

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ОПОРНЫЕ РЕАКЦИИ В ДВУХПРОЛЕТНОЙ МОСТОВОЙ ФЕРМЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ

ЗЫЛЕВ В.Б., АЛФЕРОВ И.В.

Российский университет транспорта» (МИИТ), г. Москва, Россия

***Аннотация.** В данной работе исследуются динамические опорные реакции, возникающие в двухпролетной мостовой ферме, вследствие воздействия на пролетное строение подвижной нагрузки. Наибольший интерес представляет исследование горизонтальной опорной реакции. Как пролетное строение, так и движущийся состав, представляют из себя деформируемые упругие системы. Силы взаимодействия между подвижным составом и пролетным строением получаются в результате решения контактной задачи. Для численного моделирования был использован метод и соответствующая компьютерная программа, разработанная на кафедре «Строительная механика». Способ решений уравнений движения основан на явной схеме интегрирования с экстраполяцией по Адамсу. При получении результатов решения учитывались силы внутреннего трения в материале с использованием обобщенной модели Прандтля. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при вертикальном воздействии горизонтальная опорная реакция достигает весьма существенных значений.*

**Ключевые слова:** динамические опорные реакции, мостовая ферма, подвижная нагрузка, численное моделирование, экстраполяция по Адамсу, обобщенная модель Прандтля.

## STUDY OF THE DYNAMIC SUPPORT REACTIONS IN THE TWO-SPAN BRIDGE FARM UNDER ACTION OF MOVING LOAD

ZYLEV V.B., ALFEROV I.V.

Russian University of Transport, Moscow, Russia

***Abstract.** In this article, we study the dynamic support reactions that occur in a two-span bridge farm, due to the impact on the superstructure of the moving load. The most interesting is the study of horizontal support reaction. Both the span and the moving structure are deformable elastic systems. The interaction forces between the rolling stock and the span structure are obtained by solving a contact problem. For numerical modeling, the method and the corresponding computer program developed at the Department of Structural Mechanics were used. The method of solving the equations of motion is based on an explicit integration scheme with extrapolation according to Adams. When obtaining the results of the solution, the internal friction forces in the material were taken into account using the generalized Prandtl model. The results obtained allow us to conclude that, under vertical action, the horizontal support reaction reaches very significant values.*

**Keywords:** dynamic support reactions, bridge farm, moving load, numerical modeling, extrapolation according to Adams, generalized Prandtl model.

Статья посвящена весьма актуальному вопросу определения усилий в опорных частях мостовых пролетных строений. До появления наших публикаций [1–5] считалось, что появление горизонтальной опорной реакции в шарнирно неподвижной опоре пролетного строения связано исключительно с тормозной силой, соответственно на это усилие эти опорные части рассчитывались и проектировались. В наших работах было показано, что при динамическом воздействии на пролетные строения, имеющие классическую схему опирания (статически определимая балка на двух опорах) возникают существенные по величине горизонтальные опорные реакции, что должно быть учтено при назначении безопасных размеров опорных частей. Причина появления горизонтальной составляющей опорной реакции заклю-

чается в том, что опорная часть в реальных конструкциях всегда располагается не на нейтральной оси, а сдвинута вниз.

Отсутствие аварийных ситуаций, связанных с непривычным на первый взгляд динамическим эффектом, следует видимо объяснить существенными запасами прочности, которые закладываются при проектировании опорных частей. Принципиально этот вопрос подвергался всестороннему обсуждению на научных конференциях и в ходе защиты диссертационной работы И.В. Алферова. Хотя конструкциям опорных частей и их расчету посвящено много работа [6-10], обнаруженный динамический эффект является в настоящее время достаточно новым и не нашел отражения в работах других авторов. Актуальность рассматриваемого вопроса связана с соображениями безопасности при грузовых и пассажирских перевозках, в связи с чем, большое значение приобретают количественные исследования динамических опорных реакций в пролетных строениях с реальными характеристиками.

Настоящая статья посвящена исследованию динамических опорных реакций, возникающих в двухпролетной мостовой ферме, вследствие воздействия на пролетное строение подвижной нагрузки. Основной целью работы является исследование горизонтальной опорной реакции.

