

## О РАБОТЕ СТАЛЬНЫХ СВАЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УСТОЕВ МОСТОВ

Канд. техн. наук **В.И. Попов**  
(Московский автомобильно-дорожный  
технический университет (МАДИ))  
Конт. информация: +7 (925) 010-10-97;  
vpopov@stpr.ru

*Рассмотрены вопросы работы стальных свай в интегральных устоях мостов при циклических воздействиях температуры в песчаных насыпях и сложенных из EPS-блоков. Показано, что стальные сваи трубчатого сечения обеспечивают работу сооружения без усталостных повреждений в течение всего срока его эксплуатации. Улучшению работы стальных свай интегральных устоев способствуют местные усиления в месте сопряжений их с телом устоя. Кроме того, установлено, что применение в насыпи подхода EPS-блоков позволяет уменьшить боковое давление на сваи и снизить перемещения и изгибающие моменты в их сечениях.*

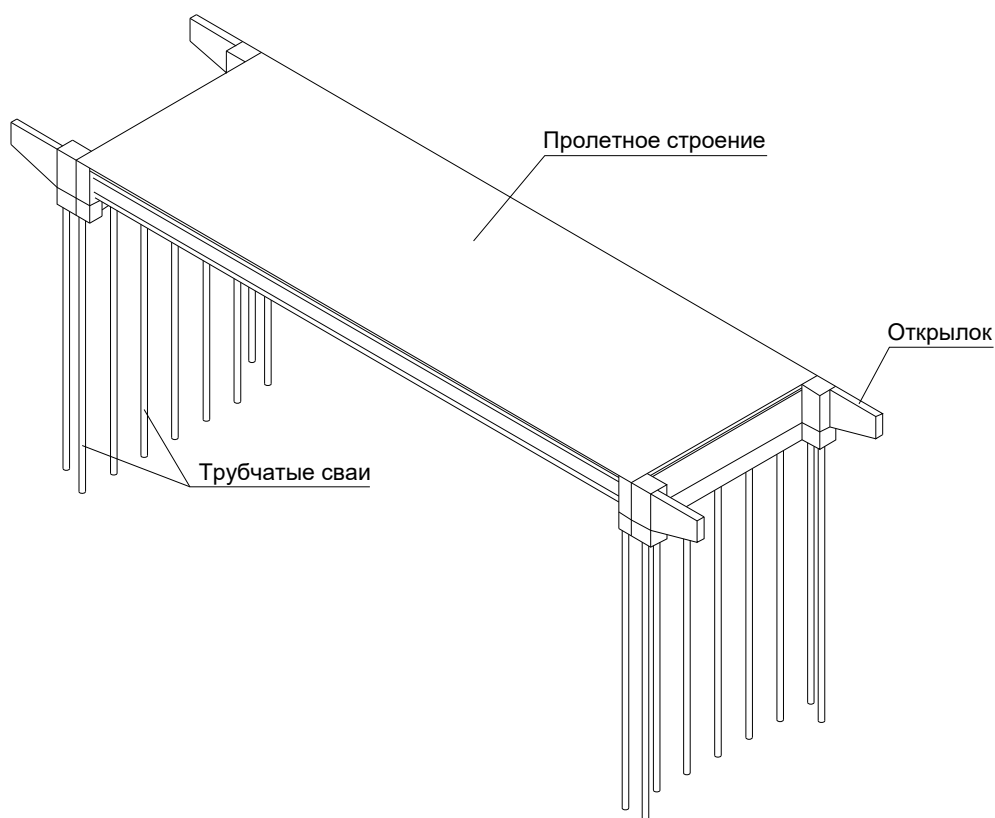
**Ключевые слова:** мост, интегральный устой, температурный перепад, давление грунта, пенополистирол, перемещения, изгибающие моменты.

В интегральных устоях мостовых сооружений в большинстве случаев практики США и некоторых других стран применяют Н-образные стальные сваи, при этом их поперечные сечения ориентируют по меньшему моменту инерции вдоль продольной оси, обеспечивая тем самым наибольшую гибкость свай. Для мостов косых и криволинейных в плане более целесообразны трубчатые сваи, обладающие большей способностью сопротивления кручению и проявлению усталости металла (**рис. 1**).

