrete and fittings]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions], 1989, no. 6, pp. 44—48.
3. Kharlanov V. L. *Determinirovannyi analiz metallicheskih karkasov na dinamicheskie nagruzki vysokoi intensivnosti* [Deterministic analysis of metal frames for dynamic high intensity loads]. Volgograd, VSUACE Publ., 2006. 134 p.
4. Korn G. A., Korn T. M. *Mathematical handbook for scientists and engineers*. McGraw-Hill Book Company, 1968.
5. Sinitsyn A. P. *Metod konechnykh elementov v dinamike sooruzhenii* [Finite element method in dynamics of constructions]. Moscow, Stroizdat Publ., 1978. 231 p.
6. Newmark N. M. A method of computation for structural dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1959, 85(1), pp. 67—94.
7. Clough R., Penzien J. *Dynamics of Structures*. New York, 1975.
8. Feodos'ev V. I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 1999. 592 p.
9. Smirnov A. F., Aleksandrov A. V., Lashchenikov B. Ya., Shaposhnikov N. N. *Stroitel'naya mekhanika. Dinamika i ustoychivost' sooruzhenii* [Structural mechanics. Dynamics and stability of constructions]. Moscow, Stroizdat Publ., 1984. 416 p.
10. Lyapunov A. M. *Sobranie sochinenii. T. 1* [Collected edition. Vol. 1]. Moscow, Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1954. 446 p.
11. Cherepinskiy Yu. D. *Seismoizolyatsiya zdanii. Stroitel'stvo na kinematicheskikh fundamentakh* [Seismic isolation of buildings. Construction on kinematic foundations]. Moscow, Blue Apple Publ., 2009. Pp. 51—84.
12. Vasyunkin A. N., Bobrov F. V. [Pilot studies of buildings on supporting blocks in the form of ellipsoids of rotation]. *Seismoizolyatsiya stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake resistant construction. Safety of constructions], 1976, iss. 4, pp. 20—24.
13. MAURER Premium Seismic Isolation with Sliding Isolation Devices for Buildings and Tank Structures. Technical Information. Maurer Söhnes. 28.05.2004 / SPS, 16 p.
14. Obespechenie seismicheskoi bezopasnosti zdanii. *Seismoizoliruyushchaya opora. Tekhnologiya, naukoemkaya produktsiya* [Ensuring seismic safety of buildings. Seismic isolating supporting block. Technology, knowledge-intensive products]. Moscow, Publishing Of Ministry of Education and Technology, 1997.
15. Adlaj S. An Eloquent Formula for the Perimeter of an Ellipse. *Notices of the AMS*, 2012, 59(8), pp. 1096—1097.
16. Kharlanov V. L., Denisov I. V. [Study of the effectiveness of seismoisolation pendulum]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions], 2014, no. 6, pp. 56—58.
17. Timoshenko S. P. *History of strength of materials*. New York, 1957. 452 p.

For citation:

Kharlanov V. L., Kharlanova S. V. [Solution method for nonlinear differential equations of construction mechanics problems]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 169—178.

About authors:

Kharlanov Vladimir Leont'evich — Doctor of Engineering Science, Docent, Professor of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Kharlanova Svetlana Vladimirovna — Candidate of Engineering Science, Docent of Mathematic and Information Technology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 62-82:69.002.5

О. В. Бурлаченко, С. В. Алексигов, Н. А. Фоменко

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО СПОСОБА ЗАЩИТЫ ГИДРОПРИВОДА СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН

Предлагаются запатентованные авторами конструкции гидромеханического способа защиты гидропривода строительно-дорожных машин от несанкционированного выброса рабочей жидкости при разрушении рукавов высокого давления.

К л ю ч е в ы е с л о в а: гидропривод, гидравлическая система, рукав высокого давления, защита гидропривода, запорное устройство.

Исследования показывают, что гидросистема строительно-дорожных машин работает в различных природно-климатических условиях с широкими пределами температурного и нагрузочного режима. Такие условия и режимы работы строительно-дорожных машин приводят к циклическим нагрузкам элементов гидросистемы и изменению физико-химических свойств ее рабочей жидкости. Это вызывает преждевременные неисправности или отказы работы агрегатов и арматуры гидросистемы строительно-дорожных машин, приводит к ухудшению эксплуатационных свойств техники. Для повышения технического уровня и производительности строительно-дорожной техники разработчики при создании или модернизации машин добиваются повышения энергонасыщенности гидропривода гидросистемы, как правило, за счет установки более производительных гидронасосов, которые обеспечивают многоконтурное питание привода рабочих органов: гидромоторов, гидродвигателей и др., что соответственно поднимает рабочее давление в гидросистеме. Повышение рабочего давления и энергоемкости гидропривода рабочих органов строительно-дорожных машин сопровождается увеличением объема рабочей жидкости в гидробаке. При негативном воздействии знакопеременных нагрузок на рукава происходит их разрушение и, как правило, несанкционированный выброс большого количества рабочей жидкости (минерального масла) в атмосферу, примерно 46...335 л за один выброс [1], что отрицательно влияет на экологическую безопасность [2—9].

Наиболее уязвимым местом в конструкции гидропривода строительно-дорожных машин являются рукава высокого давления. Несмотря на многообразие технических решений по повышению их прочности и надежности, проблема защиты гидросистемы остается актуальной, так как существующие в настоящее время типы оплеточных или навивочных гибких рукавов не удовлетворяют требованиям экологической безопасности.

В этой связи нами предлагаются новые технические решения — защита гибких рукавов высокого давления [10, 11] путем введения защитной оболочки, заполненной газом, которая снижает циклические нагрузки, повышает ресурс рукава и способствует транспортировке на слив в гидробак рабочей жидкости при разрушении рукава и на базе известных [12—14] вариантов

запорного устройства и системы защиты гидропривода [15—19]. На рис. 1 показана конструкция рукава высокого давления. Системы защиты гидропривода представлены на (рис. 2—7).

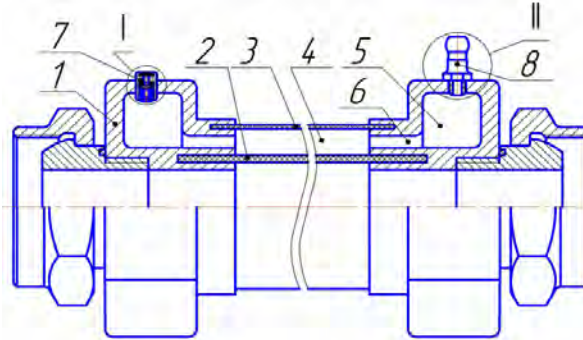


Рис. 1. Трубопровод высокого давления: 1 — наконечник; 2 — силовой рукав; 3 — оболочка; 4 — полость; 5 — камера; 6 — кольцевой канал; 7 — редукционный клапан; 8 — обратный клапан

Сливная гидролиния (рис. 2) защитного устройства гидропривода оснащена системой стабилизации давления во входной полости, которая позволяет обеспечить плавный процесс перекрытия напорной магистрали при разрыве рукавов высокого давления, сокращает время перекрытия клапана и исключает преждевременное его открытие. Во избежание преждевременного возврата плунжера в исходное положение на его поверхности выполнена проточка, используемая для блокировки плунжера в закрытом положении клапана запорного устройства. Этот конструктивный элемент также обеспечивает плавный процесс перекрытия напорной магистрали при разрыве рукавов высокого давления, сокращает время перекрытия клапана, исключает преждевременное его открытие, т. е. фиксирует в закрытом положении. В прототипе рассматриваемого запорного устройства защиты гидропривода канал в плунжере имеет посадочное гнездо, которое перекрывается коническим клапаном. Учитывая, что конический клапан, совмещенный со штоком и свободно перемещающийся в расточке упора, может иметь несоосность с каналом плунжера, следует ожидать, что в процессе закрытия клапана произойдет смещение его относительно седла и неплотное закрытие, а это приведет к дросселированию рабочей жидкости из входной полости плунжера и утечке рабочей жидкости через поврежденный рукав в атмосферу. Поэтому вместо конического клапана, перекрывающего осевой канал плунжера входной полости, применен плунжер, который имеет осевой канал и радиальные отверстия, сообщающие входную и выходную полости запорного устройства. Для отключения запорного устройства в напорной гидролинии установлены два регулируемых дросселя.

В прототипе запорного устройства системы защиты гидравлической системы (рис. 3) при разрушении напорной гидролинии во входной и выходной полостях мгновенно возникает перепад давления, в результате чего плунжер и клапан, перемещаясь на встречу друг другу, закрывают канал, соединяющий входную и выходную полости, при этом радиальные отверстия плунжера

сообщаются со сливной гидролинией и гидробаком. Однако из-за резкого перекрытия гидролинии одновременно возникает гидравлический удар, энергия которого приводит к колебательному процессу клапана и динамическим нагрузкам на седло клапана и, как следствие, к его износу. Поэтому для сглаживания и ускорения процесса затухания ударной волны, цикличность которой может достигать 10 раз, предлагается новое техническое решение. Суть его заключается в том, что подвижный шток клапана неподвижно связан с мембраной упора, имеющего полусферическую поверхность, которая вместе с мембраной крышки упора, имеющей также полусферическую поверхность, образуют газовую камеру, заполненную воздухом. При срабатывании клапана шток перемещает мембрану, сжимая газовую среду, при этом происходит поглощение энергии ударной волны, ее затухание, снижается динамическое воздействие клапана на седло, соответственно уменьшается износ сопрягаемой пары.

