

УДК 691-462; 691.714.018.8; 691-404

**И. П. Попов**

*Курганский государственный университет*

## ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ БАЛКИ

Целью работы является повышение нагрузочной способности балок. Гидравлическая балка представляет собой заглушенную с обоих концов трубу, заполненную жидкостью. При нагружении балки ее боковая поверхность стремится деформироваться, внутренний объем стремится к уменьшению. Но так как жидкость несжимаема, она не допускает уменьшения объема, что препятствует деформации трубы. Вся нагрузка благодаря жидкости равномерно распределяется по всей внутренней поверхности балки.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** трубчатая балка, двутавровая балка, гидравлическая балка, жидкий наполнитель, полость.

### Введение

Наибольшей нагрузочной способностью обладают двутавровые балки [1—5]. Вместе с тем из-за широкого распространения и доступности трубопроката в практике нередко используют трубчатые балки.

Сравнение этих балок по нагрузочной способности следует проводить при условии их равной массы. Для этой цели хорошо подойдет двутавр по ГОСТ Р 57837—2017, масса 1 пог. м которого составляет 194 кг, и труба по ГОСТ 33228—2015, масса 1 пог. м которой также составляет 194 кг.

Осевой момент сопротивления указанного двутавра равен (см<sup>3</sup>):

$${}^{I-b}W_x = 5625.$$

Осевой момент сопротивления указанной трубы (см<sup>3</sup>):

$${}^P W_x = 2950.$$

При этом

$$\frac{{}^{I-b}W_x}{{}^P W_x} = \frac{5625}{2950} \approx 1,9.$$

Таким образом, нагрузочная способность двутавровой балки почти вдвое выше, чем трубчатой.

В настоящее время появились патенты [6—8] и журнальные публикации [9—22] о трубобетонных балках, в частности, с преднапряженной нижней частью бетонного ядра. Стальная труба в таких балках играет роль экзoарматуры. Нагрузочная способность трубобетонных балок весьма значительна при их невысокой себестоимости и хорошей технологичности.

*Целью* настоящей работы является повышение нагрузочной способности трубчатых балок, не имея в виду составления конкуренции двутавровым и трубобетонным балкам, а исключительно для расширения ассортимента строительных конструкций и повышения их эксплуатационных свойств.

### Материалы и методы

Используется методика геометрической оптимизации и мысленного эксперимента.

Идея использовать жидкий наполнитель для трубчатой балки опирается на известное свойство жидкости — ее практическую несжимаемость.

Геометрическое длинномерное тело, боковая поверхность которого имеет прямолинейную образующую, обладает максимальным объемом (при заданной боковой поверхности), если его поперечное сечение имеет форму круга. Этому условию соответствует круглая труба.

Трубчатая балка с жидким наполнителем (далее — гидравлическая балка) представляет собой заглушенную с обоих концов круглую трубу, полностью (без воздушных полостей) заполненную жидкостью [23].

При нагружении гидравлической балки ее боковая поверхность стремится деформироваться. Следовательно, внутренний объем трубы стремится к уменьшению. Но поскольку жидкость несжимаема, она не допускает уменьшения объема, что, в свою очередь, препятствует деформации трубы.

Рассмотрим гидравлическую балку, например, прямоугольного сечения. При нагружении и соответствующем повышении давления жидкость стремится деформировать стенки, вследствие чего прямоугольный профиль стремится трансформироваться в круглый, а площадь профиля — к увеличению. Это может привести к недопустимому прогибу балки.

Другими словами, в гидравлической балке прямоугольного сечения уменьшение внутреннего объема, вызванного прогибом, компенсируется увеличением объема, вызванного трансформацией профиля (суммарный объем несжимаемой жидкости остается неизменным). И чем больше прямоугольный профиль трансформируется в круглый, тем больше будет прогиб.

