

УДК 66.045.53

**Н. А. Меренцов^а, А. Б. Голованчиков^а, Е. А. Салыкин^а, В. Н. Лебедев^б,
В. В. Грошев^а, Д. Э. Абдулов^а, М. Ю. Волков^а**

^а *Волгоградский государственный технический университет*

^б *ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»*

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ АППАРАТА ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ С КАПЕЛЬНО-ПЛЕНОЧНЫМ РЕЖИМОМ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В НАСАДОЧНЫХ БЛОКАХ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00496,
<https://rscf.ru/project/25-29-00496/>, «Моделирование тепло- и массообменных процессов
в экологическом и нефтегазоперерабатывающем оборудовании с учетом структуры потоков»

Представлены результаты моделирования и расчета тепломассообменного аппарата испарительного охлаждения промышленной оборотной воды с капельно-плёночным режимом течения для локальной системы оборотного водоснабжения охлаждения компрессорного оборудования (газокомпрессорной установки) металлургического предприятия. Приведены перспективные методики классификации насадочных материалов для аппаратов испарительного охлаждения на основе анализа фильтрационных кривых течений воздушного потока через слои контактных устройств. Даны основные рекомендации к выбору типов тепломассообменных насадок для аппаратов испарительного охлаждения и конструктивному исполнению промышленных тепломассообменных аппаратов с учетом режимов их работы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: испарительное охлаждение, оборотная вода, градирни, системы водоснабжения, энерго- и ресурсосбережение, гидродинамика, газодинамика, тепло- и массообмен, капельный режим, плёночный режим, капельно-плёночный режим, насадочный материал, контактный блок.

Тепломассообменные процессы и аппараты испарительного охлаждения оборотной воды находят широкое применение в различных отраслях промышленности: химической, нефтегазоперерабатывающей, нефтехимической, строительной, энергетической, атомной, металлургической, пищевой, а также являются неотъемлемой частью замкнутых циклов локальных систем оборотного водоснабжения многих смежных отраслей [1—5]. Основным назначением подобного класса тепломассообменных аппаратов является съём низкопотенциального тепла воды, прошедшей оборотный цикл локальной системы водоснабжения. При этом аппараты испарительного охлаждения отличаются широким диапазоном производительностей по охлаждаемой оборотной воде и вариативностью конструктивных исполнений — от малогабаритных вентиляторных до башенных, ориентированных на высокие производительности в энергетической и атомной промышленности [1, 2]. В данной работе речь пойдет о вентиляторных градирнях (аппаратах испарительного охлаждения), т. к. они обладают наивысшей тепловой производительностью и отличаются высокой интенсивностью протекающих тепло- и массообменных процессов, кроме того, отвечают всем акцентированным требованиям локальных систем оборотного водоснабжения малотоннажных многономенклатурных производств, что, несомненно, является актуальным направлением [1—5]. Следует отметить активную работу ведущих исследователей в области совершенствования математического моделирования тепло- и массообменных аппаратов испарительного охлаждения [6—19] и разработки новых усовершенствованных видов насадочных контактных устройств, отвечающим специальным требованиям протекающих

гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов в насадочных блоках [20—34].

Режимы течения жидкости в насадочных блоках тепломассообменных аппаратов испарительного охлаждения могут быть укрупненно классифицированы на 3 основных класса: капельные, пленочные и капельно-пленочные. В рамках малотоннажных аппаратов промышленную реализацию получают оросители (насадочные блоки) с пленочными и капельно-пленочными режимами течения охлаждаемой воды в контактных блоках. Это происходит по ряду причин: высокая удельная тепловая производительность (высокий тепловой КПД), компактность, сравнительно низкие показатели уноса (потерь оборотной воды) в ходе процесса испарительного охлаждения и др.

Целью данной работы является моделирование и расчет тепломассообменного аппарата испарительного охлаждения оборотной воды с реализацией капельно-пленочного режима течения жидкости в насадочных блоках, а также разбор основных рекомендаций к конструктивным исполнениям насадочных контактных блоков и корпусов тепломассообменных аппаратов. При этом акцент сделан на относительно малые производительности по охлаждаемой воде для локальных оборотных циклов малотоннажных производств различных отраслей промышленности.