Анализ существующих конструкций запорных устройств системы защиты гидропривода показывает, что наиболее эффективными являются не поплавковые или гидропневматические, а те, которые работают по принципу перепада давления в напорной и сливной гидролинии при разрушении рукавов высокого давления. Однако оператор машины не всегда контролирует процесс, особенно при неисправном запорном устройстве, когда рабочая жидкость в больших количествах выбрасывается в атмосферу. Предлагается такая конструкция (рис. 4), в которой при срабатывании запорного устройства включается световая и звуковая сигнализация, оповещающая оператора и предупреждая о необходимости принятия решения на остановку и ремонт машины. Принцип работы системы оповещения основан на замыкании контакта электрической цепи, которая автоматически управляет световой и звуковой сигнализацией. Контакты цепи замыкаются штоком, на который воздействует плунжер запорного устройства в момент закрытия клапана. Одновременно с помощью электрического привода отключается подача рабочей жидкости в гидросистему.

Конструкция запорного устройства (рис. 7) отличается от конструкции, приведенной на рис. 2, тем, что плунжер запорного устройства не имеет радиальных отверстий, предназначенных для слива рабочей жидкости в гидробак во время разрушения рукавов. Эту функцию выполняет расположенный на корпусе запорного устройства сливной штуцер, который сообщается с входной полостью устройства во время перекрытия плунжером выходной полости, сообщающийся с гидрораспределителем. Такой механизм перекрытия поврежденной гидролинии запорным устройством возможен при изменении конструкции подвижного штока, свободно перемещающегося в упоре, равновесие которого поддерживается (рис. 2) гидравлическим подпором со стороны напорной гидролинии. В конструкции, приведенной на рис. 7, шток с помощью резьбового соединения неподвижно закреплен в упоре, а перекрытие плунжером канала запорного устройства, сообщающего с напорной гидролинией при ее разрушении и несанкционированном выбросе рабочей жидкости, осуществляется цилиндрической частью плунжера. Для обеспечения питания гидропривода через гидрораспределитель в неподвижном штоке предусмотрен осевой канал и радиальное отверстие, сообщающиеся с напорной полостью запорного устройства. Проходное сечение радиального

отверстия изменяется регулировочным винтом. Это необходимо для настройки и исключения проникновения рабочей жидкости в выходную полость, обеспечения надежности перекрытия поступления рабочей жидкости в поврежденные рукава. Система защиты также снабжена обратным клапаном, гидрозамком и двумя вентилями. Гидрозамок служит управляющим сигналом в виде давления рабочей жидкости во входной полости запорного устройства, а обратный клапан поддерживает номинальное давление. Таким образом обеспечивается надежное перекрытие поврежденной магистрали и быстрое срабатывание запорного устройства.

Гидромеханический способ защиты гидравлической системы от несанкционированного выброса рабочей жидкости при разрушении рукавов высокого давления, представленный на рис. 2—4, имеет существенный недостаток. При перекрытии плунжером напорной магистрали в запорном устройстве образуется в конце его хода несжимаемый объем жидкости, который препятствует надежному перекрытию выходной полости. При этом наблюдается колебание плунжера и, соответственно, кратковременное размыкание затвора, а также последующие утечки через поврежденный рукав рабочей жидкости в атмосферу. Этот недостаток можно устранить путем отвода несжимаемого объема жидкости в линию слива или установкой гидроаккумулятора (рис. 5) в виде подпружиненной поршневой полости, сообщающейся с несжимаемым объемом жидкости каналом, принцип работы которого основан на перетекании этого объема жидкости в поршневую полость и возврата обратно при открытии запорного устройства. Это позволяет исключить колебательный процесс плунжера, возникающий при неполном перекрытии им выходной полости запорного устройства и повысить надежность перекрытия поврежденной гидролинии. В случае перетекания через уплотнение рабочей жидкости из поршневой полости гидроаккумулятора в пружинную предусмотрена трасса слива в гидробак, что повышает экологическую безопасность.

Недостатком рассмотренных выше устройств защиты гидропривода (рис. 2—7) является то, что в качестве исполнительного механизма применен напорный клапан, который из-за падения давления при разрушении рукава приводит к повторному его открытию и возникновению колебательного процесса плунжера, а слив не обеспечивает полного падения давления в входной и выходной полостях. Конструкция запорного устройства системы защиты гидропривода (рис. 6) с помощью дополнительных элементов контроля процесса перекрытия напорной гидролинии в эксплуатационных условиях позволяет повысить универсальность гидропривода, широко использовать его в гидросистемах с переменной подачей рабочей жидкости на привода рабочих органов и агрегатов, обеспечить экологическую безопасность использования гидроприводов. Гидропривод через запорное устройство управляется трехлинейным двухпозиционным распределителем, регулируемым дросселем, обратными клапанами, датчиком давления перепада давления, плюсовой и минусовой камерой, гидрозамком, вентилем слива рабочей жидкости. Перепад давления в входной и выходной полостях запорного устройства регулируется дросселем и является управляющим сигналом для него, позволяет быстро отключить напорную гидролинию. Датчик представляет собой камеру, разделенную мембраной и неподвижно соединенную с полым плунжером. Чувствительность датчика настраивается регулировочным винтом, который

поджимает пружину мембраны. Это позволяет исключить преждевременное срабатывание системы защиты, а плюсовая камера способствует стабилизации перепада давления и снижению его пульсации. Обратный клапан в линии слива, сообщающийся с поршневой полостью гидрозамка, тормозит управляющий сигнал, поступающий из плюсовой камеры, а входная полость гидрозамка позволяет через второй обратный клапан получить устойчивый управляющий сигнал. Такой сигнал необходим для работы затвора запорного устройства, он будет постоянным и позволит обеспечить надежное перекрытие поврежденной гидролинии. Регулируемый дроссель на линии слива позволяет получить в напорной гидролинии давление, соответствующее управляющему сигналу. Вентили на участке сливной гидролинии позволяют после восстановления разрушенного рукава привести систему защиты гидропривода в рабочее состояние.

Таким образом, предложенная в системе защиты гидропривода (рис. 6) конструкция системы защиты гидропривода позволяет повысить быстродействие срабатывания запорного устройства, универсальность гидропривода, исключить преждевременное срабатывание, повысить эксплуатационную надежность.

Анализ разработанных нами конструкций (рис. 1—7) средств защиты гидропривода строительно-дорожных машин показывает, что с учетом многочисленных факторов, влияющих на работу гидропривода (номинальное давление в гидросистеме, внешняя и внутренняя температура окружающей среды и рабочей жидкости соответственно, физико-химические свойства рабочей жидкости: вязкость, пенообразование и др., циклические, знакопеременные нагрузки на рабочих органах машин и гидропривода), эти конструкции позволили объединить преимущества систем защиты и запорного устройства и предложить реальные технические решения в виде запатентованных в ФИПСе Федеральной службы по интеллектуальной собственности конструкций.

Конструкция рукава высокого давления (см. рис. 1) по совокупности положительных признаков позволяет одновременно снизить нормальные радиальные и окружные напряжения в стенке силового рукава и сгладить амплитуды их пульсации, обеспечить гибкость, надежность, возможность при разрыве силового рукава слива несанкционированного выброса рабочей жидкости из полости, образованной между рукавом и оболочкой в гидробак. Однако, на наш взгляд, наиболее эффективный способ защиты атмосферы от загрязнения являются технические решения, представленные на рис. 2—7.

Исследования процессов, протекающих в гидросхеме строительно-дорожных машин, рабочего оборудования, привод которых осуществляется с помощью гидропривода, гидрофицированных манипуляторах, тягово-транспортных средств, оснащенных объемным гидроприводом, показывают, что кроме таких основных факторов, влияющих на надежность гидроприводов гидросистемы машин, как номинальное давление, режимы и условия работы, физико-химические свойства материалов, существует и множество других, в том числе психо-физиологическое состояние оператора управляемого техникой. В этой связи целесообразно продолжить исследования в области, модернизации существующих и создания на основе современных требований к техническому уровню новых. Необходимо использовать со-

временные достижения науки и техники, средства автоматизированного контроля и управления процессами, происходящими при работе гидросистем техники, работающей в континентальных природно-климатических условиях.

Рассмотренные нами технические решения запатентованы. В настоящее время на основе дальнейших исследований подготовлена в Роспатент заявка на изобретение, в которой рассматривается влияние гидроудара на элементы запорного устройства системы защиты от несанкционированного выброса рабочей жидкости при разрушении рукавов высокого давления, процессы затухания энергии гидроудара, возникающего при резком перепаде давления при повреждении рукавов.