У круглой трубы нет «резерва» и возможности для трансформации профиля и увеличения площади поперечного сечения, следовательно, нет и подобного «резерва» увеличения внутреннего объема. То есть, исключена возможность уменьшения внутреннего объема, вызванного прогибом, поскольку суммарный объем жидкости измениться не может. В идеализированном варианте прогиб круглой гидравлической балки исключается.

Наглядной демонстрацией идеи гидравлической балки может служить простой пример из бытовой практики. Если пустой расправленный матерчатый мешок (аналог балки) положить на два стула (аналог опор), то он под действием собственного веса прогнется и провалится между стульями.

Если этот же мешок плотно заполнить, например, керамзитом и завязать его, то он не только не провалится между стульями, но может выдержать дополнительную существенную нагрузку.

### Результаты

Пусть при сверхпределном нагружении круглой трубчатой балки (не гидравлической), приводящем к выходу ее из строя, пластической деформации подвергается часть поверхности трубы, равная  $s$ . Вся площадь поверхности трубы равна  $S$ . Сила нагружения равна  $F^*$ .

В самом первом приближении, достаточном для предварительной оценки, предельное напряжение в деформированных участках поверхности трубы равно:

$$\sigma^* = \frac{F^*}{s}.$$

В гидравлической балке вся нагрузка благодаря жидкости относительно равномерно распределяется по всей внутренней поверхности в соответствии

с законом Паскаля — давление, производимое на жидкость или газ, передается в любую точку без изменений во всех направлениях. При этом давление на внутреннюю поверхность трубы, не беря во внимание площадь концевых заглушек ввиду грубости приближений, равно:

$$p = \frac{F^*}{S}.$$

Из этого очевидным образом следует, что:

$$q = \frac{\sigma^*}{p} = \frac{S}{s}.$$

Другими словами, в первом приближении нагрузочная способность гидравлической балки выше, чем у трубчатой в  $q$  раз.

По некоторым экспертным оценкам при разрушении трубчатой балки пластической деформации подвергается порядка 10 % поверхности трубы. Или  $q \in 10$ .

Пусть  $q \approx 10$ . Это означает, что нагрузочная способность гидравлической балки примерно в 10 раз выше, чем у трубчатой. И примерно в пять раз выше, чем у двутаровой.

#### **Обсуждение**

В случае плоских концевых заглушек места их сварки с трубой являются сильными концентраторами напряжений. В связи с этим и из соображений геометрической оптимизации наилучшей формой концевых заглушек является полусфера.

Полости соседних гидравлических балок в силовой конструкции, например в пролетном строении моста, могут быть выполнены сообщающимися (посредством усиленных патрубков). Это позволит равномерно перераспределять нагрузку, приложенную к части балок, между всеми гидравлическими балками несущей конструкции.

Действительно, суммарная рабочая площадь всех гидравлических сообщающихся балок увеличивается кратно количеству балок, давление в балках становится равным:

$$p = \frac{F}{nS}, \tag{1}$$

где  $n$  — количество сообщающихся гидравлических балок. Соответственно, в  $n$  раз увеличивается нагрузочная способность.

В качестве жидкого наполнителя гидравлических балок во многих случаях следует использовать незамерзающие жидкости. В целях экономии незамерзающей жидкости внутренние полости гидравлических балок могут частично заполняться твердым дисперсным материалом, например, керамическим ломом, щебнем и т. п.

#### **Заключение**

Привлекательность железобетонных балочных конструкций состоит в замещении металла [24—29]. В этом же состоит привлекательность и рассмотренной гидравлической балки.

Приведенные выше расчеты нагрузочной способности являются грубым приближением. В случае практического использования гидравлических балок

потребуется более обстоятельные инженерные исследования, включая учет площади поверхности концевых заглушек, различий между давлением и напряжением (например, смятия), упругой деформации стенок, собственного веса жидкости и других факторов.

При этом полученная выше оценка пятикратного превышения нагрузочной способности гидравлической балки по сравнению с двутавровой и десятикратного — по сравнению с трубчатой, может быть скорректирована как в меньшую, так и в большую сторону.