Насадочные блоки испарительного охлаждения тепломассообменных аппаратов отличаются широким разнообразием, также активно продолжается работа по разработке новых и модернизации действующих оросителей гради-рен. При этом насадочные контактные блоки должны соответствовать акцентированным требованиям аппаратов испарительного охлаждения:

- обеспечение требуемой глубины охлаждения промышленной оборотной воды при оптимальных или умеренных энергетических затратах;
- высокие показатели по удерживающей способности насадочных блоков по охлаждаемой оборотной воде и ее времени пребывания в контактных блоках тепломассообменных аппаратов;
- развитие и активное обновление поверхностей контакта фаз (оборотной воды и атмосферного воздуха) при организации противоточного или поперечноточного режимов течения в насадочных блоках;
- развитые фильтрационные режимы течения потока воздуха в контактных блоках, обеспечивающего активную турбулизацию и омывание поверхностей капель и пленок охлаждаемой воды;
- минимальные показатели уноса и потерь охлаждаемой воды из системы оборотного водоснабжения, в ходе реализации процесса испарительного охлаждения;
- достаточная механическая прочность и коррозионная стойкость;
- сохранность поверхностей (поверхностных свойств) контактных блоков в ходе промышленной эксплуатации (для поддержания требуемых режимов течения);
- простота и относительно низкая стоимость;
- доступность компоновки насадочных материалов в унифицированные блоки для последующей установки блоков в корпуса аппаратов испарительного охлаждения;
- прочие сопутствующие требования.

Наряду с общепринятыми параметрами и показателями эффективности при выборе тех или иных насадочных устройств авторами активно развивается направление классификации насадочных блоков аппаратов испарительного охлаждения по анализу фильтрационных кривых течений потока газовой фазы (воздуха) и оценки интенсивности развития турбулизации в каналах насадочного блока, образованных контактными элементами [35—38]. Для этого предлагается использовать модифицированную критериальную зависимость коэффициента гидравлического сопротивления λ от модифицированного критерия Рейнольдса Re_m ($\lambda = f(Re_m)$) [35—38]. Графический пример критериальной зависимости $\lambda = f(Re_m)$ представлен на рис. 1. Данная методика основывается на экспериментальном определении и обработке данных в области фильтрационных кривых течения потока газовой фазы через слои насадочных материалов (сухие и орошаемые теплообменные блоки). Ключевой особенностью является то, что все насадочные блоки, полученные в ходе обработки данных (фильтрационных кривых), любых насадочных материалов и произвольных конструктивных исполнений (скомпонованных в насадочные блоки) займут свой режимный диапазон на одной кривой функции (см. рис. 1) согласно определенным локальным диапазонам классифицирующей зависимости $\lambda = f(Re_m)$. Это дает возможность распознать насадочные блоки с определенной организацией структуры фильтрационных течений, соответствующей высоким показателям интенсивности тепло- и массообменных процессов в насадочных блоках аппаратов испарительного охлаждения (в сравнении с насадочными блоками, получившими широкое промышленное применение).

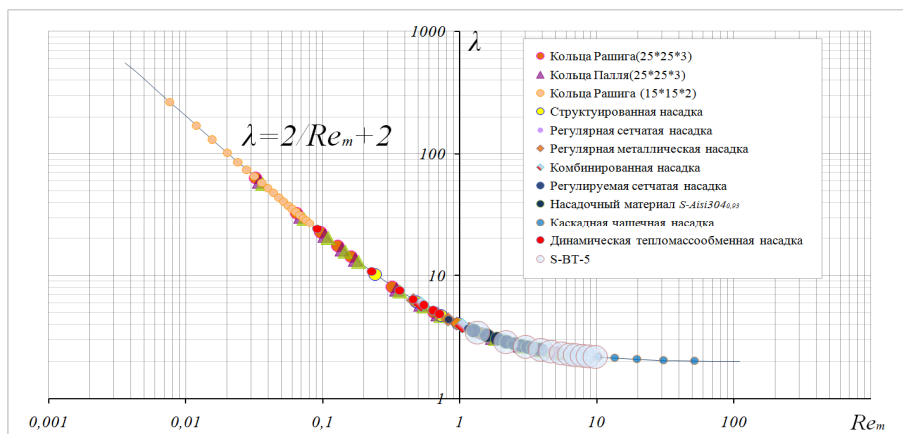


Рис. 1. Классифицирующая критериальная зависимость $\lambda = f(Re_m)$ для обработки экспериментальных данных фильтрационных течений через насадочные блоки теплообменных аппаратов [35—38]

Из анализа фильтрационных кривых течений потока газа (воздуха) через орошаемые насадочные блоки открывается возможность оценить вклад инерционных составляющих структуры фильтрационных течений, тем самым отследить степень развития турбулизации потока газозафазного теплоносителя в каналах, образованных насадочными телами в контактных блоках [39—44]. По мнению авторов, оценка вклада инерционных составляющих структуры фильтрационных течений на различных локальных участках фильтрационных кривых и соответствующих рабочим диапазонам скоростей потока воздуха в аппаратах испарительного охлаждения является актуальной и способна сыграть значимую практическую

роль при выборе, классификации и разработке новых насадочных контактных устройств аппаратов испарительного охлаждения.