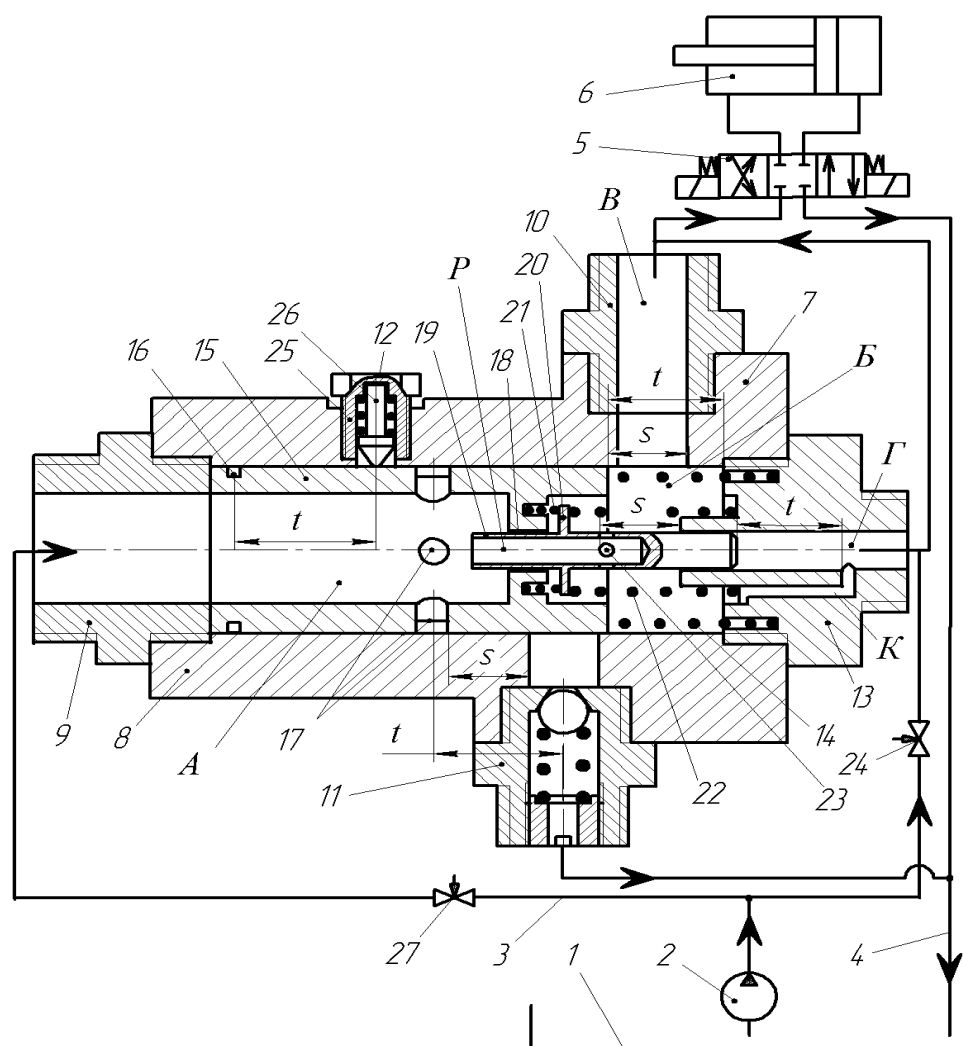


Рис. 2. Система защиты гидропривода: 1 — гидробак; 2 — насос; 3 — напорная гидрولي́ния; 4 — сливная гидрولي́ния; 5 — распределитель; 6 — гидропривод; 7 — запорное устройство; 8 — корпус; 9, 10, 11 — штуцеры; 12 — фиксатор; 13 — упор; 14, 15 — пружины; 16 — кольцевая проточка; 17 — радиальное отверстие; 18 — канал; 19 — плунжер; 20 — упор; 21 — пружина; 22 — пружина; 23 — радиальное отверстие; 24 — вентиль; 25 — пробка; 26 — стержень; 27 — вентиль

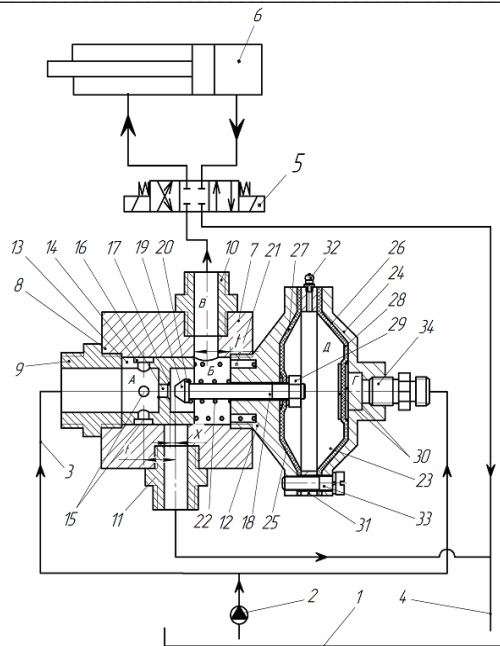


Рис. 3. Гидропневматическая система защиты гидропривода: 1 — гидробак; 2 — насос; 3 — напорная гидролиния; 4 — сливная гидролиния; 5 — распределитель; 6 — гидропривод; 7 — запорное устройство; 8 — корпус; 9, 10, 11 — штуцеры; 12 — упор; 13 — плунжер; 14 — проточка; 15 — радиальное отверстие; 16 — отверстие; 17 — фаска; 18 — плунжер; 19 — конус; 20 — буртик; 21 — пружина; 22 — пружина; 23 — камера; 24 — крышка; 25 — полусфера; 26 — полусфера; 27 — мембрана; 28 — мембрана; 29 — резьбовое соединение; 30 — пластина; 31 — кольцо; 32 — ниппель; 33 — винт; 34 — штуцер

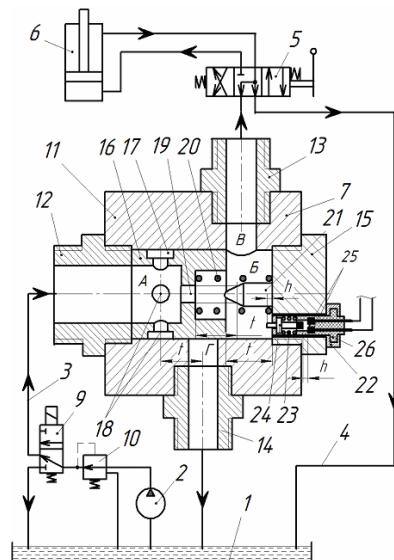


Рис. 4. Электрогидравлическая система защиты гидропривода: 1 — гидробак; 2 — насос; 3 — напорная гидролиния; 4 — сливная гидролиния; 5 — распределитель; 6 — гидропривод; 7 — запорное устройство; 8 — система контроля; 9 — механизм отключения; 10 — редукционный клапан; 11 — корпус; 12, 13, 14 — штуцеры; 15 — пробка; 16 — плунжер; 17 — проточка; 18 — радиальное отверстие; 19 — осевой канал; 20 — пружина; 21 — упор; 22 — корпус; 23 — пружина; 24 — стержень; 25 — контактная пара; 26 — диэлектрик

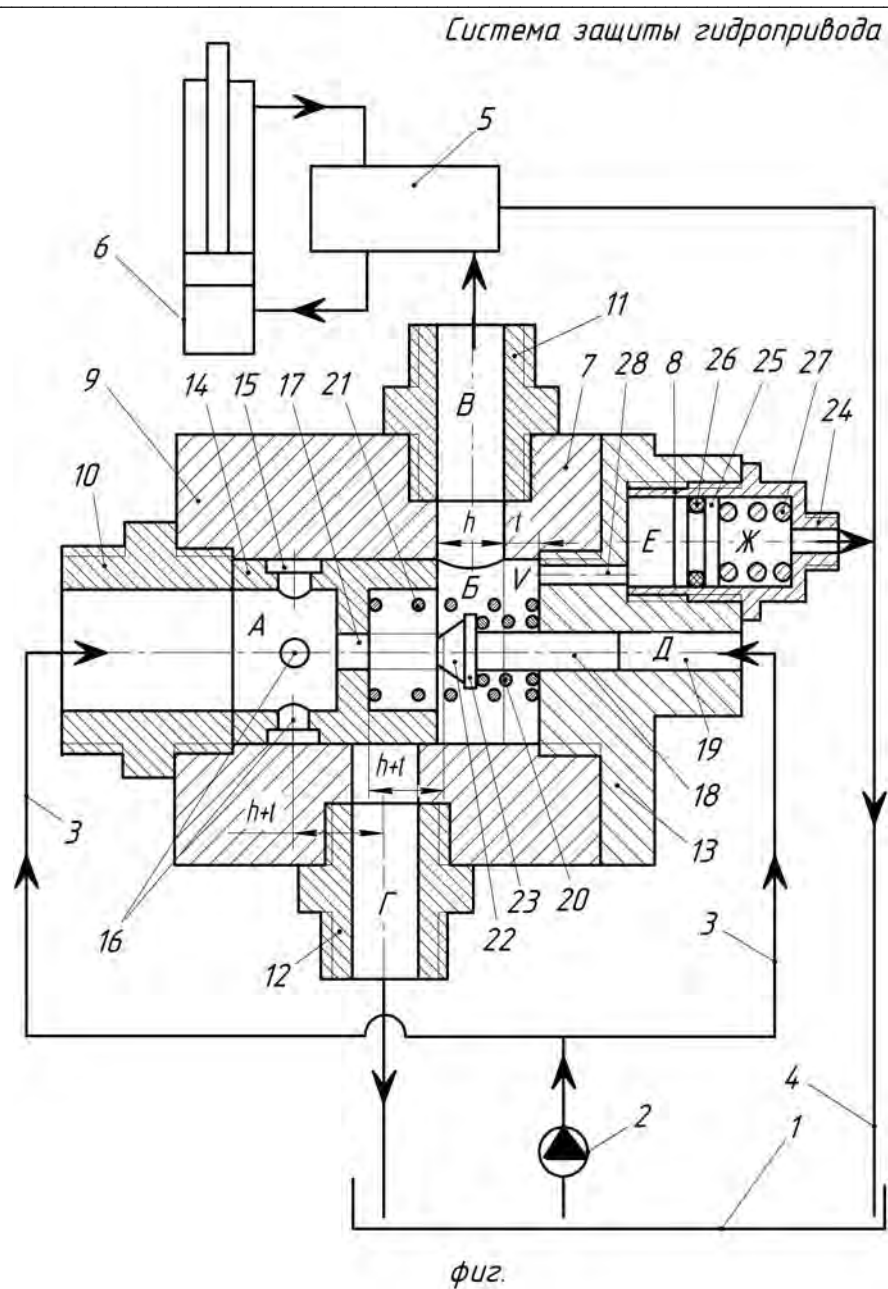
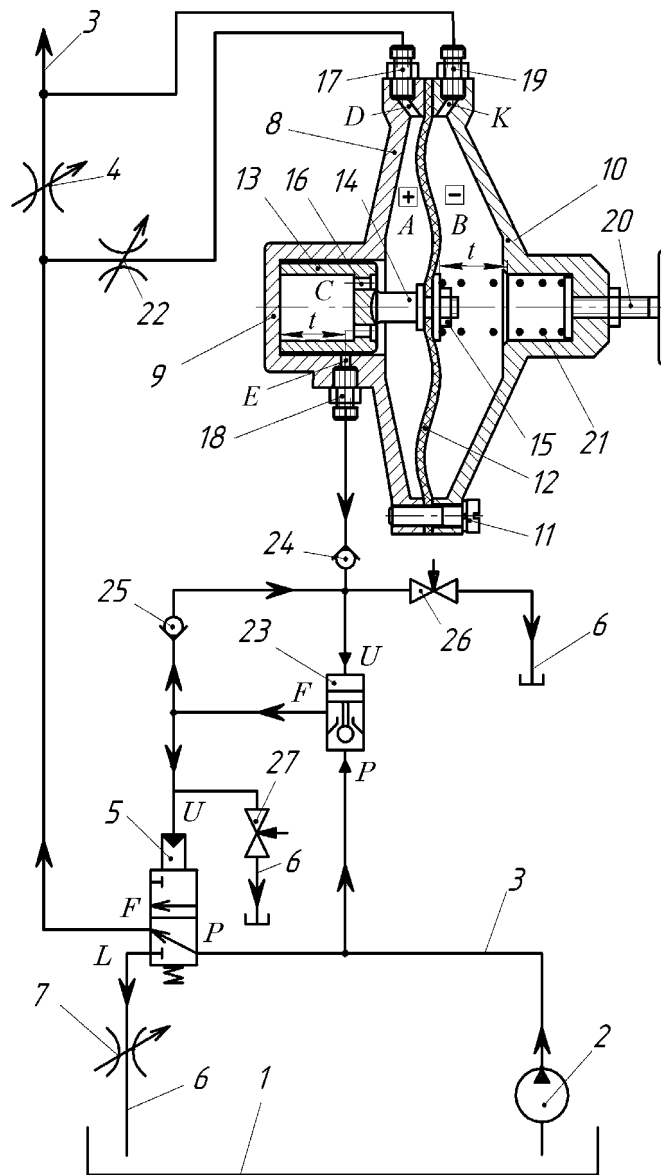


