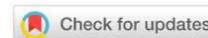


СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 691-462; 691.714.018.8; 691-404

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-9-14>

Оптимизация нагруженности элементов балки

И.П. Попов  

Курганский государственный университет, г. Курган, Российская Федерация

 uralakademia@kurganstalmost.ru



EDN: LKKTPD

Аннотация

Введение. Отмечено, что наибольшей несущей способностью обладают двутавровые балки. Вместе с тем из-за широкого распространения и доступности трубопроката в практике нередко используют трубчатые балки. Сравнение этих балок по несущей способности следует проводить при условии их равной массы на погонный метр. Сравняется двутавр по ГОСТу Р 57837–2017, масса погонного метра которого составляет 194 кг, и трубу по ГОСТу 33228–2015 с показателем 194 кг/м. Несущая способность двутавровой балки почти вдвое выше, чем трубчатой. Есть информация о трубобетонных балках, в частности с преднапряженной нижней частью бетонного ядра. Стальная труба в таких балках играет роль внешней арматуры — экзоарматуры. Несущая способность трубобетонных балок весьма значительна при их невысокой себестоимости и хорошей технологичности. Целью настоящей работы является повышение несущей способности трубчатых балок, что позволит расширить ассортимент строительных изделий.

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, что соответствует круглой трубе.

Результаты исследования. Трубчатая балка с жидким наполнителем (гидравлическая балка) представляет собой заглушенную с обоих концов круглую трубу, полностью (без воздушных полостей) заполненную жидкостью. 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.

Обсуждение и заключение. В гидравлической балке вся нагрузка благодаря жидкости относительно равномерно распределяется по всей внутренней поверхности балки. Получена оценка, состоящая в пятикратном превышении несущей способности гидравлической балки по сравнению с двутавровой балкой и в десятикратном — по сравнению с трубчатой балкой.

Ключевые слова: трубчатая балка, двутавровая балка, гидравлическая балка, жидкий наполнитель, полость

Для цитирования. Попов И.П. Оптимизация нагруженности элементов балки. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2024;3(3):9–14. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-9-14>

Optimisation of Beam Member Loading

Igor P. Popov  

Kurgan State University, Kurgan, Russian Federation

 uralakademia@kurganstalmost.ru

Abstract

Introduction. The I-beams are deemed to have the highest load-bearing capacity. However, in practice, due to wide spreading and affordability of pipe-rolling products, the tubular beams are being used quite often. The load-bearing capacity of these beams should be compared under the condition of their equal mass per running meter. An I-beam according to the GOST R 57837-2017 with the mass of running meter equal to 194 kg and a pipe according to the GOST 33228-2015 with the mass of 194 kg/m have been compared. The load-bearing capacity of an I-beam was almost twice as high as that of a tubular beam. The data about the concrete filled steel tubular (CFST) beams, including the ones with the prestressed concrete core at the bottom, is also provided. In such beams, a steel pipe works as an external reinforcement — exo-reinforcement. The load-bearing capacity of the CFST beams is quite considerable taking into account their low cost and good processability. The present research aims at increasing the load-bearing capacity of the tubular beams, which will expand the range of the construction products.

Materials and Methods. The geometric optimisation and mental experiment methods have been used. The idea of using the fluid filling material for a tubular beam is based on the well-known property of fluid — its almost complete incompressibility. The maximum volume of a geometric long body with the rectilinear generatrix of lateral surface (for a given lateral surface) is reached if its cross-section has the shape of a circle, which corresponds to a round pipe.

Results. A tubular beam with the fluid filling material (a hydraulic beam) is a round pipe blanked off at both ends, completely filled with fluid (without air pockets). When a hydraulic beam is loaded, its lateral surface tends to deform. Consequently, the internal volume of the pipe tends to decrease. However, since fluid is incompressible, its volume doesn't decrease, which, in turn, prevents the pipe from deformation.