Рассмотрим результаты моделирования и расчета теплообменного малогабаритного аппарата испарительного охлаждения промышленной оборотной воды с капельно-пленочным режимом течения жидкости в насадочных блоках (для локальной системы оборотного водоснабжения охлаждения компрессорного оборудования — газокomppressorной установки — металлургического предприятия. Оборудование: кожухотрубные охладители газов, межступенчатые охладители). Расчет производится по модифицированному алгоритму для капельно-пленочных режимов течения, на базе методики, приведенной в работах [45—47]. В расчет заложены показатели интенсивности протекающих тепло- и массообменных процессов, удерживающей способности насадочных блоков, среднего времени пребывания охлаждаемой воды для насадочных блоков с развитыми капельно-пленочными режимами течения (сетчатая насадка с повышенными показателями интенсивности протекающих теплообменных процессов). Пространственная схема моделируемого аппарата испарительного охлаждения оборотной воды с насадочными контактными блоками (в полимерном сетчатом исполнении), работающими в капельно-пленочном режиме течения по охлаждаемой воде и с противоточным течением теплоносителей, представлена на рис. 2. Основные технологические и геометрические параметры аппарата испарительного охлаждения приведены в табл.

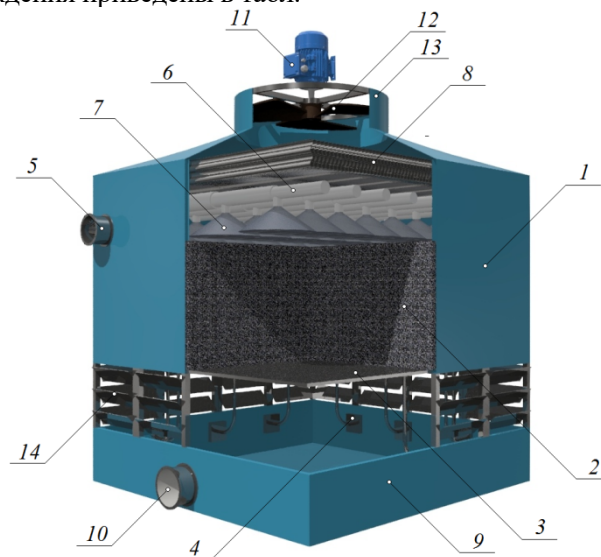


Рис. 2. Пространственная схема аппарата испарительного охлаждения промышленной оборотной воды для капельно-пленочного режима течения и противоточной схемы движения потоков охлаждаемой оборотной воды и атмосферного воздуха (для локальной системы оборотного водоснабжения охлаждения газокomppressorной установки металлургического предприятия):

1 — корпус аппарата; 2 — теплообменник насадочный блок испарительного охлаждения; 3 — опорная решетка насадочного блока; 4 — опорные кронштейны насадочного блока; 5 — входной патрубок системы орошения (водораспределения); 6 — система орошения насадочного блока; 7 — факелы распыла; 8 — каплеотбойники (каплеуловитель); 9 — водосборный коллектор; 10 — патрубок системы водоотведения в оборотный цикл; 11 — электродвигатель вентилятора; 12 — лопасти вентилятора; 13 — кожух вентилятора; 14 — воздухоподводящие окна

Исходные, справочные данные, расчетные технологические и геометрические параметры аппарата испарительного охлаждения промышленной оборотной воды с насадочными теплообменными блоками, работающими в капельно-пленочном режиме течения жидкости (малогабаритный аппарат для локальной системы оборотного водоснабжения охлаждения компрессорного оборудования (газокомпрессорной установки) металлургического предприятия (теплообменное оборудование установки: кожухотрубные охладители газов, межступенчатые охладители, расход оборотной воды 12,8 кг/с, температура 39,8 °С)