Рис. 5. Разгрузочный клапан запорного устройства системы защиты гидропривода: 1 — гидробак; 2 — насос; 3 — напорная гидролиния; 4 — сливная гидролиния; 5 — распределитель; 6 — гидродвигатель; 7 — запорное устройство; 8 — разгрузочный клапан; 9 — корпус; 10, 11, 12 — штуцеры; 13 — упор; 14 — плунжер; 15 — проточка; 16 — радиальное отверстие; 17 — осевой канал; 18 — плунжер; 19 — сквозное отверстие; 20, 21 — пружины; 22 — корпус; 23 — буртик; 24 — штуцер; 25 — поршень; 26 — кольцо; 27 — пружина; 28 — канал

Гидропривод



Фиг.

Рис. 6. Разгрузочный клапан запорного устройства системы защиты гидропривода: 1 — гидробак; 2 — насос; 3 — напорная гидролиния; 4 — дроссель; 5 — распределитель; 6 — сливная гидролиния; 7 — дроссель; 8 — датчик; 9 — корпус; 10 — крышка; 11 — резьбовое крепление; 12 — диафрагма; 13 — плунжер; 14 — шток; 15 — резьбовое крепление; 16 — канал; 17 — штуцер; 18 — контргайка; 19 — штуцер; 20 — регулировочный винт; 21 — пружина; 22 — дроссель; 23 — гидрозамок; 24 — клапан; 25 — клапан; 26 — вентиль; 27 — вентиль

Система защиты гидропривода

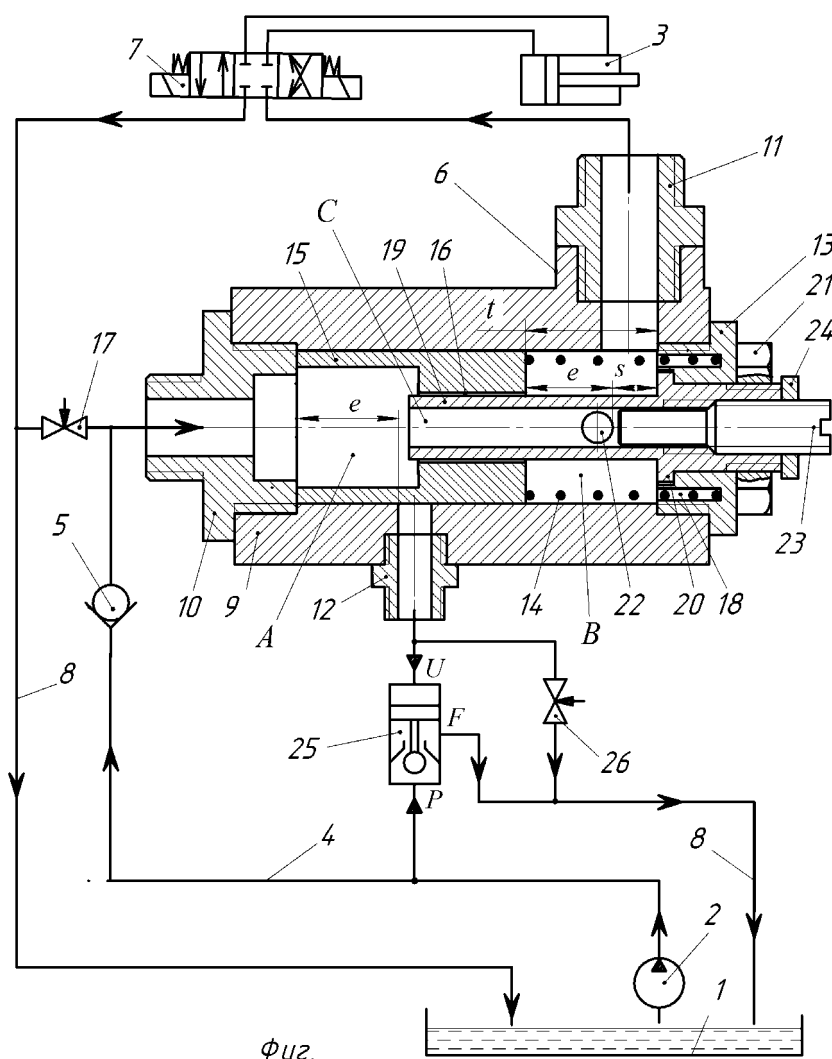


Рис. 7. Плунжерное запорное устройство система защиты гидропривода: 1 — гидробак; 2 — насос; 3 — гидропривод; 4 — напорная гидролиния; 5 — обратный клапан; 6 — запорное устройство; 7 — распределитель; 8 — сливная гидролиния; 9 — корпус; 10, 11, 12 — штуцеры; 13 — упор; 14 — пружина; 15 — плунжер; 16 — осевой канал; 17 — запорный вентиль; 18 — гнездо; 19 — шток; 20 — буртик; 21 — гайка; 22 — радиальное отверстие; 23 — регулировочный винт; 24 — контргайка; 25 — гидрозамок; 26 — вентиль

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фоменко Н. А. Совершенствование эксплуатационных свойств гидравлических систем машинно-тракторных агрегатов: дис... канд. техн. наук. Волгоград, 2002. 166 с.
2. Фоменко Н. А., Богданов В. И., Алексиков С. В. Ресурсосберегающая гидравлическая система строительной техники: сб. науч. тр. по материалам Международной науч.-практ. конф. Саратов, 2014. С. 221—224.
3. Сердобинцев Ю. П., Бурлаченко О. В., Схиртладзе А. А. Повышение качества функционирования технологического оборудования: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2010. 411 с.
4. Снижение энергии гидравлического удара в запорном устройстве гидросистемы строительной дорожной техники / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков,

Н. В. Сапожкова // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2015. Вып. 1(37). Ст. 3. Режим доступа : <http://www.vestnik.vgasu.ru>

5. *Фоменко В. Н., Перельмитер В. И., Фоменко Н. А., Шевчук В. П.* Гидравлическая система; пат. RU 15764U17F15B21/00.

6. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Сапожкова Н. В.* Пути совершенствования гидропривода тягово-транспортных средств // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 218—222.

7. Совершенствование гидравлической системы строительной техники / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков, Н. В. Сапожкова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 38(57). С. 120—124.

8. Система защиты гидропривода строительного дорожных машин / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 219—229.

9. Повышение надежности запорного устройства системы защиты гидропривода строительного дорожных машин / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 41(60). С. 169—180.

10. Разгрузочный клапан системы защиты гидропривода машин / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 163—173.

11. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Фоменко В. Н.* Трубопровод высокого давления: пат. RU 2511926 C2 Рос. Федерация МПК F 15 B 20/00 (2006.01).

12. Трубопровод гидросистемы строительного дорожных машин / Н. А. Фоменко, С. В. Алексиков, В. И. Богданов, Н. В. Сапожкова // Вестник развития науки и образования. 2014. Вып. 3. С. 115—117.

13. *Перельмитер В. И.* Гидравлическая система: пат. SU 1822471 A3 F 15 B 20/00.

14. Система защиты гидропривода: пат. SU1813937A1F15B20/00 / Н. А. Фоменко, С. В. Дубинский, Г. И. Голобута, Г. П. Лышко.

15. Гидравлическая система: пат. RU 15764U17F15B21/00 / В. Н. Фоменко, В. И. Перельмитер, Н. А. Фоменко, В. П. Шевчук.

16. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В.* Система защиты гидропривода: пат. № 2549754C1 Рос. Федерация МПК F15B20/00(2006.01).

17. Система защиты гидропривода: пат. RU 2556835 C1 Рос. Федерация МПК F 15 B 20/00 (2006.01) / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, С. В. Алексиков, В. Н. Фоменко, С. А. Богданов.