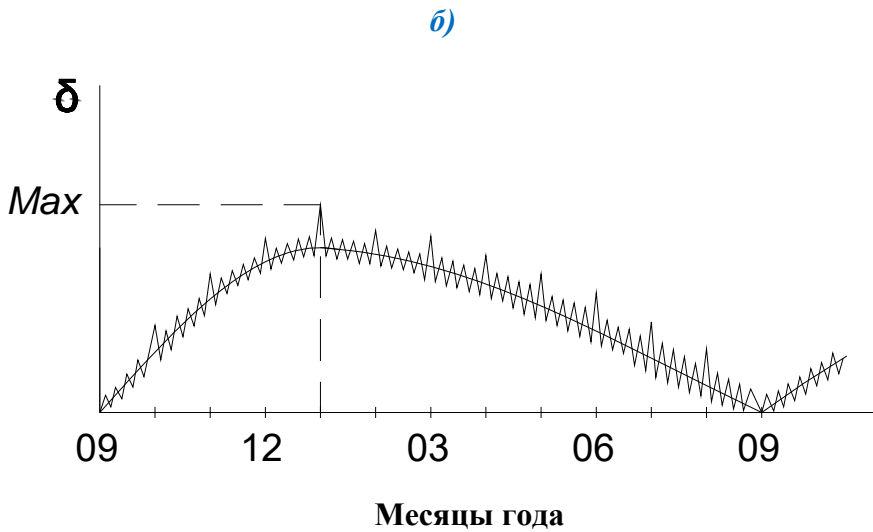
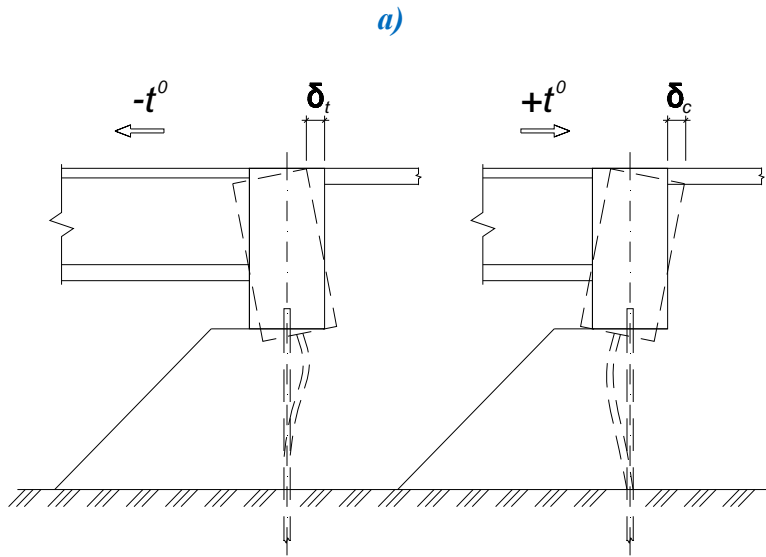
Сваи в интегральных устоях под воздействием температурных перепадов испытывают изгиб в противоположных направлениях. При этом понижение температуры в начале эксплуатации моста до наиболее низких температур в зимний период приводит к максимальным перемещениям тела интегрального устоя и свай, а затем с повышением температуры перемещения уменьшаются до значений, характерных в начале эксплуатации. В течение суток также происходит изменение температуры наружного воздуха, что также ведет к перемещениям разного знака. Характер изменения перемещений свай интегрального устоя наглядно иллюстрируют схемы и график на **рис. 2**. Вследствие много-

численных знакопеременных переменных деформаций с течением времени в стальных сваях могут возникать пластические деформации, и как результат – появление усталостных трещин. Как показали исследования по интегральным устоям со стальными сваями, в них под действием нагрузок и температурных воздействий при определенных размерах поперечных сечений могут возникать напряжения, близкие к пределу упругости. Наибольшие по величине напряжения возникают в сечении, где сваи заделываются в тело интегрального устоя (рис. 1) [1, 2].

