Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

<https://doi.org/10.17816/transsyst635951>

© **И.П. Попов**

Курганский государственный университет
(Курган, Россия)

БАЛКА С ПОВЫШЕННОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ ДЛЯ МОСТОВЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

Цель. 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.

Результаты. 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.

Заключение. 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.

Как цитировать:

Попов И.П. Балка с повышенной несущей способностью для мостовых пролетных строений // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 577–586. doi: 10.17816/transsyst635951

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© **I.P. Popov**

Kurgan State University
(Kurgan, Russia)

HIGH-LOAD BEAM FOR BRIDGE SPAN STRUCTURES

Aim. This work aims to increase the load-bearing capacity of tubular beams, allowing for a wider range of construction products.

Materials and Methods. The study utilizes geometric optimization methods and hypothetical experiments.

Results. A tubular beam with a liquid filler (hydraulic beam) is a round pipe, plugged at both ends, completely (without air pockets) filled with liquid. When the hydraulic beam is subjected to load, its side surface tends to deform. However, since the liquid inside is incompressible, it resists any reduction in volume. This resistance prevents the pipe from deforming under stress.

Conclusion. The load-bearing capacity of a hydraulic beam 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; liquid filler; cavity

To cite this article:

Popov IP. Beam with increased bearing capacity for bridge span structures. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):577–586.
doi: 10.17816/transsyst635951

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшей несущей способностью обладают двутавровые балки. Вместе с тем, из-за широкого распространения и доступности трубопроката в практике нередко используются трубчатые балки.

Сравнение этих двух видов 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

$${}^{l-b}W_x = 5625 \text{ см}^3.$$

Осевой момент сопротивления указанной трубы –

$${}^pW_x = 2950 \text{ см}^3.$$

При этом

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

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

В настоящее время появились патенты [1–3] и журнальные публикации [4–9] о трубобетонных балках, в частности, с преднапряженной нижней частью бетонного ядра. Стальная труба в таких балках играет роль экзoарматуры. Несущая способность трубобетонных балок весьма значительна при их невысокой себестоимости и хорошей технологичности.

Целью настоящей работы является повышение несущей 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

В рамках настоящего исследования 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. Вместе с тем, 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

Пусть при сверхпредельном нагружении круглой трубчатой балки (не гидравлической), приводящем к выводу 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 принимая 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, по крайней мере, 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 двутаровой.

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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Привлекательность железобетонных балочных конструкций состоит в замещении металла [11–13]. 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, смятия), 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 [14, 15] (в соответствии с формулой (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.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The author declare that this article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент РФ 2675273 / 18.12.2018 Бюл. № 35. Парышев Д.Н., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., и др. Трубобетонная балка. EDN: BQRXVM
2. Патент РФ 2702444 / 08.10.2019 Бюл. № 28. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Копырин В.И., и др. Пролетное трубобетонное строение моста. EDN: BZRSXK
3. Патент РФ 2739271 / 22.12.2020, Бюл. № 36. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Копырин В.И., и др. Битрубобетонная балка. EDN: ODMDNT
4. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Овчинников И.Г., и др. Применение трубобетона в транспортном строительстве // Дорожная держава. 2019. № 90. С. 74–80.
5. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Овчинников И.Г., и др. Малые мосты на трубобетонных элементах – технологический прорыв в нацпроекте

- «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (Ч. 1) // Дорожная держава. 2019. № 91. С. 34–39.
6. Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Овчинников И.Г., и др. Малые мосты на трубобетонных элементах – технологический прорыв в нацпроекте «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (Ч. 2) // Дорожная держава. 2019. № 92. С. 54–60.
 7. Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Моисеев О.Ю., и др. Упорядочение положения фибры в ядре трубобетонной балки // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. 2019. № 2 (12). С. 56–65. EDN: IYYSRR
 8. Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Моисеев О.Ю., и др. Трубобетонная балка с содержанием фибры в бетонном ядре // Естественные и технические науки. 2019. № 8. С. 189–195. EDN: LBFLZD doi: 10.25633/ETN.2019.08.08
 9. Овчинников И.Г., Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., и др. Повышение нагрузочной способности трубобетонной балки // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 4. С. 58–66. doi: 10.15593/24111678/2019.04.07
 10. Патент РФ 2724653 / 25.06.2020. Бюл. № 21. Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Копырин В.И., и др. Гидравлическая балка. EDN: ZDVEMW
 11. Козунова О.В. Нелинейный расчет железобетонной балки на упругом основании с помощью зависимости «жесткость-кривизна» // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 1 (300). С. 37–46. doi: 10.37538/0039-2383.2022.1.37.46
 12. Дёминов П.Д. Вероятностные параметры жесткости железобетонной балки, лежащей на стохастически неоднородном основании // Строительство и реконструкция. 2022. № 6 (104). С. 12–21. doi: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-12-21
 13. Кумпяк О.Г., Галаутдинов Д.Р. Метод расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 81–97. doi: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-81-97
 14. Петрушенко И.А., Аверченко Г.А. Использование бистальных элементов в пролетных строениях мостов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2022. Т. 8. № 1. С. 5–15. EDN: HHLZQV doi: 10.17816/transsyst2022815-15
 15. Лунина А.В., Кучерявая Е.В., Аверченко Г.А. Мосты с балками комбинированного сечения из клееной древесины и железобетона // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 188–199. EDN: DXKRRF doi: 10.17816/transsyst625423