18. *Богданов В. И., Фоменко Н. А., Бурлаченко О. В.* Гидропривод : пат. заявка на изобретение № 2014152575 от 26.12.2014.

19. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В.* Система защиты гидропривода. Заявка на патент № 2014133230.

20. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В.* Система защиты гидропривода: заявка на патент 2014121185; Рос. Федерация.

© Бурлаченко О. В., Алексиков С. В., Фоменко Н. А., 2016

Поступила в редакцию
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Бурлаченко О. В., Алексиков С. В., Фоменко Н. А. Совершенствование гидромеханического способа защиты гидропривода строительного дорожных машин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 179—191.

Об авторах:

Бурлаченко Олег Васильевич — д-р техн. наук, проф., проректор по учебно-воспитательной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, oburlachenko@yandex.ru

Алексиков Сергей Васильевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, AL34rus@mail.ru

Фоменко Николай Александрович — канд. техн. наук, доц., Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

O. V. Burlachenko, S. V. Aleksikov, N. A. Fomenko

IMPROVEMENT OF HYDROMECHANICAL WAY OF PROTECTION OF HYDRAULIC GEAR OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES

The article provides patented by the authors constructions of hydromechanical way of protection of hydraulic gear of road and construction machines against unauthorized emission of power liquid at the destruction of high pressure hoses.

Key words: hydraulic gear, hydraulic system, high-pressure hose, protection of the hydraulic gear, locking device.

REFERENCES

1. Fomenko N. A. *Sovershenstvovanie ekspluatatsionnykh svoystv gidravlicheskikh sistem mashinno-traktornykh agregatov* [Improvement of operating properties of hydraulic systems of machine and tractor units. Cand. Eng. Sci. Diss.]. Volgograd, 2002. 166 p.
2. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Aleksikov S. V. *Resursosberegayushchaya gidravlicheskaya sistema stroitel'noi tekhniki* [Resource-saving hydraulic system of construction equipment. Proc. of the Int. sci.-pract. conf.]. Saratov, 2014. Pp. 221—224
3. Serdobintsev Yu. P., Burlachenko O. V., Skhirtladze A. G. *Povyshenie kachestva funktsionirovaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya: monografiya* [Quality improvement of processing equipment functioning]. Staryi Oskol, TNT Publ., 2010. 411 p.
4. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V., Sapozhkova N. V. [Reduce on energy hydraulic shock in lock protection device of the hydraulic system of construction and road machines]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2015, no. 1(37), paper 3. Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
5. Fomenko V. N., Perel'miter V. I., Fomenko N. A., Shevchuk V. P. *Gidravlicheskaya sistema* [Hydraulic System. Patent RF, no. RU 15764U17F15B21/00].
6. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Sapozhkova N. V. [Ways of improvement of a hydraulic actuator of traction vehicles]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 36(55), pp. 218—222.
7. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V., Sapozhkova N. V. [Improvement of hydraulic system of construction equipment]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 38(57), pp. 120—124.
8. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V. [Protection system of hydraulic drive of road-building machines]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 219—229.
9. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V. [Reliability improvement of the locking structure of the protection system of hydraulic gear of construction and road cars]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 41(60), pp. 169—180.
10. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V. [Relief valve of protection system of hydraulic drive of a machine]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 163—173.

11. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Fomenko V. N. *Truboprovod vysokogo davleniya* [High pressure pipeline. Pat. RU 2511926 C2 Russian Federation MPK F 15 B 20/00 (2006.01)].
12. Fomenko N. A., Aleksikov S. V., Bogdanov V. I., Sapozhkova N. V. [Pipeline of the hydraulic system of construction-road machines]. *Vestnik razvitiya nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Development of Science and Education], 2014, no. 3. pp. 115—117.
13. Perel'miter V. I. *Gidravlicheskaya sistema* [Hydraulic system. Pat. RF, no. SU 1822471 A3 F 15 B 20/00].
14. Fomenko N. A., Dubinskii S. V., Golobuta G. I., Lyshko G. P. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of Hydraulic Control Protection. Pat. RF, no. SU 1813937A1F15B20/00].
15. Fomenko V. N., Perel'miter V. I., Fomenko N. A., Shevchuk V. P. *Gidravlicheskaya sistema* [Hydraulic System. Patent RF, no. RU 15764U17F15B21/00].
16. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of protection of a hydraulic gear. Pat. RF no. 2549754C1 MPKF15B20/00(2006.01)].
17. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Aleksikov S. V., Fomenko V. N., Bogdanov S. A. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of protection of a hydraulic gear. Pat. RU 2556835 C1; Russian Federation].
18. Bogdanov V. I., Fomenko N. A., Burlachenko O. V. *Gidroprivod* [Hydraulic gear. Pat. application for the invention no. 2014152575 from 26.12.2014].
19. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of protection of a hydraulic gear. Application for the invention no. 2014133230].
20. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of protection of a hydraulic gear. Pat. application 2014121185; Russian Federation].

For citation:

Burlachenko O. V., Aleksikov S. V., Fomenko N. A. [Improvement of hydromechanical way of protection of hydraulic gear of road construction machines]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 179—191.

About authors:

Burlachenko Oleg Vasil'evich — Doctor of Engineering Science, Professor, Vice-Rector for Studies and Educational Work, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, oburlachenko@yandex.ru

Aleksikov Sergei Vasil'evich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, AL34rus@mail.ru

Fomenko Nikolai Aleksandrovich — Candidate of Engineering Science, Docent, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 656.135: 625.711 (470.45)

С. В. Алексиов, С. А. Лищинский

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ОБОСНОВАНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДА ВЕСЕННЕГО ОГРАНИЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА В ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

В статье рассмотрено воздействие большегрузных транспортных средств на местную дорожную сеть. Проанализированы существующие методики, выявлены сроки начала и продолжительности весеннего ограничения движения на автомобильных дорогах Волгоградской области.

К л ю ч е в ы е с л о в а: большегрузные транспортные средства, местная дорожная сеть, колеи, период весеннего ограничения движения.

В процессе формирования и развития международных транспортных коридоров РФ наблюдается частичное перераспределение транспортных потоков с федеральных автомагистралей на региональную дорожную сеть. Движение большегрузного транспорта по местным дорогам Волгоградской области преимущественно связано с перевозками местной сельскохозяйственной продукции или желанием водителей сократить протяженность маршрутов. Значительная часть грузоперевозок выполняется большегрузными многоосными автомобилями, имеющие перегруз до 40 %. Местная дорожная сеть, построенная в 60—70-е годы прошлого столетия на расчетную осевую нагрузку 6...8 т, изношена на 50...60 % из-за хронического недоремонта. При движении автопоездов со скоростью более 100 км/ч по неровной проезжей части в дорожных конструкциях возникают значительные напряжения, превышающие проектные. Вследствие этого дорожное покрытие не способно сохранить свои эксплуатационные характеристики в нормативных допусках (рис. 1).



Рис. 1. Сетка трещин на участке автомобильной дороги
Волгоград — Краснослободск — Средняя Ахтуба

Протяженность покрытия с колеиностью, превышающей нормативную, достигает 86 % (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

*Колеиность на проезжей части местных дорог,
 превышающая нормативные значения*

Автомобильная дорога	Полоса справа, км	Полоса слева, км	Полоса справа, % от общей протяженности	Полоса слева, % от общей протяженности
Волгоград — Краснослободск — Средняя Ахтуба	19,3	15,1	86,6	67,9
Червленое — Калач-на-Дону	16,1	9,7	27,2	16,4
Иловля — Ольховка — Камышин	17,1	12,9	11,6	8,7

Более 50 % протяженности дорог имеет недопустимые разрушения, средний балл состояния асфальтобетонного покрытия для деформированных участков $B_{cp} < 2,5$ (рис. 2).

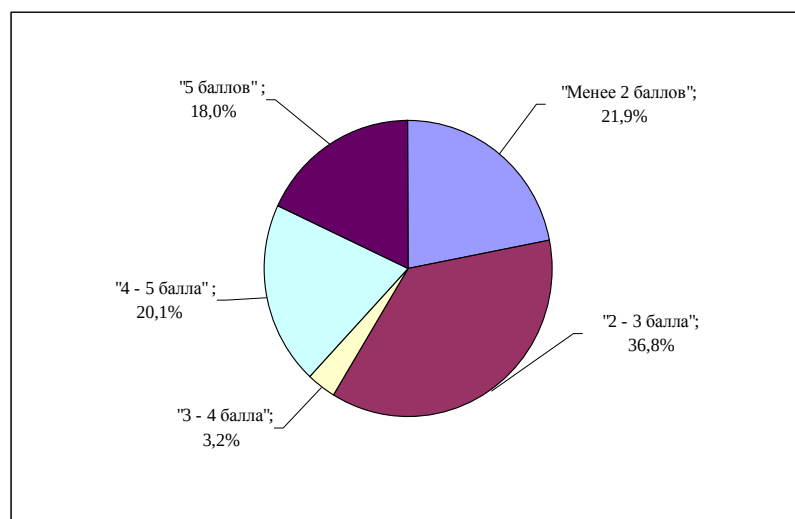


Рис. 2. Протяженность участков с различной бальной оценкой в процентном соотношении

Исследования показали, что доля грузовых автомобилей грузоподъемностью 1...2 т в составе движения составляет от 4,4 до 11,3 %, грузоподъемностью от 2 до 5 т — от 1,8 до 8 %, от 5 до 8 т — от 2 до 11 %, свыше 8 т — от 2,7 до 10,9 % (рис. 3).