Discussion and Conclusion. In a hydraulic beam, due to fluid, the entire load is distributed relatively evenly over the whole internal surface of a beam. The load-bearing capacity of a hydraulic beam has been estimated, which is five times higher than that of an I-beam and ten times higher than that of a tubular beam.

Keywords: tubular beam, I-beam, hydraulic beam, fluid filling material, air pocket

For Citation. Popov IP. Optimisation of Beam Member Loading. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(3):9–14. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-3-9-14>

Введение. Наибольшей несущей способностью обладают двутавровые балки [1–3]. Вместе с тем из-за широкого распространения и доступности трубопроката в практике нередко используют трубчатые балки.

Сравнение этих балок по несущей способности следует проводить при условии их равной массы. Для этой цели хорошо подойдет двутавр по ГОСТу Р 57837–2017, масса погонного метра которого составляет 194 кг, и труба по ГОСТу 33228–2015, масса погонного метра которой тоже составляет 194 кг.

Осевой момент сопротивления указанного двутавра равен:

$${}^{I-b}W_x = 5625 \text{ cm}^3.$$

Осевой момент сопротивления указанной трубы:

$${}^P W_x = 2950 \text{ cm}^3.$$

При этом

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

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

В настоящее время появились патенты [4–6] и публикации [7–9] о трубобетонных балках, в частности с преднапряженной нижней частью бетонного ядра. Стальная труба в таких балках играет роль экзоарматуры. Несущая способность трубобетонных балок весьма значительна при их невысокой себестоимости и хорошей технологичности.

Целью настоящей работы является повышение несущей способности трубчатых балок, не предполагая 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 [10].

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.

Если рассмотреть гидравлическую балку, например прямоугольного сечения, то при нагружении и соответствующем повышении давления жидкость будет стремиться деформировать стенки, вследствие чего прямоугольный профиль будет стремиться трансформироваться в круглый, а площадь профиля будет стремиться 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 будет трансформироваться в круглый, тем больше будет прогиб.

У круглой трубы нет такого «резерва» и возможности для трансформации профиля и увеличения площади поперечного сечения, следовательно нет и подобного «резерва» увеличения внутреннего объема. Таким образом, исключена и возможность уменьшения внутреннего объема, вызванного прогибом, поскольку суммарный объем жидкости изменяться 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 исследования. Пусть при сверхпредельном 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^* (сила сосредоточенная, приложена к середине балки под прямым углом к ее оси).

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 балки. Это происходит 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

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

Разумеется, напряжение и давление — это не одно и то же, но они имеют одинаковую размерность, поэтому (из их сравнения) в самом первом приближении несущая способность гидравлической балки выше, чем у трубчатой, в q раз.

Правомерность последней формулы вытекает из того, что в случае пустой трубы под действием внешней сверхпредельной нагрузки разрушается часть поверхности (площадью s), а в случае гидравлической балки — вся поверхность (S), для чего сверхпредельная нагрузка во втором случае должна быть выше как раз в соответствии с последней формулой.

По некоторым экспертным оценкам при разрушении трубчатой балки пластической деформации подвергается порядка десяти процентов поверхности трубы.

Или

$$q \in 10.$$

Пусть

$$q \approx 10.$$

Это означает, что несущая способность гидравлической балки примерно в десять раз выше, чем у трубчатой, и примерно в пять раз выше, чем у двутавровой.

В случае плоских концевых заглушек места их сварки с трубой являются сильным концентратором 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 позволяет 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, и давление в балках становится равным

$$p = \frac{F}{nS}, \quad (1)$$

где n — количество сообщающихся гидравлических балок.

Соответственно, в n раз увеличивается несущая 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.

Обсуждение и заключение. Привлекательность железобетонных балочных конструкций состоит в замещении металла [11–16]. В этом же состоит привлекательность и рассмотренной гидравлической балки.

Приведенные выше расчеты несущей способности являются грубым приближением.

В случае практического использования гидравлических балок потребуются более обстоятельные инженерные исследования, включая учет площади поверхности концевых заглушек, учет различий между давлением и напряжением (например, смятие), учет упругой деформации стенок, собственного веса жидкости и других факторов.