Расчетная схема является плоской, содержащей только стержни, работающие на растяжение-сжатие. Продольные балки двутаврового поперечного сечения моделируются стержневой фермой, имеющей высоту равную высоте продольной балки. Для моделирования изгибной деформации поперечных балок вводятся специальные стержни, которые соединяют продольную балку с узлами основной фермы. Жесткость этих стержней подбиралась с таким условием, чтобы смоделировать изгиб поперечных балок, как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях (рис. 1).

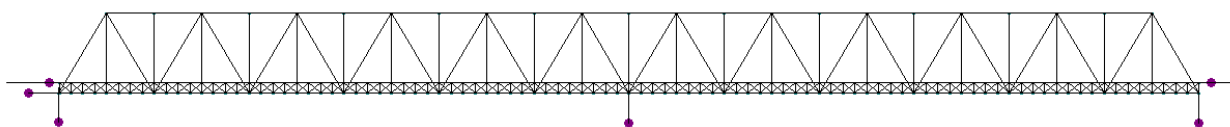


Рисунок 1 – Двухпролетная мостовая ферма с пролетами по 55 м

Подвижной состав был представлен локомотивом с одним нагруженным вагоном. Суммарная масса подвижного состава равна 238 т. Суммарная масса пролетного строения составляет 400 т. (рис.2).

Как пролетное строение, так и движущийся состав, представляют из себя деформируемые упругие системы. Силы взаимодействия между подвижным составом и пролетным строением получаются в результате решения контактной задачи. Для численного моделирования был использован метод и соответствующая компьютерная программа, разработанная на кафедре «Строительная механика» [10].

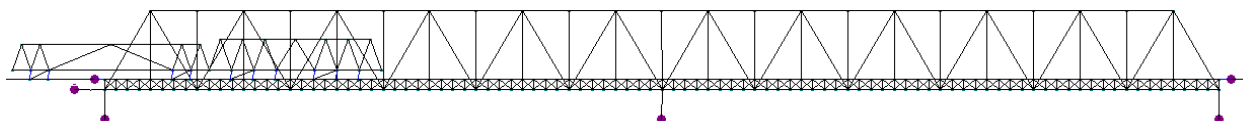


Рисунок 2 – Двухпролетная мостовая ферма с подвижной нагрузкой

Первый этап решения задачи заключается в определении усилий от собственного веса конструкции. Далее подвижной нагрузке сообщается начальная горизонтальная скорость, дальнейшее движение поезда есть движение по инерции.

Способ решений уравнений движения, основанный на явной схеме интегрирования с экстраполяцией по Адамсу дан во многих наших публикациях [1-5]. Наиболее полно он изложен в учебнике по строительной механике [11]. В данной работе мы будем обращать внимание прежде всего на результаты численных решений, которые представляют наибольший практический интерес. Отметим только то, что задача решается с малым временным шагом. В каждый момент времени определяются координаты, скорости всех точечных масс, внутрен-

ние усилия во всех элементах системы. Силы взаимодействия между пролетным строением и подвижным составом передаются через 6 внешних узлов локомотива и 4 внешних узла вагона (колеса локомотива и вагона). Усилия взаимодействия между каждым внешним узлом и поверхностью катания вычисляются на каждом временном шаге численного решения. Учет сил внутреннего трения существенным образом влияет на получаемые результаты. При получении результатов решения учитывались силы внутреннего трения в материале с использованием обобщенной модели Прандтля.

В целях сравнения полученных результатов рассматривалось 3 варианта расположения горизонтальной связи: в начале, посередине и в конце пролетного строения. Значения усилия в вертикальной связи приведены для опорной точки, расположенной в начале пролетного строения (рис. 3–5).