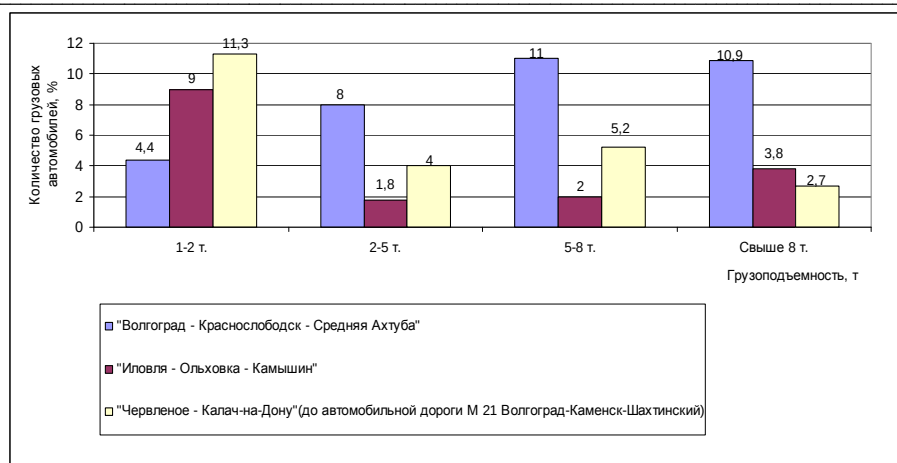


Рис. 3. Состав грузового движения на региональной дорожной сети Волгоградской области

В условиях дефицита финансирования отрасли и существенного износа местной дорожной сети дорожные организации вынуждены вводить сезонное (весеннее) ограничение движения грузовых транспортных средств. Для Волгоградской области ограничение вводится с 1 по 30 апреля для автомобилей с осевой нагрузкой более 5 т^{1,2}. Указанные сроки требуют уточнения, так как преждевременное ограничение движения автотранспорта приводит к значительным транспортным издержкам, а запаздывание сроков к более интенсивному разрушению дорожной конструкции.

Обоснование сроков ограничения движения грузового транспорта (расчетного периода) на дорогах Юга РФ рассмотрено в работе [1]. В результате многолетних исследований, выявлено, что продолжительность расчетного периода зависит от критической глубины оттаивания и среднесуточной скорости оттаивания. Критическая глубина оттаивания составляет 120 см³ [2]. Учитывая, что глубина промерзания дорожного полотна в Волгоградской области 120...140 см [3], продолжительность ограничения движения (T_p) можно рассчитать по формуле

$$T_p = kg \frac{h_{от}}{v_{от}}, \quad (1)$$

где $h_{от}$ — критическая глубина оттаивания дорожной конструкции, см; $v_{от}$ — среднесуточная скорость оттаивания дорожной конструкции, см/сут.; k —

¹ Постановление Администрации Волгоградской области от 10 марта 2015 г. №100-п «О временном ограничении движения транспортных средств по автомобильным дорогам общего пользования регионального или межмуниципального значения Волгоградской области в весенний период 2015 года».

² Постановление Администрации Волгоградской области от 8 августа 2011 г. N 408-п «Об утверждении Порядка осуществления временных ограничения или прекращения движения транспортных средств по автомобильным дорогам регионального или межмуниципального, местного значения Волгоградской области».

³ СТО 03—2012. Руководство по определению оптимальных сроков ограничения осевых нагрузок на региональных или межмуниципальных автомобильных дорогах Хабаровского края.

эмпирический коэффициент, учитывающий состояние покрытия дорожной одежды [4]; g — коэффициент, учитывающий тип грунта (для суглинистых и глинистых грунтов равен 1, для супесчаных и песчаных равен 0,9⁴).

Скорость оттаивания дорожного полотна, приведенная в нормативно-технической литературе составляет 1...5 см/сут., требует уточнения в условиях Волгоградской области. Согласно⁵, для расчета средней скорости оттаивания грунта земляного полотна можно рекомендовать зависимость, см/сут.:

$$v_{от} = \frac{5,8\alpha\bar{H}(\tau_{\Omega})}{\tau_{\Omega}^{(+)}}, \quad (2)$$

где $\bar{H}(\tau_{\Omega})$ — среднееголетняя максимальная глубина промерзания грунта, согласно [3] равна 140 см; $\tau_{\Omega}^{(+)}$ — среднееголетняя продолжительность теплого периода, определяемая как $T - \tau_{\Omega}^{(-)}$ ⁵; α — коэффициент увеличения скорости оттаивания земляного полотна, зависит от разницы в теплопроводности почво-грунта открытого поля и дорожной конструкции.

Известно, что скорость оттаивания земляного полотна выше, чем скорость оттаивания почво-грунта. Это объясняется разницей в альбедо дорожного покрытия и грунтовой поверхности а также расчисткой проезжей части от снега и льда. Согласно [1] средний коэффициент увеличения скоростей оттаивания α равен 1,71.

В соответствии с исследованиями проф. А. М. Каменева [3] на территории Волгоградской области можно условно выделить три района по дорожно-климатическим условиям:

северный (Урюпинск, Новониколаевский район, Жирновск, Котово, Новоаннинский район);

центральный (Фролово, Серафимович, Иловля, Быково);

южный (Котельниково, Октябрьский, Светлый Яр).

Расчеты показали, что указанных районов скорость оттаивания земляного полотна изменяется от 3,4 до 5,0 см/сут. Согласно [3], средняя величина скорости оттаивания дорожных конструкций составляет 3,1 см/сут.

Для дорог с нормативным эксплуатационным состоянием проезжей части ($k = 1$) продолжительность весеннего ограничения движения составит 39 сут.

Датой начала периода весеннего ограничения движения транспортных средств является дата устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С⁴ [4]. Вероятностный анализ климатических условий Волгоградской области позволил обосновать даты начала весеннего ограничения движения грузового транспорта с уровнем надежности 90 % [5] (табл. 2). Приведенная методика и табл. 2 позволяют повысить обоснованность решений по весеннему ограничению движения грузового транспорта по территориальной дорожной сети в зависимости от района области, грунта земляного полотна и эксплуатационного состояния (степени разрушения) проезжей части.

⁴ СТО 03-2012 — Руководство по определению оптимальных сроков ограничения осевых нагрузок на региональных или межмуниципальных автомобильных дорогах Хабаровского края.

⁵ ОДН 218.0.006-2002. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог (взамен ВСН 6-90).

Т а б л и ц а 2

Даты начала и продолжительности весеннего ограничения движения грузового транспорта для районов Волгоградской области

Районы Волгоградской области	Изменения $v_{от}$ см/сут.	Среднее значение $v_{от}$ см/сут.	Дата начала периода весеннего ограничения движения транспортных средств с 90 % надежности	Продолжительность весеннего ограничения движения с учетом типа грунта насыпи	
				суглини- стые и глинистые	супесчаные и песчаные
Северный	3,4...5	4,2	10.04	39	35
Центральный	3,75...4,8	4,3	05.04	39	35
Южный	4,6...5	4,8	02.04	39	35

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. В условиях дефицита финансирования дорожной отрасли и необходимости пропуска большегрузного транспорта по местным дорогам важно обеспечить сохранность территориальной дорожной сети в весенний расчетный период. Постановление Администрации Волгоградской области от 10 марта 2015 г. №100-п «О временном ограничении движения транспортных средств по автомобильным дорогам общего пользования регионального или межмуниципального значения Волгоградской области в весенний период» носит усредненный характер и требует уточнения.

2. Учитывая значительную территорию Волгоградской области и весьма разнообразные климатические условия эксплуатации региональных дорог, обоснование сроков весеннего ограничения движения транспорта следует выполнять по формулам (1) и (2) с учетом эксплуатационного состояния (степени разрушения) проезжей части, типа грунта земляного полотна и района области (см. табл. 2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кулижников А. М. Анализ скоростей оттаивания дорожных конструкций // Дороги и мосты. 2008. № 2. С. 39—53.
2. Пугачев И. Н. Обоснование сроков ограничения нагрузки на автомобильные дороги в период весенней распутицы в зависимости от природно-климатических условий (на примере Южной части Дальнего Востока): автореф. дис... канд. техн. наук. Хабаровск, 2001. 17 с.
3. Киреев С. Н., Каменев А. М. Определение глубины промерзания дорожных конструкций на участках с неблагоприятными условиями увлажнения // Ежегодная научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава и студентов ВолгГАСУ, Волгоград, 24—27 апреля 2007 г. Волгоград: ВолгГАСУ. С. 190—193.
4. Васильев А. П., Сиденко В. М. Эксплуатация автомобильных дорог и организация дорожного движения / под ред. А. П. Васильева. М.: Транспорт, 1990. 304 с.
5. Агроклиматический справочник по Волгоградской области. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 144 с.

© Алексиков С. В., Лищинский С. А., 2016

Поступила в редакцию
в марте 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Алексиков С. В., Лищинский С. А. Обоснование продолжительности периода весеннего ограничения движения автотранспорта в Волгоградской области // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44(63). Ч. 1. С. 192—197.

Об авторах:

Алексиков Сергей Васильевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, al34rus@mail.ru

Лищинский Сергей Анатольевич — аспирант кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, sergeyirbis@mail.ru

S. V. Aleksikov, S. A. Lishchinskii

JUSTIFICATION OF DURATION OF THE PERIOD OF SPRING LIMIT OF TRAFFIC IN VOLGOGRAD OBLAST

The article considers the impact of heavy vehicles on the local road network. The existing methods are analyzed, the starting date and duration of the spring limit of traffic on the roads in Volgograd Oblast are revealed.

Key words: heavy vehicles, local road network, rut, limit of traffic during the spring.