При отмеченных условиях работы стальных свай важно знать срок их службы. Экспериментальные исследования, проведенные шведскими специалистами из технологического университета в г. Лулео, позволили получить предварительный ответ относительно срока безопасной эксплуатации стальных трубчатых свай интегральных устоев [3].



*Рис. 1. Схема моста с интегральными устоями*



**Рис. 2. Изменение перемещений свай интегрального устоя во времени:**  
*a – картина деформаций при понижении и повышении температуры;*  
*б – график перемещений свай*

Данные эксперименты были проведены на низкоциклическую усталость при изгибе, которая, по мнению исследователей, может возникнуть при сезонных перепадах температуры наружного воздуха. В образцах создавали деформации, превышающие соответствующие пределу текучести почти в 6 раз и после 140 циклов нагружения происходило их резкое уменьшение, а затем увеличение с последующим постепенным падением деформаций в диапазоне 150-700 циклов до значений, соответствующих пределу текучести. При последующих сериях тестов падение деформаций происходило без скачков и при 300-400 циклах нагружения в образцах появлялись усталостные трещины.

Таким образом, если принимать во внимание только сезонные перепады температур, ведущие к возникновению в сечениях свай знакопеременных напряжений, то усталостные трещины в стальных сваях могут появиться после 100 лет эксплуатации.

В условиях нашей страны могут наблюдаться значительные суточные изменения температуры от положительных к отрицательным, что на практике создает еще большее число циклов нагружения в течение каждого года эксплуатации. Однако эти изменения меньше сезонных интервалов температуры.

Поскольку интегральные устои рекомендуется применять при малых пролетах мостовых сооружений, а их нормативный срок службы в соответствии с действующими нормами составляет не более 50 лет, то стальные трубчатые сваи могут использоваться безопасно в течение всего срока службы сооружений.

При назначении размеров и прочностных характеристик стальных свай необходимо учитывать не только изгиб, связанный с воздействием температуры, но и образующийся в результате воздействия циклических подвижных нагрузок, усадки и ползучести бетона, а также давления грунта за стенкой интегрального устоя.

В отличие от устоев балочных мостов грунт за интегральными устоями под действием нагрузок и температурных воздействий с течением времени (1,5-2 года) уплотняется и давление из активного переходит в пассивное на большей части высоты тела устоя [2]. Пассивное давление, с одной стороны, увеличивая интенсивность давления на сваи, с другой стороны снижает амплитуду знакопеременных перемещений свай, т.е. снижает уровень низкоциклической усталости. Таким образом, интегральные устои при других достоинствах способствуют повышению долговечности сооружений в целом.

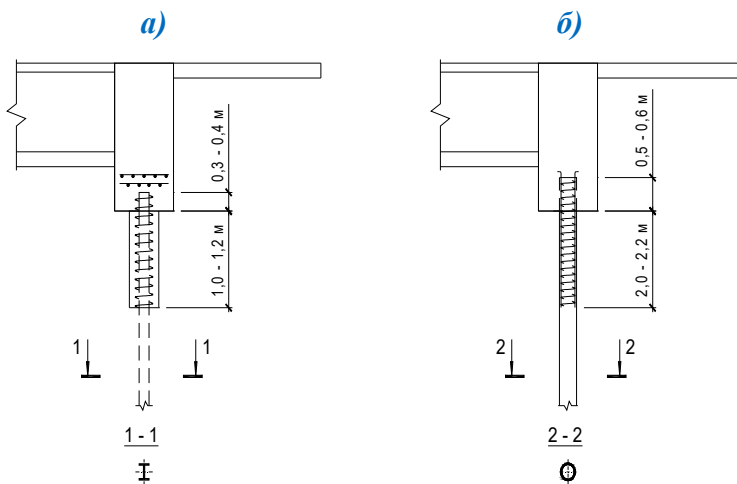
В США, где мосты с интегральными устоями нашли наиболее широкое применение, при проектировании стальных свай в некоторых штатах допускается появление ограниченных пластических деформа-