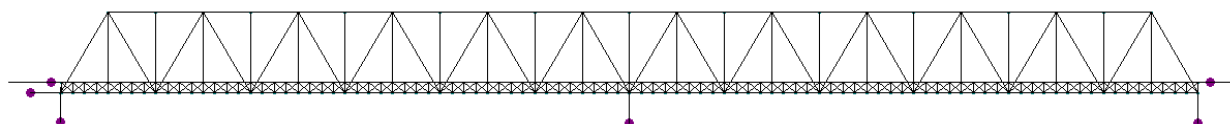


Рисунок 3 – Горизонтальная связь в начале пролетного строения

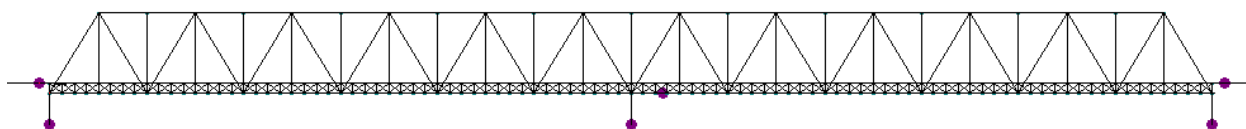


Рисунок 4 – Горизонтальная связь посередине пролетного строения

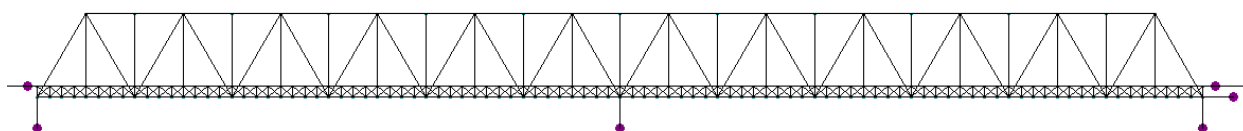
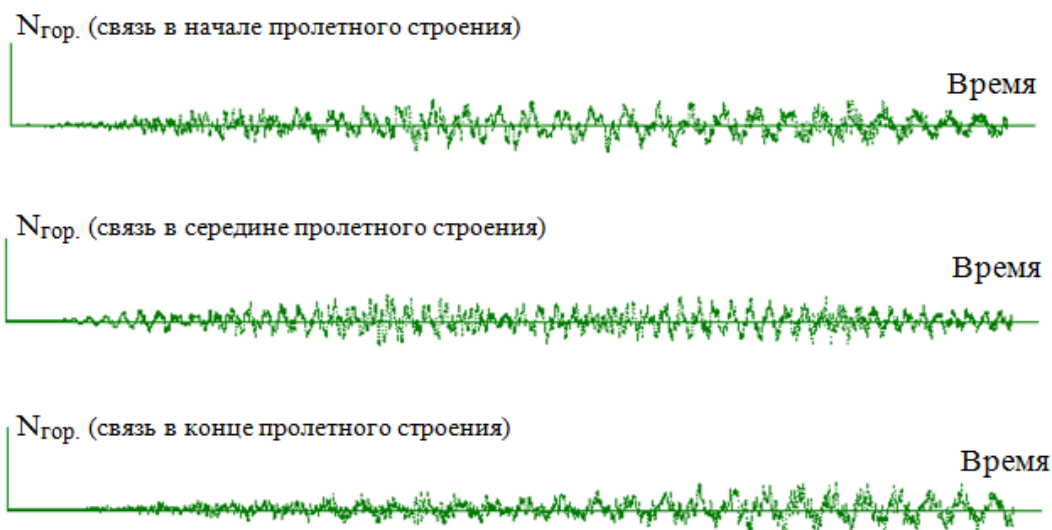


Рисунок 5 – Горизонтальная связь в конце пролетного строения

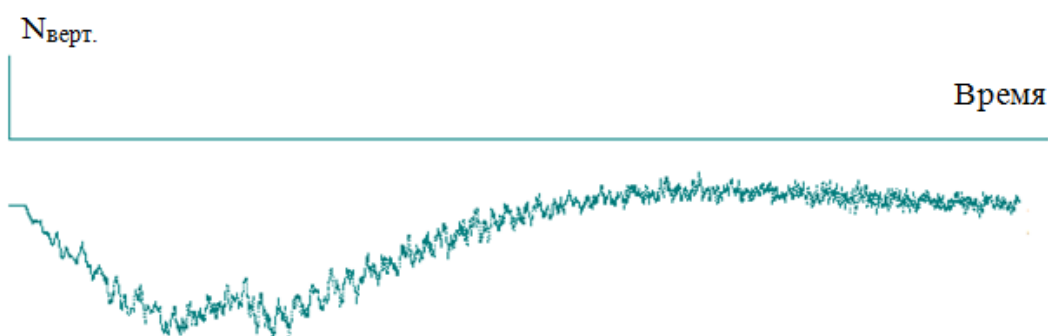
Скорость подвижного состава принималась равной 50, 100, 150, 200 км/ч. За период прохождения подвижной нагрузки программа фиксирует *max* и *min* значения усилий. В таблице 1 представлены результаты численного решения.