REFERENCES

1. Kulizhnikov A. M. [Defrosting speed analysis of road constructions]. *Dorogi i mosty* [Roads and bridges], 2008, no. 2, pp. 39—53.
2. Pugachev I. N. *Obosnovanie srokov ogranicheniya nagruzki na avtomobil'nye dorogi v period vesennei rasputitsy v zavisimosti ot prirodno-klimaticheskikh uslovii (na primere Yuzhnoi chasti Dal'nego Vostoka)* [Justification of terms of load limiting on highways during spring season of bad roads depending on climatic conditions (on the example of the Southern part of the Far East). Cand. Eng. Sci. Diss.]. Khabarovsk, 2001. 17 p.
3. Kireev S. N., Kamenev A. M. [Determination of frost depth of road structures in areas with adverse moisture conditions]. *Ezhegodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava i studentov VolgGASU, Volgograd, 24—27 aprelya 2007 g.* [Annual scientific and practical conference of the academic staff of VSUACE, Volgograd, 24—27 April, 2007]. Volgograd, VSUACE Publ. Pp. 190—193.
4. Vasil'ev A. P., Sidenko V. M. *Ekspluatatsiya avtomobil'nykh dorog i organizatsiya dorozhnogo dvizheniya* [Highway operation and traffic organization]. Moscow, Transport Publ., 1990. 304 p.
5. *Agroklimaticheskii spravochnik po Volgogradskoi oblasti* [Agro-climatic reference book on Volgograd Oblast]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1967. 144 p.

For citation:

Aleksikov S. V., Lishchinskii S. A. [Justification of duration of the period of spring limit of traffic in Volgograd oblast]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 44(63), p. 1, pp. 192—197.

About authors:

Aleksikov Sergei Vasil'evich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, Al34rus@mail.ru

Lishchinskii Sergei Anatol'evich — Postgraduate student of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, sergeyirbis@mail.ru

Рецензия на учебное пособие «Лабораторные работы по грунтоведению» / под ред. В. Т. Трофимова и В. А. Королева. М.: Высшая школа, 2008. 519 с.: ил.

В 2008 г. в издательстве «Высшая школа» вышло учебное пособие «Лабораторные работы по грунтоведению», которое за короткий срок получило широкую известность и быстро разошлось по многочисленным читателям. Прошедшие годы показали полезность и необходимость этого издания.



Авторами и редакторами этого пособия были крупные специалисты по грунтоведению, их имена известны в России и за рубежом. Это издание учебного пособия было подготовлено значительным коллективом авторов — преподавателей и научных сотрудников кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, которые в течение ряда лет ведут или вели в МГУ теоретические и практические занятия по курсу «Грунтоведение» и имеют большой практический опыт преподавания данной дисциплины. Авторы издания — известные в нашей стране инженеры-геологи: зав. кафедрой профессор В. Т. Трофимов, профессора В. А. Королев, Е. А. Вознесенский, В. Н. Соколов, доценты Т. В. Андреева,

С. К. Николаева, Е. Н. Самарин, старшие научные сотрудники, кандидаты геол.-мин. наук В. М. Ладыгин, Л. Л. Панасьян, В. Г. Шлыков и др.

Содержание учебного пособия полностью соответствует ныне действующей профессиональной образовательной программе ФГОС 3+ по направлению «Геология». В учебном пособии приведен полный комплекс лабораторных работ по курсу «Грунтоведение», предусмотренный программой специальности «Гидрогеология и инженерная геология» направления «Геология». Однако оно может успешно использоваться и при изучении грунтов в рамках любой геологической специальности в высших учебных заведениях страны, в том числе и по направлению «Прикладная геология» студентами, обучающимися по специальности «Поиск и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания» и др., а также аспирантами и сотрудниками научных и производственных изыскательских организаций.

Содержание и структура учебного пособия оригинальны и соответствуют структуре учебника для вузов «Грунтоведение»¹, вышедшего в 2005 г. Настоящее издание было существенно переработано и дополнено авторами исходя из новейших достижений в области грунтоведения, появившихся за последнее время. Структура пособия в целом осталась прежней: в первой части

¹ Грунтоведение / В. Т. Трофимов, В. А. Королев, Е. А. Вознесенский, Г. А. Голодковская, Ю. К. Васильчук, Р. С. Зиангиров; под ред. В. Т. Трофимова. 6-е изд. перераб. и доп. М.: МГУ, 2005. 1024 с. (Сер.: Классический университетский учебник).

пособия рассматриваются методы изучения состава и строения грунтов, во второй — методы изучения свойств грунтов (химических, физико-химических, физических и физико-механических), а в третьей излагаются методы обработки и анализа экспериментальных данных, включая статистические.

Рецензируемое издание содержит как общепринятые и хорошо апробированные методы исследований грунтов (описанные в ГОСТах или иных нормативных документах), так и новые оригинальные лабораторные методы изучения состава, состояния, строения и свойств различных грунтов. По сравнению с предыдущим изданием настоящее дополнено целым рядом новых методов, появившихся в последнее время в области грунтоведения, в том числе с учетом разработки новых приборов, аналитического оборудования и т. п. Кардинально был переработан раздел «Изучение химического состава твердого компонента грунтов», написанный с учетом новых аналитических методов и приборов. Появилась новая глава «Методы изучения химических свойств грунтов». Многие отдельные лабораторные работы по изучению свойств грунтов переработаны или написаны заново с учетом новейшего оборудования, появившегося на кафедре за последнее время. Наконец, третья часть учебного пособия также по-сути написана заново, она дополнена такими новыми разделами, как «Инженерно-геологический элемент. Нормативные и расчетные показатели свойств грунтов».

В пособии описание лабораторных работ приводится по единому плану: вначале дается краткая характеристика того или иного свойства (или изучаемого показателя), затем — методы, применяемые для изучения данного свойства, необходимое оборудование и аппаратура, и затем описывается ход определения, последовательность проведения испытаний и порядок обработки получаемых результатов. В конце приводятся рекомендуемые формы журналов или отчетов по той или иной работе с соответствующим примером расчета.

Пособие гораздо лучше иллюстрировано, чем предыдущее издание. Почти для всех лабораторных работ даются рисунки или фотографии необходимого оборудования, приборов, что значительно облегчает выполнение практических работ.

Научный уровень содержательной части пособия высокий и полностью отвечает современным требованиям инженерной геологии. Методический уровень пособия также соответствует современным требованиям, он полностью адаптирован к студентам и существующим образовательным технологиям в области инженерной геологии и грунтоведения. Практические вопросы в пособии освещены просто и в то же время достаточно полно. Психолого-педагогические требования к трактовке излагаемого в учебном пособии материала авторами удачно соблюдены, пособие написано простым и доходчивым языком.

Несмотря на значительный тираж (пособие вышло в издательстве «Высшая школа» тиражом 2 тыс. экземпляров), по прошествии более чем 8 лет с момента выхода этого пособия оно стало редким и труднодоступным для студентов. Сократились его запасы в библиотеках вузов. Это пособие являлось в прошедший период основным практическим руководством по грунтоведению как в вузах, так и во многих проектно-изыскательских организациях.

Учебному пособию был присвоен гриф Министерства образования и науки РФ, аналогичный предыдущему первому изданию. Безусловно, назрела необходимость подготовки нового издания этого пособия.

В заключение можно констатировать, что рассматриваемое учебное пособие сыграло значительную роль в подготовке грунтоведов и инженеров-геологов в нашей стране. Это издание было широко востребовано и использовалось студентами и аспирантами многих вузов России, горных и строительных учебных заведений, а также преподавателями и научными работниками в области инженерной геологии, грунтоведения, почвоведения и др.

**Доктор геолого-минералогических наук,
профессор кафедры гидротехнических
и земляных сооружений ВолгГАСУ**

ОЛЯНСКИЙ Ю. И.

ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ

«Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета» со второго полугодия 2007 г. временно выходит в одной серии «Строительство и архитектура», по 4 выпуска ежегодно.

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Библиографические сведения о публикациях в журнале, пристатейные списки литературы и полные тексты статей представлены в **Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)** на сайте Научной электронной библиотеки www.elibrary.ru.

«Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия «Строительство и архитектура» входит в базу данных **Ulrich's Periodicals Directory** американского издательства Bowker, являющуюся самой крупной базой, описывающей мировой поток сериальных (периодических и продолжающихся) изданий. Активно используется научными учреждениями для анализа мирового потока сериальных изданий.

Серия включена в базу данных **DOAJ — Directory of Open Access Journals** (Директория журналов открытого доступа) научной библиотеки университета г. Лунд (Швеция), www.doaj.org, обеспечивающую открытый доступ к полнотекстовым материалам научных и академических журналов на различных языках, поддерживающих систему контроля качества публикуемых статей.

Требования к оформлению статей и сопроводительных материалов. Статью необходимо представить на электронном носителе и в распечатанном виде (2 экз.) в сопровождении заполненного автором *лицензионного договора* (2 экз.) (скачать бланк по адресу <http://www.vgasu.ru/attachments/ld-blank.pdf>), *анкеты* согласия автора на доступ к его персональным данным неограниченного круга лиц (скачать бланк по адресу <http://www.vgasu.ru/attachments/pdsog.pdf>), *выписки из протокола* заседания кафедры и одной *рецензии*. К статьям прилагается экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати. Все сопроводительные документы представляются на бумажных носителях в оригинале.

В *отдельном файле* помещаются сведения об авторах на русском и английском языках, а также кириллицей и латиницей в полном соответствии с данными в заполненном бланке *анкеты* (см. выше): фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень, звание, должность, место работы; наименование и код научной специальности (по Номенклатуре), по которой автор проводит диссертационное исследование; почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты.

В статье приводятся: *индекс УДК*; на русском и английском языках: *фамилия и инициалы автора, заглавие, аннотация* (на русском языке до 500 знаков, на английском — от 500 знаков до целой страницы), *ключевые слова*. Текст статьи завершается личной подписью автора (соавторов).

Объем статьи — от 10 с. установленного формата «Вестника» (см. ниже), включая название, аннотации, ключевые слова, текст, таблицы, рисунки, библиографический список. Последняя страница считается полной независимо от фактического заполнения.