ций, а других – не допускается. Так, в штате Иллинойс сваи проектируют, исходя из упругой работы. В штате Айова, являющимся лидером в проведении исследований работы мостов с интегральными устоями, пластические деформации допускаются в месте заделки свай в тело устоя [4, с. 7]. В штате Теннесси, руководствуясь опытом в эксплуатации мостов с интегральными устоями, рекомендуют ограничивать боковые перемещения стальных Н-образных свай величиной 2-2,5 дюйма и тем самым, считают, что обеспечивают работу таких свай в упругой стадии [4, с. 9].

Российским стандартом СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» при проведении расчетов рекомендуется учитывать *«физическую нелинейность, анизотропность, пластические и реологические свойства материалов и грунтов, развитие областей пластических деформаций под фундаментом»* (п. 7.1.2). При расчете изгибаемых элементов мостовых конструкций СП 35.13330-2011 допускает ограниченные пластические деформации, а учитывая, что СП 24.13330-2011 базируется на основных положениях СП 35.13330-2011, то в стальных сваях учет ограниченных пластических деформаций также допускается.

Одной из важных задач при проектировании мостов с интегральными устоями является обоснование количества свай, обеспечивающих надежность оснований и сооружений в целом в процессе эксплуатации. Для увеличения несущей способности стальных свай предусматривают заполнение их внутренних полостей песком. Другим способом, по мнению автора данной статьи, целесообразно применение винтовых трубчатых свай, которые обеспечивают большую площадь опирания, чем обычные трубчатые сваи такого же диаметра. В сейсмических районах стальные трубчатые сваи целесообразно заполнять бетоном.

Как показывают обследования мостов [4, 5] и экспериментальные исследования их работы на изгиб [3], в местах сопряжения свай с телом интегрального устоя возникают трещины в бетоне тела устоя из-за образования там максимальных изгибающих моментов. Бетон в зоне заделки свай в тело интегрального устоя обминается, и напряжения в сечении сваи резко уменьшаются, а затем начинают расти, что было отмечено выше. Для снижения такого отрицательного эффекта предлагается устраивать местное увеличение жесткости верха свай. Наиболее простой способ заключается в устройстве железобетонной обоймы верха свай, которая позволяет увеличить жесткость сваи и, поскольку ординаты эпюры изгибающих моментов достаточно резко уменьшаются с глубиной, то стальное сечение ниже обетонированной части воспринимает существенно меньшие по величине изгибающие моменты. Целостность зоны сопряжения сваи с телом интегрального устоя в этом случае сохраняется.



**Рис. 3. Способы улучшения сопряжений свай с телом интегрального устоя:**

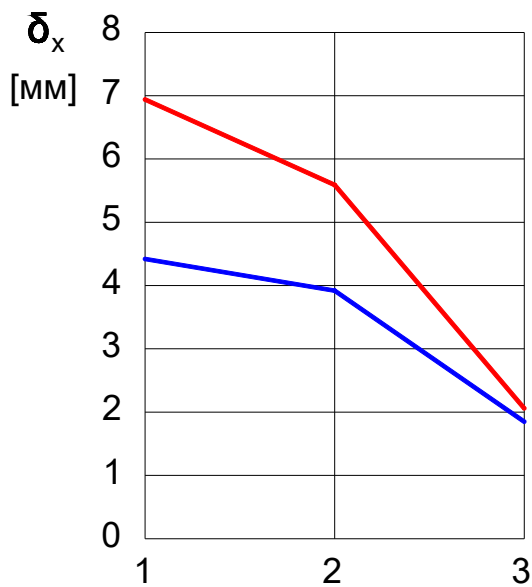
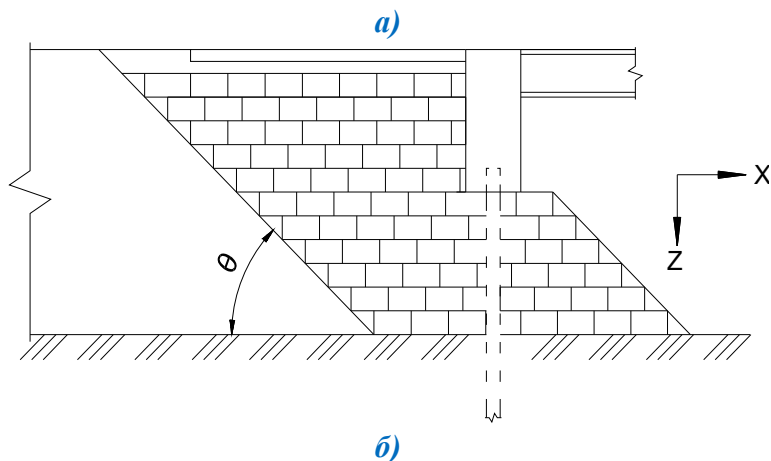
*а – обетонированием верхней части свай;  
б – устройством железобетонного заполнения*