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1	2	3	4
Исходные данные			
Производительность по охлаждаемой воде	м ³ /час	q	46
Начальная температура воды	°С	$t_{\text{вн}}$	40
Конечная температура воды	°С	$t_{\text{вк}}$	28
Начальная температура воздуха	°С	$t_{\text{вн}}$	25
Конечная температура воздуха	°С	$t_{\text{вк}}$	32
Относительная влажность воздуха на входе	—	$\varphi_{\text{н}}$	0,55
Справочные данные			
Средняя теплоемкость воды	кДж/кг·К	$c_{\text{в}}$	4,18
Средняя плотность воды	кг/м ³	$\rho_{\text{в}}$	992
Удельная теплота парообразования при 0 °С	кДж/кг	$r_{\text{п}}$	2493
Теплоемкость пара	кДж/кг·К	$c_{\text{п}}$	1,97
Теплоемкость сухого воздуха	кДж/кг·К	$c_{\text{в}}$	1,01
Давление насыщенных паров при начальной температуре воздуха	атм	$p_{\text{н}}^*$	0,0316
Давление насыщенных паров при конечной температуре воздуха	атм	$p_{\text{к}}^*$	0,0475
Средний диаметр капель	м	$d_{\text{н}}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Удельная производительность по воде	кгВ/м ² ·с	$G_{\text{вн}}$	2,2
Удельная производительность по воздуху	кгВ/м ² ·с	$G_{\text{вн}}$	1,5
Коэффициенты аппроксимирующего степенного уравнения в зависимости давления насыщенных паров воды от температуры $p_{\text{в}}^* = p^*(t_{\text{в}})$	—	k	$3,5 \cdot 10^{-5}$
	—	n	2,086
Коэффициент теплопередачи	Вт/м ² ·К	$K_{\text{т}}$	370
Коэффициент массопередачи	кгВ/м ² ·с × (кгВ/кгВ)	$K_{\text{м}}$	0,106
Расчетные параметры			
Начальное влагосодержание воздуха	кгВ/кгВ	$x_{\text{н}}$	$1,064 \cdot 10^{-2}$
Начальная энтальпия воздуха	кДж/кгВ	$i_{\text{н}}$	52,8
Конечное влагосодержание воздуха	кгВ/кгВ	$x_{\text{к}}$	$3,149 \cdot 10^{-2}$
Конечная энтальпия воздуха	кДж/кгВ	$i_{\text{к}}$	110,5
Удельная производительность по воде на выходе из аппарата	кгВ/м ² ·с	$G_{\text{вк}}$	2,18
Удельное количество испаряемой воды в воздух	кгВ/м ² ·с	W	$3,962 \cdot 10^{-2}$
Относительная влажность воздуха на выходе из аппарата	—	$\varphi_{\text{к}}$	1

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1	2	3	4
Начальная удельная поверхность потока капель	$\text{м}^2/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	$F_{\text{кн}}$	5,322
Конечная удельная поверхность потока капель	$\text{м}^2/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	$F_{\text{кк}}$	5,264
Скорость воздуха (фиктивная)	м/с	$v_{\text{в}}$	1,626
Средняя скорость течения пленки жидкости по модели Нуссельта	м/с	$v_{\text{пл}}$	0,209
Диаметр аппарата	м	$D_{\text{г}}$	2,72
Ширина грани аппарата (в прямоугольном исполнении)	м	$l_{\text{гр}}$	2,4
Площадь поперечного сечения аппарата	м^2	$S_{\text{гр}}$	5,8
Средняя теплоемкость влажного воздуха	кДж/кг·К	$c_{\text{вс}}$	1,051
Средняя движущая сила процесса теплопередачи	°С	$\Delta t_{\text{с}}$	5,097
Коэффициенты рабочей линии $i=i(x)$ линейной зависимости энтальпии от влагосодержания в виде $i=a+bx$	кДж/кгW кДж/кгB	a b	21,419 2902
Число единиц переноса по влагосодержанию паров в воздухе	—	ЧЕП _x	1,492
Средняя движущая сила массообменного процесса испарения воды в воздух	кгW/кгB	$\Delta x_{\text{с}}$	$1,397 \cdot 10^{-2}$
Расчетная поверхность из условия теплопередачи	м^2	F_t	1274,7
Расчетная поверхность из условия массопередачи	м^2	F_m	155,36
Необходимая расчетная поверхность, обеспечивающая процессы тепло- и массопередачи	м^2	$F_{\text{гр}}$	1274,7
Объемный коэффициент массопередачи (теор.) по формуле Ваганова (Тимонина)	—	be_v	7,19
Объемный коэффициент массопередачи	кг/м ³ ·с	b_v	1,262
Высота насадочного блока аппарата испарительного охлаждения	м	$H_{\text{гр}}$	2,07
Объем насадочного блока аппарата испарительного охлаждения	м ³	$V_{\text{н}}$	11,6

Заключение

Расчет тепломассообменного аппарата осуществлялся для сетчатого насадочного блока, реализующего развитый капельно-пленочный режим течения жидкости, при повышенных показателях интенсивности тепло- и массообменного процесса испарительного охлаждения $K_t = 370 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, $K_m = 0,106 \text{ кгW/м}^2 \cdot \text{с} \times (\text{кгW/кгB})$, а также характерных для подавляющего большинства действующих в различных отраслях промышленности (химическая, нефтегазоперерабатывающая, нефтехимическая, строительная, металлургическая и энергетическая) аппаратов испарительного охлаждения показателях плотностей орошения — $8 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$, т. е. $2,2 \text{ кгW/м}^2 \cdot \text{с}$. При этом плотность орошения может быть увеличена до $15 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ($4 \text{ кгW/м}^2 \cdot \text{с}$), что должно сопровождаться увеличением высоты насадочных блоков, работающих при

повышенных удельных нагрузках по охлаждаемой оборотной воде. По результатам расчета рабочего объема теплообменного аппарата испарительного охлаждения промышленной оборотной воды площадь орошения составила $5,8 \text{ м}^2$, ширина грани аппарата в прямоугольном модульном исполнении составила 2,4 м, в круглом исполнении диаметр аппарата составил 2,72 м. При этом высота насадочного блока, работающего в капельно-пленочном режиме течения охлаждаемой воды, составила 2 м и объем насадочного блока $11,6 \text{ м}^3$.