Оригинал статьи должен быть набран с помощью пакета программ *Microsoft Office (Word 2003)*; шрифт *основного текста* — Times New Roman (Сур) № 11 (11 пунктов). Параметры страницы — поля, см: верхнее — 3,7; нижнее — 4,5; левое — 2,0; правое — 6,0; переплет — 0, поля зеркальные. Расстояние от края до верхнего колонтитула, см — 3,0, от края до нижнего колонтитула — 3,7. Абзацный отступ равен 0,75 см. Межстрочный интервал одинарный. Автоматически устанавливаются переносы (не более 4 подряд в одном абзаце). Автоматически устанавливается запрет висячих строк.

Для *набора формул* используется редактор формул *Microsoft MathType 5*; по умолчанию устанавливаются размеры шрифта для одно- и двухстрочных формул: обычного — 11 пт, крупного и мелкого индекса — соответственно 8 и 6 пунктов, крупного и мелкого символа — соответственно 16 и 11 пунктов. Греческие и русские буквы набираются прямым шрифтом, латинские — курсивом. Если написание в формулах отличается от традиционного, автор должен сделать соответствующие пометки на полях распечатанной статьи, при этом греческие буквы обводятся красным карандашом, готические — синим. Формулы выключаются в левый край с абзацным отступом. Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

Векторные рисунки, сохраненные в формате WMF, *растровые* — в TIF или BMP; *графики и диаграммы*, построенные в *Microsoft Excel*, а также *рисунки*, созданные в *Corel Draw 12* или *AutoCAD 2006* и сохраненные в оригинальном формате, дополнительно помещаются на электронный носитель отдельными файлами. Имя файла должно соответствовать наименованию или номеру рисунка в тексте статьи. Кроме того, *иллюстрации* обязательно присылаются распечатанными на отдельных листах формата A4 в масштабе 1:1, в пригодном для сканирования виде. Размер шрифта текста в рисунках — 9-10 пт. *Подписи к рисункам* выполняются непосредственно в тексте статьи шрифтом Times № 10 (10 пт), экспликация в подрисунковой подписи — Times № 9 (9 пт). Для сжатия больших файлов использовать архиваторы *Arj* и *WinZip*, *WinRAR*.

Цветные и черно-белые фотографии присылать в оригинальном виде с подписями на обороте. Цифровые фотографии выполнять с разрешением не менее 300...600 dpi, присылать в электронном виде в любом графическом формате, кроме .jpg.

Текст *таблиц* набирается шрифтом Times New Roman (Сур) № 10 (10 пунктов).

Пристатейные *библиографические списки* размещаются после основного текста статьи.

В библиографическом списке приводится только цитируемая в статье литература. Библиографический список должен состоять не менее чем из 15 статей в научных журналах, из них 8 — иностранные. Источники группируются в списке в порядке упоминания в тексте. Ссылки на источники приводятся в тексте в квадратных скобках (запрещается использовать ссылки-сноски для указания источников). В библиографическую запись включаются только основные элементы библиографического описания (ГОСТ 7.0.5–2008). Разделительные знаки «тире» между областями опускаются. Шрифт Times New Roman (Сур) № 9 (9 пунктов). Язык библиографических записей соответствует языку описываемых источников.

Библиографический список приводится дважды. Во втором варианте все русскоязычные библиографические записи приводятся в переводе на английский язык, записи на других языках просто повторяются.

Авторы статей несут всю полноту ответственности за содержание статей и за сам факт их публикации. Редакция журнала не несет никакой ответственности перед авторами и/или третьими лицами и организациями за возможный ущерб, нанесенный публикацией статьи. Редакция исходит из того, что, *в соответствии с законодательством в части авторского права, автор, направляя статью в редакцию, полностью соглашается с условиями редакции и, следовательно, только сам лично несет ответственность за использование в тексте статьи материалов третьих лиц и соблюдение их авторских прав.* Все права автора и вся полнота его ответственности сохраняются и после публикации статьи в журнале.

Статьи проверяются на оригинальность с помощью системы «Антиплагиат». Требуемая оригинальность — не менее 80 %.

Порядок рецензирования. Статьи обсуждаются редколлегией, рецензии, поступившие в сопроводительных материалах, учитываются. Статьи могут быть направлены редакцией на дополнительную внутреннюю или внешнюю экспертизу (рецензирование) и опубликованы только при положительном заключении. Имена авторов и рецензентов друг другу не сообщаются. Копия заключения предоставляется автору.

Статьи, не отвечающие изложенным требованиям, редколлегией не принимаются. Материалы, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются.

Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста. Корректур статей авторам не предоставляется. Согласование редакционных и авторских изменений текста статьи (переписка, тел. переговоры) производится за счет автора.

Гонорар за опубликование статьи не выплачивается, плата за публикацию статей с аспирантов не взимается.

КОМПЛЕКТОВАНИЕ ОЧЕРЕДНОГО НОМЕРА ЗАВЕРШАЕТСЯ ЗА 3 МЕСЯЦА ДО ПЛАНИРУЕМОГО ВЫХОДА В СВЕТ.

Примерный график выпуска серии «Строительство и архитектура» — март (прием статей до 1 декабря); июнь (прием статей до 1 марта); сентябрь (прием статей до 1 июня); декабрь (прием статей до 1 сентября).

Тематические рубрики

Строительные конструкции, здания и сооружения. Основания, фундаменты, подземные сооружения. Строительная механика. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов. Строительные материалы и изделия. Гидротехническое строительство. Гидравлика и инженерная гидрология. Технология и организация строительства. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда в строительстве. Инновации в строительном производстве, интенсификация, энергосбережение и энергоэффективность. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности. Градостроительство. Теория развития города. Управление инвестиционно-градоостроительной деятельностью. Экологические проблемы градостроительства. Информационные технологии в строительстве и архитектуре. Научно-методический раздел. Организация высшего образования в области строительства и архитектуры. Методика преподавания дисциплин строительного и архитектурного направлений в вузе. Хроника.

Подробная информация о журнале представлена на сайте ВолгГАСУ www.vgasu.ru, в разделе *Наука / Научные журналы / Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета* (сразу после подписания выпуска в печать на сайте публикуются титул и содержание; через месяц со дня выхода очередного номера из печати на сайте размещается его полнотекстовый файл).

Статьи направлять по адресу: 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, ком. Б-314а. (8442)-96-98-46. E-mail: vorobiov_51_vi@list.ru (ответственный секретарь журнала Владимир Иванович Воробьев).

Уточнить условия публикации статей и приобретения очередного номера журнала можно по тел. (8442)-96-98-46 у ответственного секретаря редсовета журнала Владимира Ивановича Воробьева.

За консультацией по вопросам подготовки авторского оригинала статьи к печати обращаться по адресу: 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, ком. В-210, редакционно-издательский отдел ВолгГАСУ. Тел. (8442)-96-98-28. E-mail: mariaapes@mail.ru.

Вниманию читателей и авторов!
«Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета»
временно выходит в одной серии

«СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА» (4 выпуска в год).

Подписной индекс по каталогу «Пресса России» 85343,

на Интернет-сайте агентства «Книга-Сервис» — E85343

(по электронному каталогу можно подписаться и на текущие номера).

По вопросу приобретения ранее вышедших номеров журнала
обращаться по тел. 8-(844-2)-96-98-46 к отв. секретарю редсовета *В.И. Воробьеву*

Продолжается прием статей в очередные выпуски

серий **«Политематическая»** и **«Строительная информатика»**

электронного сетевого научно-технического журнала **«ИНТЕРНЕТ-ВЕСТНИК ВолгГАСУ»**.

*Журнал включен в **Перечень** ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации,*

в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций

на соискание ученой степени доктора и кандидата наук,

утвержденный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, свидетельство Эл № **ФС77-26286 от**
17.11.06, Международным центром ISSN, **ISSN 1994-0351**, перерегистрирован ФГУП НТЦ «Информре-
гистр», свидетельство № **594 от 20.10.11**, номер гос. рег. **0421200065** (на 2012 г.), включен в базу РИНЦ
(www.elibrary.ru).

Подробная информация на сайте журнала www.vestnik.vgasu.ru

«Интернет-вестник ВолгГАСУ» не является электронной версией печатного журнала.

Оба журнала содержат оригинальные публикации.

По вопросам публикации статей в научно-теоретическом журнале

«СОЦИОЛОГИЯ ГОРОДА»

обращаться к гл. редактору Б.А. Навроцкому по тел. 8-8442-96-99-25.

Подписаться на журнал можно по каталогу «Пресса России», подписной индекс **29507**

и по Интернет-каталогу на сайте агентства «Книга-Сервис», подписной индекс **E 29507**.

*Журнал включен в **Перечень** ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации,*

в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций

на соискание ученой степени доктора и кандидата наук,

утвержденный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, свидетельство Эл № **ФС77-26286 от**
17.11.06, Международным центром ISSN, **ISSN 1994-0351**, включен в базу РИНЦ (www.elibrary.ru).

Подробная информация о журнале на сайте ВолгГАСУ по адресу: www.vgasu.ru
в разделе Наука / Научные журналы.

Научное издание

**ВЕСТНИК
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

Научно-теоретический и производственно-практический журнал

**Серия: Строительство и архитектура
2016. Вып. 44(63). Ч. 1**

Редактор *И. Б. Чижикова*

Перевод на английский язык *О. Ю. Юшко*

Компьютерная правка и верстка *М. А. Денисова, А. Г. Сиволобова*

Компьютерный дизайн обложки *О. Ю. Мелешин*

Подписано в печать 30.05.2016. Формат 70 × 108/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Уч.-изд. л. 8,0. Усл. печ. л. 17,8. Тираж 500 экз. Заказ № 20

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»
Редакционно-издательский отдел
Отдел оперативной полиграфии
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1