Участок обетонирования сваи армируют спиральной арматурой, обеспечивая тем самым его трещиностойкость (**рис. 3 а**). Увеличить жесткость верха свай можно также бетонированием внутренней полости трубчатой сваи с устройством внутри арматурного каркаса (**рис. 3 б**). По рекомендациям, приведенным в [3], длина зоны обетонирования свай Н-образного сечения должна быть не менее 1,0-1,2 м, а железобетонного участка внутри трубчатой сваи – не менее 2,0-2,2 м.

Для стальных свай и особенно наиболее гибких Н-образного сечения, ориентированные по меньшему моменту инерции относительно продольной оси моста, возникает опасность потери устойчивости. Однако окружающий уплотненный грунт насыпи препятствует этому эффекту. В некоторых странах сваи интегральных устоев размещают в железобетонных или гофрированных пластиковых трубах, например, в США и Великобритании. Такое решение позволяет принудительно уменьшить изгибные деформации стальных свай и снизить вероятность потери их устойчивости.

Улучшить работу стальных свай удастся при применении в насыпи подхода пенополистирольных блоков (**рис. 4**). В зарубежной литературе такие блоки называют EPS-блоки (англ. EPS – expanded polystyrene - вспененный полистирол) [6]. Блоки с прочностью на сжатие не менее 100 кПа располагают в пределах призмы обрушения грунта насыпи или на большей длине. Угол наклона заполнения  $\theta$  обычно принимается равным  $45^\circ$ . Для заполнения насыпи на подходе к мостам ре-

комендуются EPS- блоки со следующими характеристиками: сопротивление сжатию при 1 % деформации 75 кПа, плотность не менее 29 кг/м<sup>3</sup>, прочность при изгибе 300-400 кПа. Водонасыщение EPS-блоков после 20 лет эксплуатации по данным [6] составило около 1 %.