При повышенных удельных нагрузках насадочных блоков по охлаждаемой воде необходимо учесть падение интенсивности охлаждения промышленной оборотной воды, что в свою очередь требуется компенсировать увеличением высоты насадочных блоков, для капельно-пленочных насадочных блоков различных модификаций она может быть увеличена с 2 до 4 м (по результатам моделирования и расчета).

Рассмотрим сопутствующие рекомендации к выбору конструкции аппарата и насадочного блока испарительного охлаждения промышленной оборотной воды:

- удельная поверхность насадочного блока ε (а) должна быть выше $120 \text{ м}^2/\text{м}^3$;

- предпочтительно использовать сетчатые, гофрированные и другие модификации насадочных блоков, реализующие развитый капельно-пленочный режим течения жидкости, при этом желательны нанесение искусственной шероховатости (и других поверхностных интенсифицирующих эффектов: перфорированные пленочные поверхности, рифленые поверхности со специальными поверхностными элементами для образования капель), организация волн различной формы и направленности, что способно повысить интенсивность тепло- и массообменных процессов и охлаждающую способность насадочного блока выше 20 % (по сравнению с типовыми);

- рекомендуется организация разрыва насадочного блока по высоте (продольное секционирование рабочего объема насадочного блока), что способно повысить интенсивность тепло- и массообменных процессов и охлаждающую способность насадочного блока до 30 %, а также снизить гидравлическое сопротивление и расход насадочного материала;

- рекомендуется конструктивное исполнение аппаратов испарительного охлаждения промышленной оборотной воды состоящих из ряда унифицированных секций или модулей (одна секция (модуль) — см. рис. 2);

- в ряде случаев целесообразно использование поперечноточных аппаратов испарительного охлаждения промышленной оборотной воды со специальными контактными насадочными блоками, обладающими поперечной проницаемостью, которые обладают рядом преимуществ: поддержание высоких показателей движущей силы процесса тепло- и массопередачи по высоте насадочного блока за счет поперечного воздухообмена, предотвращение обледенения воздухоходных окон в зимние периоды (для регионов с преобладающим холодным климатом), лучшая доступность для осмотра, чистки и обслуживания насадочных блоков и др.

Следует отметить актуальность совершенствования и разработки новых конструкций насадочных контактных устройств, реализующих капельно-