Таблица 1 – Значения максимальных за время прохождения подвижного состава по пролетному строению динамических опорных реакций, возникающих в результате воздействия подвижной нагрузки на пролетное строение

| Скорость подвижного состава, км/ч | Динамические опорные реакции, кН | Горизонтальная связь в начале пролетного строения | Горизонтальная связь посередине пролетного строения | Горизонтальная связь в конце пролетного строения |
|-----------------------------------|----------------------------------|---|---|--|
| 50                                | $N_{гор.}$                       | <b>132</b>  | <b>194</b>  | <b>166</b>                                       |
|                                   | $N_{верг.}$                      | -2393   | -2410   | -2390  |
| 100                               | $N_{гор.}$                       | <b>302</b>  | <b>309</b>  | <b>337</b>                                       |
|                                   | $N_{верг.}$                      | -2420   | -2451   | -2461  |
| 150                               | $N_{гор.}$                       | <b>472</b>  | <b>665</b>  | <b>476</b>                                       |
|                                   | $N_{верг.}$                      | -2771   | -2668   | -2646  |
| 200                               | $N_{гор.}$                       | <b>593</b>  | <b>613</b>  | <b>649</b>                                       |
|                                   | $N_{верг.}$                      | -2506   | -2569   | -2515  |



*Рисунок 6 – Графики изменения динамической горизонтальной опорной реакции при скорости движения подвижного состава 100 км/ч*



*Рисунок 7 – График изменения динамической вертикальной опорной реакции при скорости движения подвижного состава 100 км/ч. Вертикальная и горизонтальные связи расположены в начале пролетного строения*

На рис. 6, 7 показаны графики изменения динамических опорных реакций. График вертикальной опорной реакции начинается со статического значения, равного 802 кН, что составляет около 1/5 от веса пролетного строения.

### Выводы

1. В работе показано, что и в двухпролетных фермах при традиционном размещении опорных частей при вынужденных колебаниях от действия подвижной нагрузки возникает существенное горизонтальное усилие, не зависимо от того где установлена горизонтальная связь (в начале, в середине или в конце пролетного строения).
2. Максимум горизонтальной реакции за период прохождения временной нагрузки достигает значений сопоставимых с усилиями от торможения. Величина этого максимума возрастает с увеличением скорости движения подвижного состава.
3. Важно отметить, что горизонтальная опорная реакция появляется при каждом прохождении подвижной нагрузки. Напомним, что традиционно эта опорная реакция всегда считалась нулевой при рассматриваемом воздействии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов И.В. Совместная модель пролетного строения, подвижного состава и массивной опоры для анализа динамических опорных реакций. *Строительство и реконструкция*. 2014. №3 (53). – С. 3-6.
2. Зылев В.Б., Алферов И.В. Динамические опорные реакции в мостовой ферме при воздействии землетрясения. Сборник материалов международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития строительных конструкций: инновации, модернизация и энергоэффективность в строительстве» 19-20 декабря 2013 г.Т.1. Алматы: КазГАСА,2013. – С. 63-68.
3. Зылев В.Б., Алферов И.В. Горизонтальная опорная реакция при колебаниях балок, балочных ферм и складчатых систем. Сборник докладов IX Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте, 27 – 28 мая 2014 г. Санкт-Петербург, 2015. – С. 102-108.
4. Зылев В.Б., Алферов И.В. Динамическая модель – пролетное строение, подвижной состав, насыпь. Труды научно-практической конференции «Наука МИИТа – транспорту». М.: МИИТ, 2014. – С. II-1-II-2.
5. Зылев В.Б., Алферов И.В. Исследование динамических опорных реакций в одно- и двухпролетных ферменных системах при действии подвижной нагрузки. Сборник материалов Совместной Международной научно-практической конференции, посвященной Году Узбекистана в Казахстане 7-8 декабря. Алматы, 2018. С. 136-140.
6. Соломахин П.М. Проектирование мостовых и строительных конструкций. Учебное пособие. М.: КНОРУС, 2011. – 408 с.
7. Ефимов П. П. Проектирование мостов. Книга. ООО «Дантэя», 2006. – 2006 с.
8. Бычковский Н.Н., Данковцев А.Ф. Металлические мосты. Часть 1.Книга. Саратов. гос. техн. ун-т, 2005. – 364 с.
9. Бычковский Н.Н., Данковцев А.Ф. Металлические мосты. Часть 2.Книга. Саратов. гос. техн. ун-т, 2005. – 348 с.
10. Колоколов Н.М., Вейнблат Б.М. Строительство мостов. Учебник. М.: Транспорт, 1981. – 504 с.
11. Александров А.В., Потапов В.Д., Зылев В.Б. Строительная механика в 2-х книгах. Книга 2. Динамика и устойчивость упругих систем. М.: Высшая школа, 2008. – С. 196-219; 368-373.