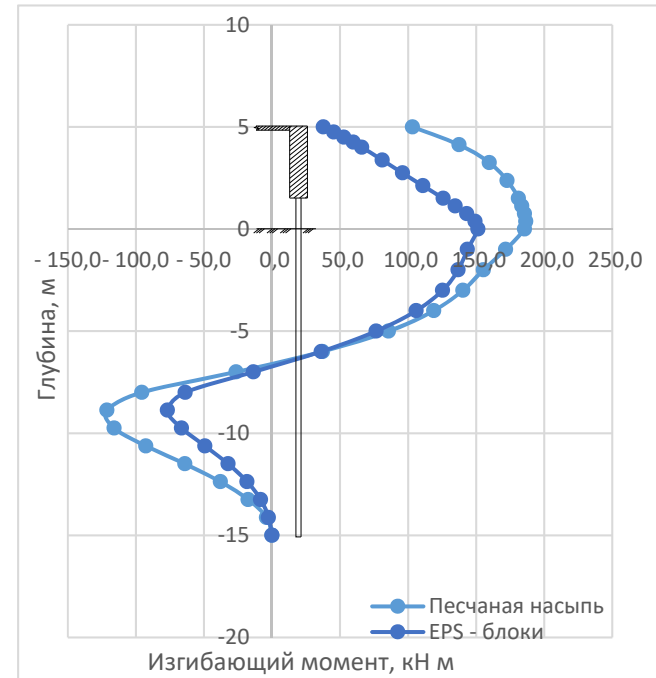
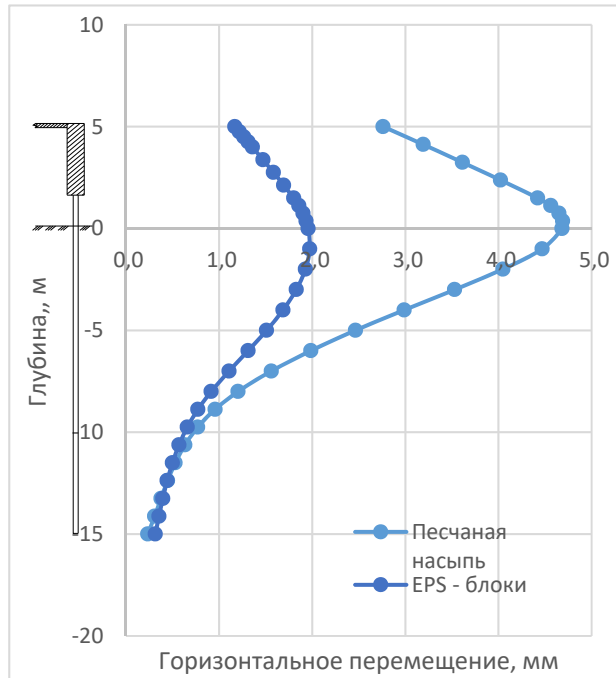
**Рис. 4. Применение EPS-блоков в насыпи за интегральным устоем:**

*a – схема расположения EPS-блоков;*

*б – зависимости горизонтальных перемещений верха устоя от конструкции насыпи при поверхностной (красная линия) и заглубленной переходной плите (синяя линия);*

*по горизонтальной оси графика обозначены насыпи:*

*1 – песчаная; 2 – армогрунтовая; 3 – из EPS-блоков*



*Рис. 5. Перемещения и изгибающие моменты в сваях и теле устоя*



Участок насыпи подхода, сложенный из EPS-блоков, по весу существенно меньше песчаной насыпи и благодаря этому происходит уменьшение бокового давления грунта на сваи, а, следовательно, и изгибающих моментов. Отмеченное иллюстрируется эпюрами горизонтальных перемещений и изгибающих моментов свай с телом интегрального устоя путепровода пролетом 40 м при загрузке нагрузкой А14 участка на длине переходной плиты длиной 6 м и толщиной 0,4 м (рис. 5).

С возрастанием числа температурных циклов давление грунта насыпи на сваи увеличивается. С применением в насыпи подхода EPS-блоков давление со временем также увеличивается, но по величине они оказываются меньше, чем при песчаной насыпи. По данным проф. Дж.С. Хорвата [6] уже после 4 циклов перехода температуры от плюс 10 °С до минус 20 °С и затем до плюс 40 °С давление на интегральный устой в 6 раз было меньше при заполнении насыпи EPS-блоками.

## ВЫВОДЫ

1. Стальные сваи интегральных устоев малых мостов в условиях циклических температурных перепадов могут эксплуатироваться в течение всего срока службы сооружения, без возникновения в них повреждений от усталостных напряжений.
2. Улучшению работы стальных свай интегральных устоев способствуют местные усиления в месте сопряжения их с телом устоя.
3. Существенному снижению давления грунта насыпи подхода на стальные сваи способствует применение в теле насыпи на участках сопряжения моста с дорогой, пенополистирольных блоков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Попов В.И. Влияние свай на работу интегральных устоев косоугольного строения / В.И. Попов, Нгуен Ван Хиен // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2017. – № 4. – С.14-17.
2. Попов В.И. Путепроводы с классическими и интегральными устоями / В.И. Попов. – М.: Библио-Глобус, 2019. – 342 с.
3. Petursson H. Low-Cycle Fatigue Strength of Steel Piles under Bending / H. Petursson, M. Moller, P. Collin // Structural Engineering International. – 2013. – № 3. – PP. 278-284.
4. Olson S.M. Thermal Behavior of IDOT Integral Abutment Bridges and Proposed Design Modifications / S.M. Olson, K.P. Holloway, J.M. Buenker, J.H. Long, J.M. LaFave / University of Illinois at Ur-