пленочный режим течения жидкости, что в совокупности с передовыми средствами математического моделирования протекающих в них гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов, способно обеспечить наивысшие показатели компактности рабочих объемов насадочных блоков при повышенных удельных плотностях орошения и оказать существенный энерго- и ресурсосберегающий эффект.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лаптев А. Г., Вадьгаева И. А.* Устройство и расчет промышленных градирен: монография. Казань : КГЭУ, 2004. 358 с.
2. *Пономареико В. С., Арефьев Ю. И.* Градирни промышленных и энергетических предприятий: справочное пособие. М. : Энергоатомиздат: 1998. 376 с.
3. *Новикова О. К., Ратникова А. М.* Водоснабжение промышленных предприятий : учеб. пособие. Гомель : БелГУТ, 2021. 223 с.
4. *Каган А. М., Лаптев А. Г., Пушинов А. С., Фарахов М. И.* Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов. Казань : Отечество. 2013. 454 с.
5. *Мадышев И. Н., Харьков В. В., Николаев А. Н.* Интенсификация тепломассообменных процессов в испарительных градирнях: монография. Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2022. 92 с.
6. *Лаптев А. Г., Лаптева Е. А.* Метод определения эффективности тепломассообмена в пленочной градирне с интенсифицированными блоками оросителей // Теплофизика и аэромеханика. 2024. Т. 31. № 3. С. 503—513.
7. *Лаптева Е. А., Лаптев А. Г.* Математическая модель и экспериментальные данные охлаждения воды в противоточных пленочных градирнях // Теоретические основы химической технологии. 2023. Т. 57. № 4. С. 399—407.
8. *Лаптева Е. А., Столярова Е. Ю., Лаптев А. Г.* Численное определение эффективности тепломассообмена в пленочной градирне с учетом неравномерности распределения воды и воздуха // Теплоэнергетика. 2020. № 4. С. 52—59.
9. *Laptev A. G., Lapteva E. A.* Determination of the thermal efficiency and height of the blocks of countercurrent cooling tower sprinklers // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2020. Vol. 93. Iss. 3. Pp. 693—699.
10. *Дмитриев А. В., Круглов Л. В., Мадышев И. Н., Дмитриева О. С.* Охлаждение оборотной воды предприятий энергетики в градирнях со струйно-пленочными контактными устройствами // Промышленная энергетика. 2018. № 11. С. 45—49.
11. *Lapteva E. A., Laptev A. G.* Mathematical model and experimental data for water cooling in counterflow film cooling towers // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2023. Vol. 57. Iss. 4. Pp. 469—477.
12. *Лаптева Е. А., Столярова Е. Ю.* Снижение энергозатрат на охлаждение воды с применением мини градирен // Труды Академэнерго. 2020. № 2(59). С. 23—30.
13. *Lapteva E. A., Stolyarova E. Y., Laptev A. G.* Thermohydraulic efficiency of the process of cooling of water in miniature cooling towers with regular packing // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Vol. 54. Iss. 3-4. Pp. 161—164.
14. *Laptev A. G., Lapteva E. A.* A Modified method of the number of transfer units for calculating a cooling tower // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Vol. 54. Iss. 7-8. Pp. 569—575.
15. *Дмитриев А. В., Дмитриева О. С., Мадышев И. Н.* Определение коэффициента массоотдачи в жидкой фазе в струйно-барботажном контактном устройстве // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 76—80.
16. *Madyshev I. N., Khar'kov V. V.* Determination of heat and mass emission coefficients in a hybrid cooling tower with transversely finned radiator pipes // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2024. Vol. 97. Iss. 4. Pp. 1050—1057.
17. *Madyshev I. N., Khar'kov V. V.* Correction to: determination of heat and mass emission coefficients in a hybrid cooling tower with transversely finned radiator pipes // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2024. Vol. 97. Iss. 5. Pp. 1421.
18. *Мадышев И. Н., Харьков В. В.* Определение коэффициентов тепло- и массоотдачи в гибридной градирне с поперечным оребрением труб радиатора // Инженерно-физический журнал. 2024. Т. 97. № 4. С. 1061—1068.

19. *Madyshev I. N., Dmitrieva O. S., Dmitriev A. V., Nikolaev A. N.* Study of fluid dynamics of mass-transfer apparatuses having stream-bubble contact devices // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016. Vol. 52. Iss. 5-6. Pp. 299—304.
20. *Лантев А. Г., Фарахов М. И., Лантева Е. А.* Сравнительные гидравлические и тепло-массообменные характеристики пленочных регулярных насадок в градирнях // *Вестник технологического университета*. 2017. Т. 20. № 18. С. 71—74.
21. *Мадышев И. Н., Дмитриева О. С.* Экспериментальное исследование тепловых характеристик сухого блока оросителя градирни // *Инженерно-физический журнал*. 2025. Т. 98. № 1. С. 91—100.
22. *Madyshev I. N., Khar'kov V. V., Zinurov V. É.* Thermal resistance of a tubular radiator of the hybrid system for cooling circulating water // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2023. Vol. 96. Iss. 3. Pp. 627—635.
23. *Madyshev I. N., Khar'kov V. V.* Thermal study of hybrid-type cooling tower with finned tube radiator // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2024. Vol. 56. P. 103023.
24. *Дмитриев А. В., Дмитриева О. С., Мадышев И. Н.* Определение объемного коэффициента массоотдачи в градирнях со струйно-пленочными контактными устройствами // *Инженерно-физический журнал*. 2021. Т. 94. № 1. С. 121—126.
25. Experimental investigation of fill pack impact on thermal-hydraulic performance of evaporative cooling tower / *A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov, I. N. Madyshev, V. V. Kharkov, O. S. Dmitrieva* // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021. Vol. 22. P. 100835.
26. *Dmitriev A. V., Dmitrieva O. S., Madyshev I. N.* Determination of the Volumetric Coefficient of Mass Transfer in Cooling Towers with Jet-Film Contact Devices // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021. Vol. 94. Iss. 1. Pp. 113—117.
27. Experimental study on heat power of wet and pipe sections of wet/dry cooling tower with extended surface pipe exchanger / *I. N. Madyshev, V. V. Kharkov, A. O. Mayasova, V. E. Zinurov, R. R. Khabibullin* // *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2697. Iss. 1. P. 012081.
28. *Dmitriev A. V., Madyshev I. N., Khafizova A. I., Nikolaev A. N.* Hydrodynamics in counter-flow cooling tower with corrugated inclined contact elements // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1745. P. 012078.
29. *Дмитриев А. В., Мадышев И. Н., Круглов Л. В., Чичирова Н. Д.* Оценка эффективности процессов тепло- и массообмена в трехпоточной испарительной градирне с наклонно-гофрированными контактными элементами // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2020. Т. 12. № 4(48). С. 126—135.
30. *Dmitrieva O. S., Dmitriev A. V., Madyshev I. N., Nikolaev A. N.* Flow dynamics of mass exchangers with jet-bubbling contact devices // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53. Iss. 1-2. Pp. 130—134.
31. *Дмитриев А. В., Мадышев И. Н., Дмитриева О. С.* Экспериментальное исследование гидравлических и тепломассообменных показателей наклонно-гофрированных контактных элементов оросителя градирни // *Экология и промышленность России*. 2020. Т. 24. № 1. С. 4—8.
32. *Дмитриев А. В., Мадышев И. Н., Дмитриева О. С.* Определение эффективности охлаждения оборотной воды в струйно-барботажных контактных элементах // *Экология и промышленность России*. 2016. Т. 20. № 6. С. 4—7.
33. *Дмитриев А. В., Мадышев И. Н., Дмитриева О. С., Николаев А. Н.* Исследования диспергирования жидкости и газа в контактных устройствах с увеличенным диапазоном устойчивой работы // *Экология и промышленность России*. 2017. Т. 21. № 3. С. 12—15.
34. *Дмитриев А. В., Дмитриева О. С., Николаев А. Н.* Особенности охлаждения оборотной воды в вихревых камерах в зимний период // *Экология и промышленность России*. 2012. № 9. С. 12—13.
35. *Golovanchikov A. B., Balashov V. A., Merentsov N. A.* The filtration equation for packing material // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53. Iss. 1-2. Pp. 10—13.
36. *Меренцов Н. А., Голованчиков А. Б., Персидский А. В., Топилин М. В.* Моделирование процессов управления в нефтегазоперерабатывающем массообменном оборудовании: монография. Волгоград : Изд-во ВолГТУ, 2021. 212 с.
37. *Меренцов Н. А., Голованчиков А. Б., Персидский А. В., Лебедев В. Н.* Моделирование процессов управления в экологическом массообменном оборудовании: монография. Волгоград : Изд-во ВолГТУ, 2020. 188 с.