При использовании сообщающихся гидравлических балок можно добиться несопоставимого повышения нагрузочной способности пролетных конструкций [30—33], в соответствии с формулой (1).

Преимущество гидравлической балки над другими типами балок состоит в том, что у такой балки работает в одинаковой мере весь материал, из которого она изготовлена.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сукач А. А. Местная потеря устойчивости сжатых поясов прокатных двутавровых балок // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 37(56). С. 162—169.
2. Складнев А. И., Попова Г. Н. Оптимальное сечение симметричного двутавра при развитии пластических деформаций и совместном действии продольной силы и изгибающего момента // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 34(53). С. 57—61.
3. Saiyan S., Paushkin A. Numerical study of the shear stress distribution in an I-beam in the load application zone // Materials Science Forum. 2019. Pp. 659—664. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.659.
4. Zheng G., Tian C., Wu J., Guo Z. Ultrasonic stress test of concrete I-beam based on singular value decomposition // Shenyang Jianzhu Gongcheng Xueyuan Xuebao. Ziran Kexue Ban. 2020. Vol. 36. Iss. 2. Pp. 212—219. DOI: 10.11717/j.issn:2095-1922.2020.02.03
5. De'nan F., Hashim N. S. Stress analysis of I-beam with web opening via finite element analysis and experimental study // World Journal of Engineering. 2023. Vol. 20. Iss. 5. Pp. 974—988.
6. Патент 2675273 RU, МПК<sup>6</sup> E 04 C 3/293, E 01 D 19/00. Трубобетонная балка / Д. Н. Парышев, В. И. Копырин, О. Ю. Моисеев, И. Г. Овчинников, В. В. Харин, И. И. Овчинников, А. В. Харин, И. П. Попов, В. А. Воронкин // Россия. № 2017145446; заявл. 22.12.2017; опубл. 18.12.2018.
7. Патент 2702444 RU, МПК<sup>6</sup> E 01 D 2/00. Пролетное трубобетонное строение моста / Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, В. И. Копырин, О. Ю. Моисеев, А. А. Мосин, И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников, В. В. Харин, И. П. Попов, А. В. Харин, В. А. Воронкин // Россия. № 2019103410; заявл. 06.02.2019; опубл. 08.10.2019.
8. Патент 2739271 RU, МПК<sup>6</sup> B04C 3/293. Битрубобетонная балка / Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, В. И. Копырин, О. Ю. Моисеев, Ю. А. Агафонов, И. Г. Овчинников, В. М. Шеренков, И. И. Овчинников, В. В. Харин, Д. А. Харин, В. А. Воронкин, И. П. Попов // Россия. № 2019130450; заявл. 25.09.2019; опубл. 22.12.2020.
9. Применение трубобетона в транспортном строительстве / Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, И. Г. Овчинников, И. И. Овчинников, О. Ю. Моисеев, В. И. Копырин, В. В. Харин, И. П. Попов, В. А. Воронкин // Дорожная держава. 2019. № 90. С. 74—80.
10. Малые мосты на трубобетонных элементах — технологический прорыв в нацпроекте «Безопасные и качественные автомобильные дороги». Ч. 1 / Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, И. Г. Овчинников, И. И. Овчинников, О. Ю. Моисеев, В. И. Копырин, В. В. Харин, И. П. Попов, В. А. Воронкин // Дорожная держава. 2019. № 91. С. 34—39.
11. Малые мосты на трубобетонных элементах — технологический прорыв в нацпроекте «Безопасные и качественные автомобильные дороги». Ч. 2 / Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, И. Г. Овчинников, И. И. Овчинников, О. Ю. Моисеев, В. И. Копырин, В. В. Харин, И. П. Попов, В. А. Воронкин // Дорожная держава. 2019. № 92. С. 54—60.