При этом полученная выше оценка, состоящая в пятикратном превышении несущей способности гидравлической балки по сравнению с двутавровой и в десятикратном — по сравнению с трубчатой, может быть скорректирована как в меньшую, так и в большую сторону.

При использовании сообщающихся гидравлических балок можно добиться несопоставимого повышения несущей способности пролетных конструкций [17–20] (в соответствии с (1)).

Преимущество гидравлической балки над всеми другими типами балок состоит в том, что в отличие от них у гидравлической балки «работает» (в одинаковой мере) весь материал, из которого она изготовлена.

Список литературы / References

1. Zheng G, Tian C, Wu J, Guo Z. Ultrasonic Stress Test of Concrete I-Beam Based on Singular Value Decomposition. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition)*. 2020;36(2):212–219. <https://doi.org/10.11717/j.issn:2095-1922.2020.02.03>
2. De'nan F, Hashim NS. Stress Analysis of I-Beam with Web Opening Via Finite Element Analysis and Experimental Study. *World Journal of Engineering*. 2023;20(5):974–988. <https://doi.org/10.1108/wje-11-2021-0627>
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;974:659–664. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.659>
4. Парышев Д.Н., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Овчинников И.Г., Харин В.В., Овчинников И.И. и др. *Трубобетонная балка*. Патент РФ, № 2017145446. 2018.
Paryshev DN, Kopyrin VI, Moiseyev OYu, Ovchinnikov IG, Kharin VV, Ovchinnikov II, et al. *Concrete Filled Steel Tubular Beam*. Patent of the Russian Federation, No. 2017145446. 2018. (In Russ.).
5. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Мосин А.А., Овчинников И.И. и др. *Пролетное трубобетонное строение моста*. Патент РФ, № 2019103410. 2019.
Paryshev DN, Iltjakov AV, Kopyrin VI, Moiseyev OYu, Mosin AA, Ovchinnikov II, et al. *Concrete Filled Steel Tubular Span Structure of a Bridge*. Patent of the Russian Federation, No. 2019103410. 2019. (In Russ.).
6. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Агафонов Ю.А., Овчинников И.Г. и др. *Битрубобетонная балка*. Патент РФ, № 2019130450. 2020.

Paryshev DN, Iltjakov AV, Kopyrin VI, Moiseyev OYu, Agafonov YuA., Ovchinnikov I.G. and others. *Doubled Concrete Filled Steel Tubular Beam*. Patent of the Russian Federation, No. 2019130450. 2020. (In Russ.).

7. Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Моисеев О.Ю., Копырин В.И. и др. Применение трубобетона в транспортном строительстве. *Дорожная держава*. 2019;90:74–80.

Paryshev DN, Iltjakov AV, Ovchinnikov IG, Ovchinnikov II, Moiseyev OYu, Kopyrin VI, et al. Application of Concrete Filled Steel Tubes in Road Construction. *Dorozhnaya derzhava*. 2019;90:74–80. (In Russ.).

8. Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Моисеев О.Ю., Харин В.В., Харин Д.А. Трубобетонная балка с содержанием фибры в бетонном ядре. *Естественные и технические науки*. 2019;8(134):189–195.

Paryshev DN, Iltjakov AV, Moiseyev OYu, Kharin VV, Popov IP, Kharin DA. Tube-Concrete Beam with Fiber Content in a Concrete Core. *Natural and Technical Sciences*. 2019;8(134):189–195. (In Russ.).

9. Овчинников И.Г., Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Моисеев О.Ю., Харин В.В., Харин Д.А. Повышение нагрузочной способности трубобетонной балки. *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2019;(4):58–66. <https://doi.org/10.15593/24111678/2019.04.07>

Ovchinnikov IG, Paryshev DN, Iltjakov AV, Moiseyev OYu, Kharin VV, Kharin DA. Increasing the Load Capacity of a Concrete Beam. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2019;(4):58–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/24111678/2019.04.07>

10. Попов И.П., Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Овчинников И.И. и др. *Гидравлическая балка*. Патент РФ, № 2019119481. 2020.