38. *Merentsov N. A., Golovanchikov A. B., Lebedev V. N., Persidskiy A. V.* Promising packing material for recycled water evaporative cooling contact devices // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. Vol. 57. Iss. 5-6. Pp. 416—422.

39. Структура фильтрационной кривой и способы ее аппроксимации. Часть 2. Верхний предел применения закона Дарси / Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков, М. В. Топилин, А. В. Персидский // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2021. Т. 27. № 2. С. 245—254.

40. Структура фильтрационной кривой и способы ее аппроксимации. Часть 3. Уравнения для аппроксимации фильтрационной кривой / Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков, М. В. Топилин, А. В. Персидский // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2021. Т. 27. № 3. С. 401—414.

41. Оценка интенсивности развития турбулизации в теплообменных насадочных контактных устройствах для селективной очистки газовых выбросов и испарительного охлаждения промышленной оборотной воды / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов, В. Н. Лебедев, А. В. Персидский // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2020. Вып. 2(79). С. 245—254.

42. Энерго- и ресурсосберегающие насадочные контактные устройства для аппаратов испарительного охлаждения промышленной оборотной воды / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. Н. Лебедев, Д. А. Тезиков, В. В. Грошев, В. А. Ускова // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2023. Вып. 2(91). С. 168—179.

43. Перспективы использования промышленных отходов машиностроительных предприятий для решения экологических проблем строительной отрасли / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, В. Н. Лебедев, А. Г. Карасев, А. Б. Голованчиков // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2019. Вып. 4(77). С. 182—195.

44. Автоматическое управление режимами работы аппаратов испарительного охлаждения промышленной оборотной воды / Н. А. Меренцов, В. Н. Лебедев, А. В. Персидский, А. С. Шилихин, А. Б. Голованчиков // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2019. № 4(77). С. 124—135.

45. *Меренцов Н. А., Голованчиков А. Б., Балашов В. А.* Моделирование теплообменных насадочных устройств с развитым капельным режимом течения: монография. Волгоград : Изд-во ВолГТУ, 2019. 140 с.

46. *Голованчиков А. Б., Меренцов Н. А., Балашов В. А.* Расчет вентиляторной градирни с капельным орошением // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2012. Вып. 28(47). С. 171—178.

47. *Golovanchikov A. B., Merentsov N. A., Balashov V. A.* Modeling and analysis of a mechanical-draft cooling tower with wire packing and drip irrigation // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 48. Iss. 9-10. Pp. 595—601.