12. Упорядочение положения фибры в ядре трубобетонной балки / Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, О. Ю. Моисеев, В. В. Харин, И. П. Попов, Д. А. Харин // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. 2019. № 2(12). С. 56—65.
13. Трубобетонная балка с содержанием фибры в бетонном ядре / Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, О. Ю. Моисеев, В. В. Харин, И. П. Попов, Д. А. Харин // Естественные и технические науки. 2019. № 8. С. 189—195.
14. Трубобетонная балка с верхним бетонным ядром / И. П. Попов, Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, О. Ю. Моисеев, В. В. Харин, Д. А. Харин // Дорожная наука — дорожной отрасли: мат-лы региональной науч.-практ. конф., посвященной Дню работника дорожного хозяйства. 2020. С. 136—138.
15. Ортотропная трубобетонная конструкция / Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, О. Ю. Моисеев, В. В. Харин, И. П. Попов, Д. А. Харин // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: мат-лы национальной с международным участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, ученых и специалистов, посвященной 20-летию создания кафедры электроэнергетики. Т. 1. 2019. Тюмень : ТИУ, 2019. С. 298—301.
16. Облегченная трубобетонная балка / Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, О. Ю. Моисеев, В. В. Харин, И. П. Попов, Д. А. Харин // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: мат-лы национальной с международным участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, ученых и специалистов, посвященной 20-летию создания кафедры электроэнергетики. Т. 1. 2019. Тюмень : ТИУ, 2019. С. 295—298.
17. Математическая модель магнитной ориентации фибры в трубобетонной балке / И. Г. Овчинников, Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, О. Ю. Моисеев, В. В. Харин, И. П. Попов, Д. А. Харин // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: мат-лы международного науч.-практ. конф. 2019. Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2019. С. 306—311.
18. Анизотропия фибробетонного ядра трубобетонной балки / И. Г. Овчинников, Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, О. Ю. Моисеев, В. В. Харин, И. П. Попов, Д. А. Харин // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: мат-лы международного науч.-практ. конф. 2019. Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2019. С. 300—305.
19. Метод магнитной ориентации фибры в ядре трубобетонной балки / Д. Н. Парышев, В. Г. Чумаков, А. В. Ильяков, О. Ю. Моисеев, В. В. Харин, И. П. Попов, Д. А. Харин // Проблемы и перспективы развития инженерно-строительной науки и образования: сб-к статей III всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. 2019. Курган : Изд-во Курганской ГСХА, 2019. С. 37—44.
20. Ориентирование фибры в трубобетонной балке / Д. Н. Парышев, В. Г. Чумаков, А. В. Ильяков, О. Ю. Моисеев, В. В. Харин, И. П. Попов, Д. А. Харин // Проблемы и перспективы развития инженерно-строительной науки и образования: сб-к статей III всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. 2019. Курган : Изд-во Курганской ГСХА, 2019. С. 30—37.
21. Комбинированная сталебетонная балка / И. П. Попов, Д. Н. Парышев, В. Ю. Левитский, О. Ю. Моисеев, А. А. Мосин, В. В. Харин, В. А. Воронкин, С. С. Родионов, С. И. Родионова // Проблемы и перспективы развития инженерно-строительной науки и образования: мат-лы II всероссийской науч.-практ. конф. 2018. Курган : Изд-во Курганской ГСХА, 2018. С. 76—78.
22. Повышение нагрузочной способности трубобетонной балки / И. Г. Овчинников, Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, О. Ю. Моисеев, В. В. Харин, И. П. Попов, Д. А. Харин // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 4. С. 58—66. DOI:10.15593/24111678/2019.04.07.
23. Патент 2724653 RU, МПК<sup>6</sup> E 04 C 3/02, E 01 D 2/00. Гидравлическая балка / И. П. Попов, Д. Н. Парышев, А. В. Ильяков, В. И. Копырин, О. Ю. Моисеев, И. И. Овчинников, В. В. Харин, А. В. Харин, В. А. Воронкин // Россия. № 2019119481; заявл. 20.06.2019; опубл. 25.06.2020.
24. *Al-Kutti W., Chernykh T.* Isotropic damage model to simulate failure in reinforced concrete beam // Magazine of Civil Engineering. 2021. Vol. 7. Iss. 107. Pp. 107—14.
25. *Zealakshmi D., Vijaya B.* A comparative flexural performance of an over-reinforced high strength concrete beam with normal strength beam // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 68. Pp. 1536—1541.
26. *Auta S. M., Jamiu O., Alhaji B.* Effect of vertical circular openings on flexural strength of reinforced concrete beam // Magazine of Civil Engineering. 2021. Vol. 6. Iss. 106. Pp. 10601.
27. *Харланов В. Л., Харланова С. В.* Сравнение различных теорий прочности бетона в методе конечных элементов на примере изгибаемой балки // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. Вып. 4(77). С. 41—47.