REFERENCES

1. Patent RUS 2675273 / 18.12.2018. Bull. No. 35. Paryshev DN, Kopyrin VI, Moiseev OYu, et al. Pipe-concrete beam. (In Russ.) EDN: BQRXVM
2. Patent RUS 2702444 / 08.10.2019. Bull. No. 28. Paryshev DN, Iltyakov AV, Kopyrin VI, et al. Span pipe-concrete structure of a bridge. (In Russ.) EDN: BZRSXX

3. Patent RUS 2739271 / 22.12.2020. Bull. No. 36. Paryshev DN, Iltyakov AV, Kopyrin VI, et al. Bituminous concrete beam. (In Russ.) EDN: ODMDNT
4. Paryshev DN, Iltyakov AV, Ovchinnikov IG, et al. Application of reinforced concrete in transport construction. *Road State*. 2019;90:74–80. (In Russ.)
5. Paryshev DN, Iltyakov AV, Ovchinnikov IG, et al. Small bridges on pipe-concrete elements – a technological breakthrough in the national project “Safe and high-quality highways” (Part 1). *Road State*. 2019;91:34–39. (In Russ.)
6. Paryshev DN, Iltyakov AV, Ovchinnikov IG, et al. Small bridges on pipe-concrete elements – a technological breakthrough in the national project “Safe and high-quality highways” (Part 2). *Road State*. 2019;92:54–60. (In Russ.)
7. Paryshev DN, Iltyakov AV, Moiseev OYu, et al. Ordering the position of fibers in the core of a reinforced concrete beam. *Transport and mechanical engineering of Western Siberia*. 2019;2(12):56–65. (In Russ.) EDN: IYYSRR
8. Paryshev DN, Iltyakov AV, Moiseev OYu, et al. Ordering the position of fibers in the core of a reinforced concrete beam. *Transport and mechanical engineering of Western Siberia*. 2019;8:189–195. (In Russ.) EDN: LBFLZD doi: 10.25633/ETN.2019.08.08
9. Ovchinnikov IG, Paryshev DN, Iltyakov AV, et al. Increasing the load-bearing capacity of a reinforced concrete beam. *Transport. Transport structures. Ecology*. 2019;4:58–66. (In Russ.) doi: 10.15593/24111678/2019.04.07
10. Patent RUS 2724653 / 06.25.2020. Bull. No. 21. Paryshev DN, Iltyakov AV, Kopyrin VI, et al. Hydraulic beam. (In Russ.) EDN: ZDVEMW
11. Kozunova OV. Nonlinear calculation of a reinforced concrete beam on an elastic foundation using the “rigidity-curvature” relationship. *Structural mechanics and calculation of structures*. 2022;1(300):37–46. (In Russ.) doi: 10.37538/0039-2383.2022.1.37.46
12. Deminov PD. Probabilistic parameters of the rigidity of a reinforced concrete beam lying on a stochastically inhomogeneous foundation. *Construction and reconstruction*. 2022;6(104):12–21. (In Russ.) doi: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-12-21
13. Kumpyak OG, Galyautdinov DR. Method of calculating reinforced concrete beams with thrust on flexible supports under short-term dynamic loading. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022;24(5):81–97. (In Russ.) doi: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-81-97
14. Petrushenko IA, Averchenko GA. Use of bisteel elements in bridge spans. *Modern transportation systems and technologies*. 2022;8(1):5–15. (In Russ.) EDN: HHLZQV doi: 10.17816/transsyst2022815-15
15. Lunina AV, Kucheryavaya EV, Averchenko GA. Bridges with beams of combined cross-section made of glued laminated timber and reinforced concrete. *Modern transportation systems and technologies*. 2024;10(2):188–199. (In Russ.) EDN: DXKRRF doi: 10.17816/transsyst625423

Сведения об авторе:

Попов Игорь Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики;
eLibrary SPIN: 9668-2780; ORCID: 0000-0001-8683-0387;
E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Information about the author:

Igor P. Popov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical Mechanics
eLibrary SPIN: 9668-2780; ORCID: 0000-0001-8683-0387;
E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru