СТРОИТЕЛЬСТВО, РЕМОНТ И СОДЕРЖАНИЕ МОСТОВ

Научная статья

УДК 624.21
DOI: 10.70991/1815-896X-2025-1-53-131-144
EDN: UBSKSJ

О ТОЧНОСТИ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МОСТОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MIDAS CIVIL

Виктор Иванович Попов[1]✉
Буй Хыу Дык[2]

[1,2]Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

[1]popov.viktor@gmail.com✉;
ORCID:0009-0000-5252-8286
[2]buihuuduc2805@gmail.com

Аннотация. *В статье рассмотрены современные расчетные модели интегральных мостов, разработанные в России и за рубежом, с учетом взаимодействия их устоев с грунтом. На основе анализа проведенных авторами расчетов по созданной расчетной модели интегральных мостов в программном комплексе MIDAS CIVIL и сравнения результатов расчетов по другому программному комплексу и натурных исследований была определена точность предлагаемой модели для ее применения в численных исследованиях интегральных мостов.*

Ключевые слова: *интегральный мост, точность, расчетная модель, программный комплекс.*

Для цитирования: Попов В.И., Буй Хыу Дык. О точности расчетных моделей интегральных мостов в программном комплексе MIDAS CIVIL // Дороги и мосты. – 2025. – № 53/1. – С. 131-144. DOI: 10.70991/1815-896X-2025-1-53-131-144.

BRIDGE CONSTRUCTION, REPAIR AND MAINTENANCE

Original article

ON THE ACCURACY OF CALCULATION MODELS OF INTEGRAL BRIDGES IN THE MIDAS CIVIL SOFTWARE PACKAGE

Viktor I. Popov[1]✉
Bui Huu Duc[2]

[1,2]Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia

[1]popov.viktor@gmail.com✉;
ORCID:0009-0000-5252-8286
[2]buihuuduc2805@gmail.com

***Abstract**. The article considers modern computational models of integral bridges developed in Russia and abroad, taking into account the interaction of their abutments with the soil. Based on the analysis of the calculations carried out by the authors using the created calculation model of integral bridges in the MIDAS CIVIL software package and comparing the results of calculations using another software package and field studies, the accuracy of the proposed model was determined for its application in numerical studies of integral bridges.*

***Keywords**: integral bridge, accuracy, calculation model, software package.*

For citation: **Popov V.I., Bui Hui Duc.** On the accuracy of calculation models of integral bridges in the MIDAS CIVIL software package // Roads and Bridges. – 2025; (53/1): 131-144 (In Russ.). DOI: 10.70991/1815-896X-2025-1-53-131-144.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство традиционных мостов имеют деформационные швы и опорные части, которые являются дорогостоящими с точки зрения материалов и затрат на установку, а также имеют тенденцию к ухудшению их состояния и вызывают значительный износ компонентов моста. Устранение деформационных швов в мостах может снизить стоимость

строительства, решить многие проблемы, связанные с содержанием, а также повысить устойчивость и долговечность мостов.

Поэтому и появилась концепция мостов без деформационных швов и опорных частей в виде мостов с интегральными устоями. Мосты с интегральными устоями представляют собой одно- или многопролетные конструкции с гибкими фундаментами, в которых балки интегрированы с устоями. Помимо снижения затрат на техническое обслуживание и снижения первоначальных затрат, преимущества интегральных мостов включают улучшенную структурную целостность, надежность **[1, 2]**. На **рис. 1** изображена схема типичного однопролетного интегрального моста. Формы одинаково подходят как для однопролетных, так и для многопролетных мостов. По концам переходных плит предусматривают простейший деформационный шов.

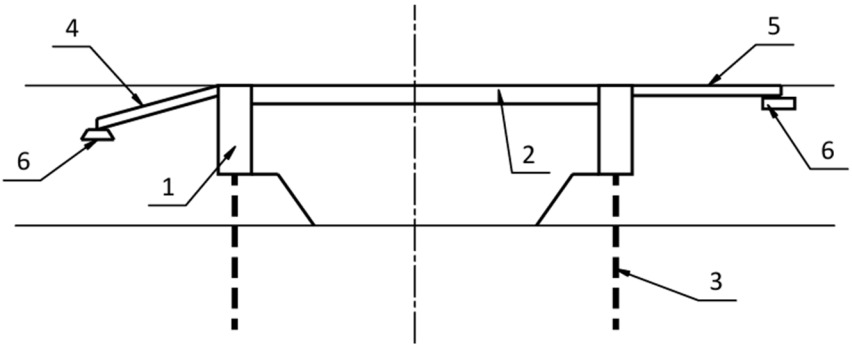

Рис. 1. Интегральный мост:
1 – тело устоя; 2 – пролетное строение; 3 – сваи;
4 – заглубленная переходная плита;
5 – поверхностная переходная плита; 6 – лежень

При проектировании и исследовании работы интегральных мостов в зарубежной практике используют различные программные комплексы (ПК), базирующиеся на конечно-элементных расчетных моделях, учитывающих взаимодействие интегрального устоя с грунтом насыпи. Можно перечислить некоторые работы, при выполнении которых были использованы такие ПК, как: GTSTRUDL **[3]**, STAAD Pro **[4]**, SAP2000 **[5]**, ANSYS **[6]**, MIDAS CIVIL **[7, 8]**. Накоплен определенный опыт применения ПК MIDAS CIVIL при проведении научных

исследований работы интегральных мостов и в российской практике под руководством соавтора настоящей статьи[1,2,3,4].

Как и в других известных ПК взаимодействие интегрального устоя с грунтом насыпи и основания в ПК MIDAS CIVIL моделируется пружинами в трех ортогональных направлениях, жесткость которых зависит от типа учитываемых при расчете грунтов.

Отсутствие эксплуатируемых интегральных мостов в России, а следовательно, и возможности сравнения натурных данных поведения таких мостов во времени с расчетными величинами, полученными в результате проведенных в нашей стране численных исследований на базе ПК MIDAS CIVIL, потребовало проведения анализа их точности в сравнении с результатами расчетов по другому ПК, применяемому наиболее часто в зарубежной практике, а также с данными экспериментальных исследований, результаты которых имеются в открытом доступе.

Расчетная модель интегральных мостов в программном комплексе MIDAS CIVIL и базовые допущения

В рамках данной работы была разработана расчетная модель интегральных мостов на основе анализа существующих расчетных схем и справочных материалов программного комплекса MIDAS CIVIL **(рис. 2)**.

Расчетная модель образована из балочных и плитных конечных элементов. Взаимодействие интегрального устоя с грунтом насыпи и основания представлено пружинами с разной жесткостью в пределах тела устоя и свай. Жесткость пружин определяется по методике Б. Лехана **[9, 10]**. Взаимодействие пролетного строения с промежуточными опорами и опорными частями моделируется упругой двухузловой связью.

---

[1] Фам, Т. Т. Совершенствование конструкции сопряжения путепроводов с насыпями подходов в условиях Вьетнама: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Фам Туан Тхань, 2017. – 169 с.

[2] Нгуен, В. Х. Применение интегральных устоев в косых путепроводах в условиях Вьетнама: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Нгуен Ван Хиен, 2019. – 166 с.

[3] Нгуен, М. Х. Особенности работы криволинейных путепроводов с интегральными устоями в условиях Вьетнама: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Нгуен Мань Ха, 2019. – 168 с.

[4] Чан, Д. З. Обеспечение ровности проезда на подходах к мостам: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Чан Дай Зунг, 2021. – 168 с.

Совместная работа промежуточных опор с основанием обеспечивается специальной функцией, отражающей конкретные граничные условия.

Смещение интегрального устоя происходит как от активного давления (в сторону пролета), так и от пассивного (в сторону насыпи). В зависимости от величины и направления перемещений тела устоя боковое давление грунта в общем случае может изменяться от активного до пассивного значения в соответствии с графиком, представленным на **рис. 3**.

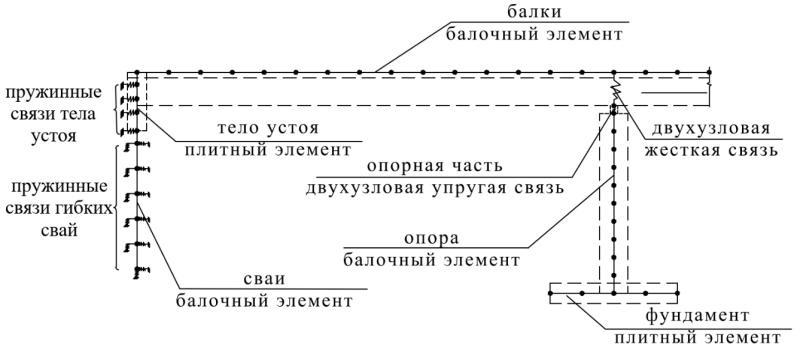

Рис. 2. Расчетная конечно-элементная модель интегрального моста

Согласно СП 22.13330[5], активному давлению соответствуют перемещения δ_a = 0,001h, а пассивному – δ_p = (0,01 - 0,02) h, где h – высота насыпи.

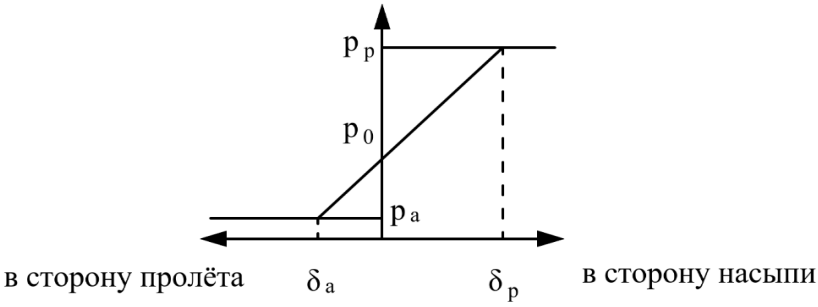

Рис. 3. График изменения давления грунта на интегральный устой

[5] СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – Минрегион России, 2017. 198 с. / Консорциум «Кодекс»: офиц. сайт. – URL: https://docs.cntd.ru/document/ 456054206 (дата обращения: 20.10.2024).

В основу формирования расчетных моделей интегральных мостов в ПК MIDAS CIVIL положены, помимо методики Лехана, также зависимости Бромса **[11]**, графическая интерпретация которых представлена на **рис. 4**. Согласно допущениям Бромса, боковое давление грунта насыпи на интегральный устой линейно связано с перемещениями только в сторону насыпи, хотя фактически, что подтверждено натурными исследованиями, боковое давление грунта возникает и при перемещениях в сторону пролета **(рис. 4)**.

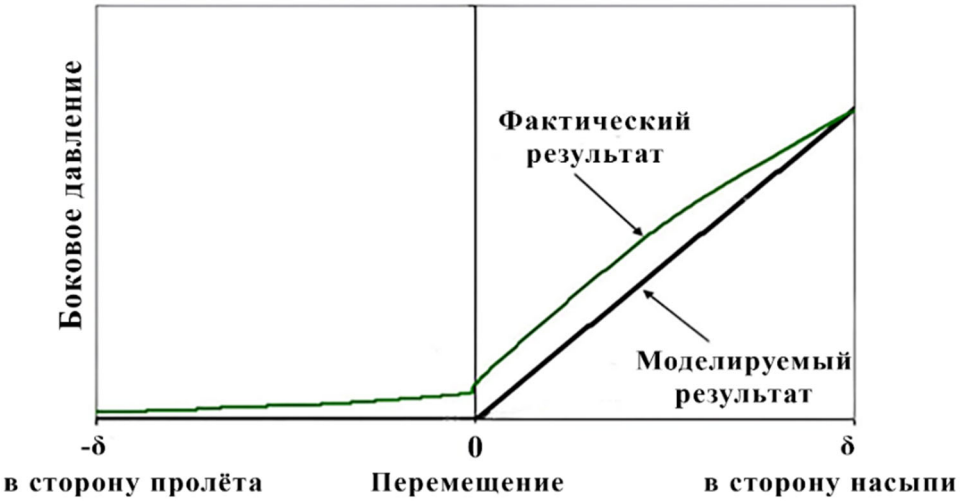

Рис. 4. Зависимость между боковым давлением и перемещением устоя по Бромсу [11]

Для интерпретации работы гибких свай интегральных устоев в расчетных моделях используется так называемый метод кривых *p-y*. Предполагается, что свая работает как балка, поддерживаемая пружинами, а реакция грунта на сваю в определенной точке связана с её поперечными перемещениями, описанными кривыми $p= f(y)$, где p – сопротивление грунта, а y – поперечное перемещение **[12]**.

В MIDAS CIVIL функция Integral Bridge доступна для автоматического назначения этих грунтовых пружин для устоев и свай на основе работ Лехана и Бромса **[10, 11, 13]**.

Оценка точности расчетной конечно-элементной модели

Данные об объекте

Для проверки предлагаемой расчетной конечно-элементной модели было выполнено сопоставление результатов численного исследования в программном комплексе MIDAS CIVIL с данными мониторинга существующего интегрального моста и результатами расчетов в ПК SAP2000.

Анализируя модель, принятую в SAP2000, можно отметить, что по сравнению с расчетной моделью, разработанной в MIDAS CIVIL, существенных отличий не наблюдается. Обе модели основаны на методе конечных элементов (МКЭ) и используют грунтовые пружины для моделирования взаимодействия «грунт – конструкция». Однако в MIDAS CIVIL предусмотрена специальная функция *Integral Bridge*, которая позволяет автоматически назначать параметры грунтовых пружин, что упрощает процесс моделирования и делает его более удобным для пользователя.

Объектом исследования послужил четырехпролетный интегральный мост (Мост 109), данные по которому были получены в ходе мониторинга, проведенного Ламаном и Кимом **[14]**.

В работе Н. Никравана **[15]** мост 109 также использовался в качестве объекта исследования, и на его основе были выполнены численные расчеты в программе SAP2000.

Мост 109 расположен в штате Пенсильвания (США) **[14]**. Схема моста представляет собой неразрезную систему с пролетами 26,8 м + 37,2 м + 37,2 м + 26,8 м. Конструкция пролетных строений состоит из четырех железобетонных балок типа AASHTO I 28/78, расположенных со взаимным шагом 3,5 м **(рис. 5 а)**. Размеры поперечного сечения балки приведены на **рис. 6**. Толщина железобетонной плиты составляет 0,23 м.

На мосту были установлены вибродатчики, а также тензодатчики, экстензометры и наклономеры **(рис. 5 а)**. В ходе мониторинга моста были собраны данные о температуре, перемещениях устоев и изгибающих моментах в сваях.

Общая высота устоев составляет 3,5 м. Устои располагаются на однорядных стальных сваях HP 310×110. Подробная информация о свойствах грунтовых слоев местности расположения устоев приведена в отчете, представленном в

работе **[14]**. Геологический разрез в месте расположения устоя показан на **рис 5 б**.

В качестве материала главных балок пролетных строений приняты бетон ASTM C8000, для плит проезжей части – ASTM C4000 и устоев, промежуточных опор – бетон ASTM C4000, сваи – из стали с модулем упругости 199,948 кН/м^2 и удельным весом 77,09 кН/м^3 **[14]**.

Средняя температура окружающего воздуха изменялась в диапазоне от минус 22 °С до плюс 35 °С. Для расчетов, помимо постоянных нагрузок, учитывали положительный перепад температуры, равный плюс 15 °С, и отрицательный перепад температуры минус 42 °С.

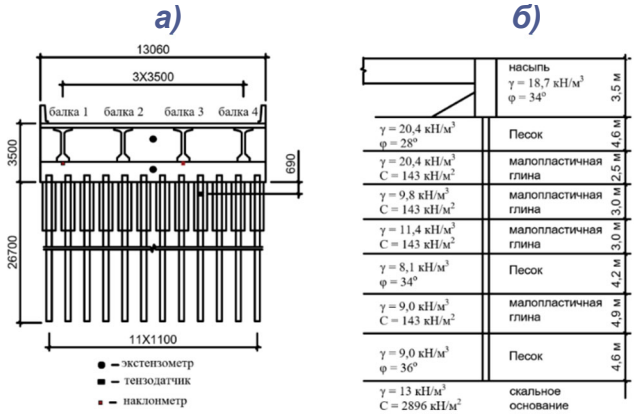

Рис. 5. Исходные данные по мосту 109 [14]:
а – поперечный разрез моста у интегрального устоя с расположением измерительных приборов;
б – геологический разрез

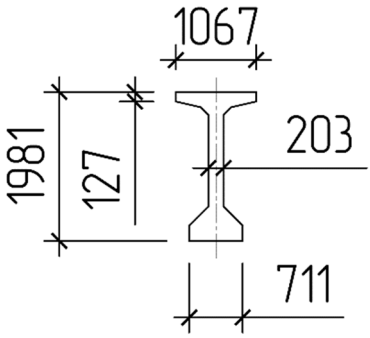

Рис. 6. Размеры балок типа I 28/78 [14]

На **рис. 7** показан общий вид конечно-элементной модели пролетного строения моста 109.

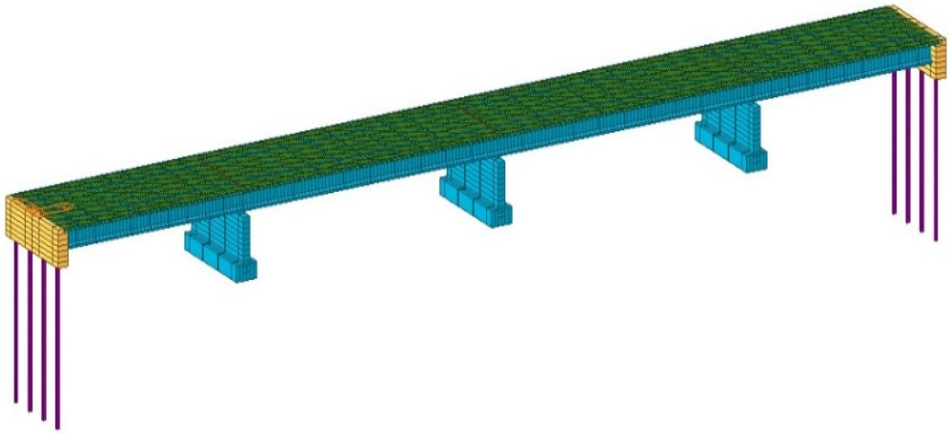

Рис. 7. Пространственная конечно-элементная модель моста 109 в MIDAS CIVIL

Сравнение результатов расчетов с использованием MIDAS CIVIL, SAP 2000 и с данными натурного мониторинга

В результате проведенных расчетов в программном комплексе MIDAS CIVIL были получены перемещения интегрального устоя, изгибающий момент сваи под температурным воздействием. Результаты расчетов перемещений устоя были сопоставлены с данными мониторинга и по сравниваемому источнику (**табл. 1**). Помимо линейных перемещений интегрального устоя, было проведено сравнение измеренных и рассчитанных значений углов поворота верха устоя (**табл. 2**).

В результате расчетов были получены изгибающие моменты при положительных и отрицательных перепадах температуры, которые представлены в виде графиков **(рис. 8)**.

Таблица 1

Сравнение результатов расчетов перемещений устоев с данными мониторинга

Период	Положение датчика	Перемещение устоя, мм			Разница расчетов с результатами мониторинга, %	
		По данным мониторинга [14]	По SAP 2000 [15]	По MIDAS CIVIL	По SAP 2000	По MIDAS CIVIL
Зимний период	верхний	30,6	39,7	33,6	22,9	9,8
	нижний	32,7	38,7	30,1	15,5	7,9
Летний период	верхний	-7,1	-	-7,4	-	4,2
	нижний	-7,4	-	-7,0	-	5,4

Таблица 2

Сравнение измеренных и рассчитанных значений углов поворота верха устоя

Положение датчика	Угол поворота, град.			Разница расчетов с результатами мониторинга, %	
	По данным мониторинга [14]	По SAP 2000 [15]	По MIDAS CIVIL	По SAP 2000	По MIDAS CIVIL
Под балкой 1	0,135	0,11	0,11	18,5	18,5
Под балкой 3	0,096	0,11	0,11	14,6	14,6

а) *б)*

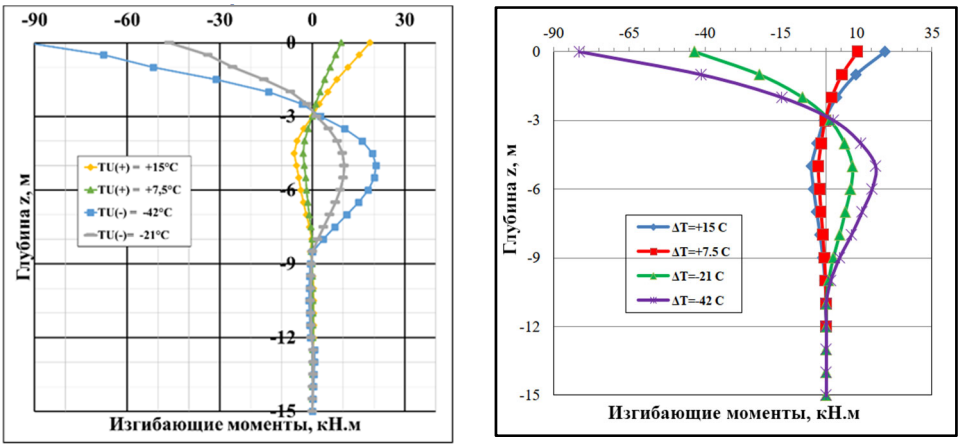

Рис. 8. Эпюры изгибающих моментов при перепадах температуры:
а – по принятой расчетной модели;
б – полученные по SAP 2000 **[15]**

Сравнение изгибающих моментов сваи показало близкое совпадение экспериментальных и расчетных результатов **(табл. 3)**.

Таблица 3

Сравнение измеренных и рассчитанных значений изгибающих моментов сваи

Глубина (z), м	*Изгибающий момент, кН.м*			*Разница расчетов с результатами мониторинга, %*	
	По данным монито-ринга [14]	*По SAP 2000 [15]*	*По MIDAS CIVIL*	*По SAP 2000*	*По MIDAS CIVIL*
0,69	64	68,4	67,65	7	6

ВЫВОДЫ

1. Проведенные численные расчеты, выполненные в MIDAS CIVIL, демонстрируют лучшую сходимость с данными мониторинга по сравнению с результатами, представленными в работе Н. Никраван (SAP2000). Разница между данными мониторинга и расчетами в MIDAS CIVIL составляет от 4,2 % до 9,8 % для перемещений устоев и изгибающих моментов в сваях. Это указывает на более высокую точность модели, реализованной в MIDAS CIVIL, что делает ее более предпочтительной для применения в численных исследованиях интегральных мостов и оценки их поведения.

2. Несмотря на расхождения в расчетах углов поворота устоев между результатами моделирования в MIDAS CIVIL и данными мониторинга (до 18 %), такие отличия могут быть объяснены упрощениями в моделировании и допущениями в расчетной модели. Однако такие расхождения находятся в допустимых пределах для инженерных расчетов, что позволяет использовать обе модели для оценки поведения интегральных мостов.

3. Анализ поведения моста при изменении температурных условий показывает, что расчетная модель в MIDAS CIVIL достаточно точно предсказывает изменения перемещений и изгибающих моментов по сравнению с данными мониторинга.

Таким образом, принятая расчетная модель, разработанная в MIDAS CIVIL, обладает высокой точностью и содержательностью при моделировании поведения интегральных мостов под воздействием различных факторов, включая температурные изменения.

© Попов В.И., Буй Хыу Дык., 2025

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Попов В.И. Путепроводы с классическими и интегральными устоями / В.И. Попов. – М.: Библио-Глобус, 2019. – 342 с.*
2. *Попов В.И. Интегральные мосты: монография / В.И. Попов. – М.: МАДИ, 2021. – 164 с.*
3. *Faraji S. Nonlinear analysis of integral bridges: Finite-element model / S. Faraji, J.M. Ting, D.S. Crovo, H. Ernst // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2001. – No 127(5). – P. 454-461.*
4. *Fennema J.L. Predicted and measured response of an integral abutment bridge / J.L. Fennema, J.A. Laman, D.G. Linzell // Journal of Bridge Engineering. – 2005. – No 10(6). – P. 666-677.*

5. *Kalayci E., Breña S.F., Civjan S.A. (2009). Curved integral abutment bridges – thermal response predictions through finite element analysis / E. Kalayci, S.F. Breña, S.A. Civjan. – DOI 10.1061/41031(341)23 // Structures Congress: Don't Mess with Structural Engineers. – 2009. – V. 1. – P. 213-222.*
6. *Kim W. Seven Year Field Monitoring of Four Integral Abutment Bridges / W. Kim, J.A. Laman // Journal of Performance of Constructed Facilities. – 2012. – No. 26(1). – P. 54-64.*
7. *Park M. Numerical Analysis of the Behavior of an IPM Bridge According to Super-Structure and Sub-Structure Properties / M. Park, M.S. Nam. – DOI /10.3390/su10030833 // Sustainability. – 2018. – V. 10. – No. 3. 833. – 23 p.*
8. *Zhuang Y. Investigation on Flooding-Resistant Performance of Integral Abutment and Jointless Bridge / Y. Zhuang, K. Wu, L. Xu, H. Li, D.M. Barbieri, Z. Fu. – DOI 10.1155/2020/1520278 // Advances in Civil Engineering. – 2020. – No.1. – 25 p.*
9. *Lehane B.M. Simplified elastic model for restraining effects of backfill soil on integral bridges / B.M. Lehane, D.L. Keogh, E.J. O'Brien // Computers and Structures. – 1999. – No. 73. – P. 301-313.*
10. *Lehane B. Lateral soil stiffness adjacent to deep integral bridge abutments / B. Lehane // Géotechnique. – 2011. – No. 61. – P. 593-603.*
11. *Broms B.B. Earth pressure against the abutments of a rigid frame bridge / B.B. Broms, I. Ingelson. – DOI:10.1680/geot.1971.21.1.15 // Géotechnique. – 1971. – V.21(1) – P. 15-28.*
12. *Reese L.C. Analysis of laterally loaded piles in sand / L.C. Reese, W.R. Cox, F.D. Koop // Offshore Technology Conference. – 1974. – No. 2. – P. 473-483.*
13. *Midas. Getting started American // Midas IT Co. Ltd, 2020. – 240 p.*
14. *Laman J.A. Monitoring of integral abutment bridges and design criteria development / J.A. Laman, W. Kim // Commonwealth of Pennsylvania department of transportation. – 2009. – 654 p.*
15. *Nikravan N. Structural Design Issues for Integral Abutment Bridges / N. Nikravan // Toronto Metropolitan University. – 2013. – 347 p.*

REFERENCES

1. *Popov V.I. Puteprovody s klassicheskimi i integral'nymi ustoyami / V.I. Popov. – M.: Biblio-Globus, 2019. – 342 s.*
2. *Popov V.I. Integral'nye mosty: monografiya / V.I. Popov. – M.:MADI, 2021.–164 s.*
3. *Faraji S. Nonlinear analysis of integral bridges: Finite-element model / S. Faraji, J.M. Ting, D.S. Crovo, H. Ernst // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2001. – No 127(5). – P. 454-461.*
4. *Fennema J.L. Predicted and measured response of an integral abutment bridge / J.L. Fennema, J.A. Laman, D.G. Linzell // Journal of Bridge Engineering. – 2005. – No 10(6). – P. 666-677.*
5. *Kalayci E., Breña S.F., Civjan, S. A. (2009). Curved integral abutment bridges - thermal response predictions through finite element analysis / E. Kalayci, S.F. Breña, S.A. Civjan. – DOI 10.1061/41031(341)23 // Structures Congress: Don't Mess with Structural Engineers. – 2009. – V. 1. – P. 213-222.*
6. *Kim W. Seven Year Field Monitoring of Four Integral Abutment Bridges / W. Kim, J.A. Laman // Journal of Performance of Constructed Facilities. – 2012. – No. 26(1). – P. 54-64.*

7. *Park M. Numerical Analysis of the Behavior of an IPM Bridge According to Super-Structure and Sub-Structure Properties / M. Park, M.S. Nam. – DOI /10.3390/su10030833 // Sustainability. – 2018. – V. 10. – No. 3. 833. – 23 p.*
8. *Zhuang Y. Investigation on Flooding-Resistant Performance of Integral Abutment and Jointless Bridge / Y. Zhuang, K. Wu, L. Xu, H. Li, D.M. Barbieri, Z. Fu. – DOI 10.1155/2020/1520278 // Advances in Civil Engineering. – 2020. – No.1. – 25 p.*
9. *Lehane B.M. Simplified elastic model for restraining effects of backfill soil on integral bridges / B.M. Lehane, D.L. Keogh, E.J. O'Brien // Computers and Structures. – 1999. – No. 73. – P. 301-313.*
10. *Lehane B. Lateral soil stiffness adjacent to deep integral bridge abutments / B. Lehane // Géotechnique. – 2011. – No. 61. – P. 593-603.*
11. *Broms B.B. Earth pressure against the abutments of a rigid frame bridge / B.B. Broms, I. Ingelson. – DOI:10.1680/geot.1971.21.1.15 // Géotechnique. – 1971. – V.21(1) – P. 15-28.*
12. *Reese L.C. Analysis of laterally loaded piles in sand / L.C. Reese, W.R. Cox, F.D. Koop // Offshore Technology Conference. – 1974. – No. 2. – P. 473-483.*
13. *Midas. Getting started American // Midas IT Co. Ltd, 2020. – 240 p.*
14. *Laman J.A. Monitoring of integral abutment bridges and design criteria development / J.A. Laman, W. Kim // Commonwealth of Pennsylvania department of transportation. – 2009. – 654 p.*
15. *Nikravan N. Structural Design Issues for Integral Abutment Bridges / N. Nikravan // Toronto Metropolitan University. – 2013. – 347 p.*

Информация об авторах

В.И. Попов – кандидат технических наук, профессор**,** Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Буй Хыу Дык – аспирант, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Information about the authors

V.I. Popov – Ph. D. (Tech.), Professor, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Bui Huu Duc – Graduate student, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Рецензент: д-р техн. наук, профессор, главный специалист отдела координации научных исследований А.В. Кочетков (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию 03.02.2025. Одобрена после рецензирования 28.02.2025. Принята к публикации 24.04.2025.

The article was submitted 03.02.2025. Approved after reviewing 28.02.2024. Accepted for publication 24.04.2025.