28. *Маилян Д. Р., Маилян Л. Д.* Экологически безопасные и экономически эффективные железобетонные балки с переменным преднапряжением // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 44—2(63). С. 94—102.

29. *Черячукин В. В., Гучкин И. С., Панков А. В.* Проектирование усиления железобетонных стропильных балок комбинированной системой // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2010. Вып. 17(36). С. 9—13.

30. *Shao Yu., Miao Ch., Brownjohn J. M. W., Ding Y.* Vehicle-bridge interaction system for long-span suspension bridge under random traffic distribution // Structures. 2022. Vol. 44. Pp. 1070—1080.

31. *Yu P., Yu C., Ren Zh., Wang L.* Vehicle-bridge coupling vibration of long-span concrete-filled steel tubular arch bridge // International Journal of Structural Stability and Dynamics. 2024. DOI: 10.1142/s0219455425500646.

32. Application of long-span continuous bridge technology in bridge construction / L. Nan, Q. Yang, Ya. Liu, Xu. Meng, Y. Ye, Zh. Sun // Journal of Architectural Research and Development. 2023. Vol. 7. Iss. 3. Pp. 7—12.

33. Track-bridge interaction of CWR on chinese large-span bridge of high-speed railway / B. Yan, W. Kuang, R. Gan, H. Xie, J. Huang // Applied Sciences (Switzerland). 2022. Vol. 12. Iss. 18. Pp. 9100.

© Попов И. П., 2024

Поступила в редакцию  
в сентябре 2024 г.

Ссылка для цитирования:

*Попов И. П.* Гидравлическое усиление балки // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 4(97). С. 68—73. DOI: 10.35211/18154360\_2024\_4\_68.

Об авторе:

**Попов Игорь Павлович** — канд. техн. наук, доц. каф. теоретической механики, Курганский государственный университет (КГУ). Российская Федерация, 640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4; [uralakademia@kurganstalmost.ru](mailto:uralakademia@kurganstalmost.ru); ORCID: 0000-0001-8683-0387

**Igor P. Popov**

**Kurgan State University**

## HYDRAULIC STRENGTHENING OF THE BEAM

The goal of the work is to increase the load capacity of beams. The hydraulic beam is a pipe filled with liquid, plugged at both ends. When a beam is loaded, its side surface tends to deform. The internal volume tends to decrease. But, since the liquid is incompressible, it does not allow a decrease in volume, which, in turn, prevents deformation of the pipe. The entire load, thanks to the liquid, is evenly distributed over the entire inner surface of the beam.

**Key words:** tubular beam, I-beam, hydraulic beam, liquid filler, cavity.

**For citation:**

Popov I. P. [Hydraulic strengthening of the beam]. *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], 2024, iss. 4, pp. 68—73. DOI: 10.35211/18154360\_2024\_4\_68.

**About author:**

**Igor P. Popov** — Candidate of Engineering Sciences, Kurgan State University (KSU). 63/4, Sovetskaya st., Kurgan, 640020, Russian Federation; [uralakademia@kurganstalmost.ru](mailto:uralakademia@kurganstalmost.ru); ORCID: 0000-0001-8683-0387