© Меренцов Н. А., Голованчиков А. Б., Салыкин Е. А., Лебедев В. Н., Грошев В. В.,
Абдулов Д. Э., Волков М. Ю., 2025

Поступила в редакцию
30.07.2025

Ссылка для цитирования:

Моделирование и расчет аппарата испарительного охлаждения промышленной оборотной воды с капельно-плёночным режимом течения жидкости в насадочных блоках / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, Е. А. Салыкин, В. Н. Лебедев, В. В. Грошев, Д. Э. Абдулов, М. Ю. Волков // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2025. Вып. 3(100). С. 75—86. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_75.

Об авторах:

Меренцов Николай Анатольевич — канд. техн. наук, доц., доц. каф. процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Российская Федерация, 400001, Волгоград, пр-т Ленина, 28; steeple@mail.ru

Голованчиков Александр Борисович — д-р техн. наук, проф., проф. каф. процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Российская Федерация, 400001, Волгоград, пр-т Ленина, 28

Салыкин Евгений Александрович — канд. техн. наук, доц., зав. каф. теплотехники и гидравлики, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Российская Федерация, 400001, Волгоград, пр-т Ленина, 28; atd304@vstu.ru

Лебедев Виталий Николаевич — ведущий инженер, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг». Российская Федерация, 400078, г. Волгоград, пр-т Ленина, 96; lvnwork@mail.ru

Грошев Вячеслав Викторович — ст. препод. каф. физического воспитания, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Российская Федерация, 400001, Волгоград, пр-т Ленина, 28

Абдулов Даниял Эльмарович — магистрант каф. процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Российская Федерация, 400001, Волгоград, пр-т Ленина, 28

Волков Михаил Юрьевич — магистрант каф. процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Российская Федерация, 400001, Волгоград, пр-т Ленина, 28

Nikolay A. Merentsov^a, Aleksandr B. Golovanchikov^a, Evgeniy A. Salykin^a, Vitaliy N. Lebedev^b, Vyacheslav V. Groshev^a, Daniyal E. Abdulov^a, Mikhail Yu. Volkov^a

^a *Volgograd State Technical University*

^b *LUKOIL-Engineering*

MODELING AND CALCULATION OF INDUSTRIAL COOLING WATER EVAPORATIVE COOLING TOWER WITH DROP-FILM FLOW MODE

The study was funded by the Russian Science Foundation grant No. 25-29-00496, <https://rscf.ru/project/25-29-00496/>, "Simulation of Heat and Mass Transfer Processes in Environmental and Oil and Gas Processing Equipment, Taking into Account the Structure of Flows"

The paper presents the results of modeling and calculation of a heat and mass exchange apparatus for evaporative cooling of industrial recirculated water with a drop-film flow mode for the local recirculated water supply system for cooling compressor equipment (gas compressor unit) of a metallurgical enterprise. A promising methodology for classifying packing materials for evaporative cooling devices based on the analysis of filtration curves of air flow through layers of contact devices is shown. Basic recommendations are given for the choice of types of heat-mass-exchange packing for evaporative cooling devices and for the design of industrial heat-mass-exchange devices taking into account their operating modes.

Key words: evaporative cooling, cooling water, cooling towers, water supply systems, energy and resource saving, hydrodynamics, gas dynamics, heat and mass exchange, drip mode, film mode, drip-film mode, packing material, contact unit.

For citation:

Merentsov N. A., Golovanchikov A. B., Salykin E. A., Lebedev V. N., Groshev V. V., Abdulov D. E., Volkov M. Yu. [Modeling and calculation of industrial cooling water evaporative cooling tower with drop-film flow mode]. *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], 2025, iss. 3, pp. 75—86. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_75.

About authors:

Nikolay A. Merentsov — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 28, Lenina ave., Volgograd, 400001, Russian Federation; steeple@mail.ru

Aleksandr B. Golovanchikov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 28, Lenina ave., Volgograd, 400001, Russian Federation

Evgeniy A. Salykin — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 28, Lenina ave., Volgograd, 400001, Russian Federation; atd304@vstu.ru

Vitaliy N. Lebedev — Lead Engineer, LUKOIL-Engineering, 96, Lenina ave., Volgograd, 400078, Russian Federation; lvnwork@mail.ru

Vyacheslav V. Groshev — Senior Lecturer, Volgograd State Technical University (VSTU). 28, Lenina ave., Volgograd, 400001, Russian Federation

Daniyal E. Abdulov — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 28, Lenina ave., Volgograd, 400001, Russian Federation

Mikhail Yu. Volkov — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 28, Lenina ave., Volgograd, 400001, Russian Federation