- bana-Champaign. – Illinois Center for Transportation. – Research Report FHWA-ICT-12-022. – 2013. – May. – 63 p.*
5. *Phares B.M. Field Monitoring of Curved Girder Bridges with Integral Abutments / B.M. Phares / Iowa State University. – Bridge Engineering Center. – Final Report. – 2014. – January. – 274 p.*
  6. *Horvath J.S. Integral-Abutment Bridges: Problems and Innovative Solutions Using EPS Geopfoam and Other Geosynthetics / J.S. Horvath / Manhattan College Research Report No / CE/GE-00-2. – New-York, USA. – 2000. – May. – 170 p.*

## **L I T E R A T U R A**

1. *Popov V.I. Vliyanie svaj na rabotu integral'nyh ustoev kosogo proleznogo stroeniya / V.I. Popov, Nguen Van Hien // Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli. – 2017. – № 4. – S.14-17.*
2. *Popov V.I. Puteprovody s klassicheskimi i integral'nymi ustoyami / V.I. Popov. – M.: Biblio-Globus, 2019. – 342 s.*
3. *Petursson H. Low-Cycle Fatigue Strength of Steel Piles under Bending / H. Petursson, M. Moller, P. Collin // Structural Engineering International. – 2013. – № 3. – PP. 278-284.*
4. *Olson S.M. Thermal Behavior of IDOT Integral Abutment Bridges and Proposed Design Modifications / S.M. Olson, K.P. Holloway, J.M. Buenker, J.H. Long, J.M. LaFave / University of Illinois at Urbana-Champaign. – Illinois Center for Transportation. – Research Report FHWA-ICT-12-022. – 2013. – May. – 63 p.*
5. *Phares B.M. Field Monitoring of Curved Girder Bridges with Integral Abutments / B.M. Phares / Iowa State University. – Bridge Engineering Center. – Final Report. – 2014. – January. – 274 p.*
6. *Horvath J.S. Integral-Abutment Bridges: Problems and Innovative Solutions Using EPS Geopfoam and Other Geosynthetics / J.S. Horvath / Manhattan College Research Report No / CE/GE-00-2. – New-York, USA. – 2000. – May. – 170 p.*

.....  
**ABOUT THE BEHAVIOR OF STEEL PILES IN INTEGRAL  
ABUTMENT OF BRIDGES**

*Ph. D. (Tech.) V.I. Popov  
(Moscow Automobile and Road Construction  
State Technical University (MADI))  
Contact information: +7 (925) 010-10-97;  
vpopov@stpr.ru*

*The issues related to the behavior of steel piles in integral abutment of bridges under cyclical temperature effects in soil embankments and EPS-block embankments are considered. It is shown that steel piles of tubular section provide the structure operation without fatigue damage during the service life. The improvement of steel piles in integral abutments is provided by local strengthening at the point of their connection with abutment body. It is also revealed that the use of the EPS-block in the embankment approach allows to reduce the lateral pressure on the piles, as well as decrease the displacements and bending moments in their sections.*

**Key words:** *bridge, integral abutment, temperature gradient, soil pressure, expanded polystyrene (EPS), displacement, bending moments.*

---

Рецензент: канд. техн. наук М.И. Шейнцвит (ФАУ «РОСДОРНИИ»);  
заместитель начальника отделения научно-технического развития СКФ  
Ю.В. Головань (ФАУ «РОСДОРНИИ»);  
Статья поступила в редакцию: 29.11.2019 г.