Popov IP, Paryshev DN, Iltjakov AV, Kopyrin VI, Moiseyev OYu, Ovchinnikov II, et al. *Hydraulic Beam*. Patent of the Russian Federation, No. 2019119481. 2020. (In Russ.)

11. Al-Kutti W, Chernykh T. Isotropic Damage Model to Simulate Failure in Reinforced Concrete Beam. *Magazine of Civil Engineering*. 2021;7(107):10714. <https://doi.org/10.34910/MCE.107.14>

12. Zealakshmi D, Vijaya B. A Comparative Flexural Performance of an Over-Reinforced High Strength Concrete Beam With Normal Strength Beam. *Materials Today: Proceedings*. 2022;68(5):1536–1541. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.179>

13. Auta SM, Jamiu O, Alhaji B. Effect of Vertical Circular Openings on Flexural Strength of Reinforced Concrete Beam. *Magazine of Civil Engineering*. 2021;106(6):10601. <https://doi.org/10.34910/MCE.106.1>

14. Развеева И.Ф., Иванченко С.А., Бондаренко И.В., Котенко М.П., Федчишена А.А. Разработка лабораторных составов бетона на основе определенной сырьевой базы и ограничений при строительстве атомной электростанции «Аккую». *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2022;1(1):24–33. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-1-24-33>

Razveeva IF, Ivanchenko SA, Bondarenko IV, Kotenko MP, Fedchishena AA. Development of Laboratory-made Compositions of Concrete Based on the Certain Raw Materials and Restrictions of the AKKUYU NPP Construction. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;1(1):24–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-1-24-33>

15. Касторных Л.И., Гикало М.А., Каклюгин А.В., Серебряная И.А. Математическое моделирование технологических процессов бетонирования монолитных конструкций из мелкозернистых смесей. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(4):84–93. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-84-93>

Kastornykh LI, Gikalo MA, Kaklyugin AV, Serebryanaya IA. Mathematical Modeling the Process of Concreting the Monolithic Structures Made of the Fine-Grained Mixes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(4):84–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-84-93>

16. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. Некоторые технологические параметры устройства рабочих швов при применении самоуплотняющихся бетонных смесей. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(3):31–39. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-3-31-39>

Nesvetaev GV, Koryanova YuI, Sukhin DP. Some Technological Parameters of Construction Joints Formation Using the Self-Compacting Concrete Mixtures. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023; 2 (3): 31–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-3-31-39>

17. Shao Yu, Miao Ch, Brownjohn JMW, Ding Y. Vehicle-Bridge Interaction System for Long-Span Suspension Bridge under Random Traffic Distribution. *Structures*. 2022;44:1070–1080. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.074>

18. 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. <https://doi.org/10.1142/s0219455425500646>

19. Nan L, Yang Q, Liu Ya, Meng Xu, Ye Y, Sun Zh. Application of Long-Span Continuous Bridge Technology in Bridge Construction. *Journal of Architectural Research and Development*. 2023;7(3):7–12. <https://doi.org/10.26689/jard.v7i3.4827>

20. Yan B, Kuang W, Gan R, Xie H, Huang J. Track-Bridge Interaction of CWR on Chinese Large-Span Bridge of High-Speed Railway. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022;12(18):9100. <https://doi.org/10.3390/app12189100>

Об авторе:

Игорь Павлович Попов, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики Курганского государственного университета (640020, Российская Федерация, г. Курган, ул. Советская, 63/4), [ORCID](#), uralakademia@kurganstalmost.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Igor P. Popov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Theoretical Mechanics Department, Kurgan State University (63/4, Sovetskaya Str., Kurgan, 640020, Russian Federation), [ORCID](#), uralakademia@kurganstalmost.ru

Conflict of Interest Statement: the author declares no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 04.08.2024

Поступила после рецензирования / Reviewed 23.08.2024

Принята к публикации / Accepted 05.09.2024