REFERENCES

1. Alferov I.V. Sovmestnaya model' proletnogo stroeniya, podvizhnogo sostava i massivnoj opory dlya analiza dinamicheskikh opornykh reakcij [Modern model of span structure, railway transport and massive support for analysis of dynamic restraint's reaction]. *Building and Reconstruction*. 2014. No 3 (53). Pp. 3-6.
2. Zylev V.B., Alferov I.V. Dinamicheskie opornye reakcii v mostovoj ferme pri vozdeystvii zemletryaseniya. Proc. Of Int. Conf. "Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'nykh konstrukcij: innovacii, modernizaciya i energoeffektivnost' v stroitel'stve" ["Actual problems and possibilities for development of constructions: innovations, moderning and energy efficiency in construction"] 19-20 Dec. 2013 Vol.1. Almaty: KazGASA, 2013. Pp. 63-68.
3. Zylev V.B., Alferov I.V. Gorizontaln'naya opornaya reakciya pri kolebaniyah balok, balochnykh ferm i skladchatykh sistem [Horizontal restraint reaction for oscillation of beams, trusses and folded systems]. Proc. of IX Int. Conf. on problem of strength of construction materials and structures of transport, 27 – 28 May 2014. Sankt-Peterburg, 2015. Pp. 102-108.
4. Zylev V.B., Alferov I.V. Dinamicheskaya model' – proletnoe stroenie, podvizhnoj sostav, nasyp' [Dynamic model – span structure, railway transport, embankment]. Proc. Of Conf. "Nauka MIITa – transportu" ["Science of MIIT for transport"]. Moscow: MIIT, 2014. Pp. II-1-II-2.
5. Zylev V.B., Alferov I.V. Issledovanie dinamicheskikh opornykh reakcij v odno- i dvuhproletnykh fermennykh sistemah pri deystvii podvizhnoj nagruzki [Research of dynamic restraint reactions in one- and two-span truss systems at action of moving loads]. Proc. Of Int. Conf. on Year of Uzbekistan in Kazahstan, 7-8 Dec.. Almaty, 2018. Pp. 136-140.
6. Solomahin P.M. Proektirovanie mostovykh i stroitel'nykh konstrukcij [Designing of bridge and construction structures]. Moscow: KNORUS, 2011. 408 p.
7. Efimov P. P. Proektirovanie mostov [Designing of bridges]. Omsk: ООО «Danteya», 2006.
8. Bychkovskij N.N., Dankovcev A.F. Metallicheskie mosty [Steel bridges]. Part 1. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2005. 364 p.
9. Bychkovskij N.N., Dankovcev A.F. Metallicheskie mosty [Steel bridges]. Part 2. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2005. 348 p.
10. Kolokolov N.M., Vejnblat B.M. Stroitel'stvo mostov [Building of bridges]. Moscow: Transport, 1981. 504 p.
11. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Zylev V.B. Structural mechanics in two parts. Part 2. Dynamics and stability of elastic systems. Moscow: Vysshaya shkola, 2008. pp. 196-219; 368-373.

**Информация об авторах:**

**Зылев Владимир Борисович**

ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта» (МИИТ), г. Москва  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительная механика»  
E-mail: [zylevzb@yandex.ru](mailto:zylevzb@yandex.ru)

**Алферов Иван Валерьевич**

ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта» (МИИТ), г. Москва  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика»  
E-mail: [ialferov@bk.ru](mailto:ialferov@bk.ru)

**Information about authors:**

**Zylev V.B.**

Federal State Institution of Education «Russian University of Transport», Moscow  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Construction Mechanics»  
E-mail: [zylevzb@yandex.ru](mailto:zylevzb@yandex.ru)

**Alferov I.V.**

Federal State Institution of Education «Russian University of Transport», Moscow  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Construction Mechanics»  
E-mail: [ialferov@bk.ru](mailto:ialferov@bk.ru)