

Золтан Орбан

e-mail: [orbanz@witch.pmmf.hu](mailto:orbanz@witch.pmmf.hu)

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИКИ ГРУНТА НА ПРИГОДНОСТЬ К ЭКСПЛУАТАЦИИ МОСТОВ АРОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

*Рассматривается влияние параметров механики подстилающих грунтов на эксплуатационную надежность железнодорожных мостов арочной конструкции. Приводится пример применения предложенного метода исследования для анализа состояния железнодорожного кирпичного арочного моста типовой конструкции.*

Исследование состояния железнодорожных мостов арочной конструкции является в настоящее время актуальной проблемой. Значительное количество мостов такого типа было построено в XIX – начале XX в., уровень испытываемой в настоящее время нагрузки значительно превышает первоначальную проектировочную нагрузку. Наступает момент, когда необходимо принимать обоснованное решение о возможности и целесообразности их дальнейшей эксплуатации. В соответствии с этим соображением на основе разработанного метода было проведено исследование однопролетного арочного моста из кирпичей типового исполнения, состоящего из двух колец, с точки зрения пригодности к эксплуатации.

Геометрическое исполнение конструкции моста представлено на рис. 1. Помимо собственного веса на мост одновременно действует одноосная концентрированная нагрузка от транспорта. Распределение концентрированной нагрузки осуществляется по шкалам по стандарту EN 1991-2 (рис. 2). В ходе экспериментов исследовалось, какое колебание эталонного напряжения происходит в характерных поперечных сечениях арки (рис. 3). Расчеты проводились в условиях различных интенсивностей нагрузок и разных характеристик подстилающего слоя. Наиболее важные параметры, применяемые в ходе расчетов, приведены в табл. 1–5.

В целях исследования характеристики кладки были определены таким образом, чтобы они соответствовали характерным особенностям кладки из кирпича сравнительно низкой прочности, сделанной с помощью известкового раствора (что является характерным для железнодорожных арочных мостов Венгрии). Для подстилающего слоя были определены два типа материалов: уплотненный песок (НТ1) и неуплотненный песок (НТ2). Характеристики основания отличаются от подстилающего слоя, они определены по рекомендациям UIC. Между блоками кладки, а также между кольцами определена сравнительно низкая величина сил трения. Все это полностью отвечает характеристикам конструкций кладки в соответствующем состоянии.

Для анализа нелинейных воздействий, зависящих от величины интенсивности нагрузок, расчеты были проведены с полезными нагрузками различных величин: 1, 25 и 250 кН. Наиболее интересные результаты испытаний приведены на рис. 4–7.

На рис. 4–6 разными цветами обозначены изменения эталонного напряжения, возникшего в отдельных точках поперечного сечения (A1–F1) под воздействием полезного груза, перемещаемого по поверхности моста, при условии применения подстилающего слоя типа НТ1, т. е. из уплотненного песка. Рисунки наглядно по-

казывают критическую позицию груза с точки зрения максимальной величины напряжения или то, что с возрастанием интенсивности нагрузки уже на уровне эксплуатационных нагрузок может произойти перераспределение напряжения из-за местного расслабления связей между отдельными блоками кладки. Все это подтверждает предположение, что изменение напряжения не может быть исследовано с применением линейной модели – путем соответствующего масштабирования результатов, полученных при анализе нагрузок низкой интенсивности.

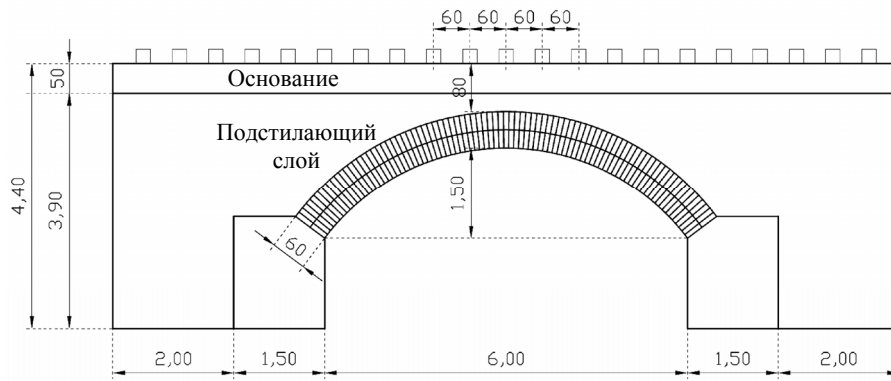


Рис. 1. Геометрическое исполнение моста

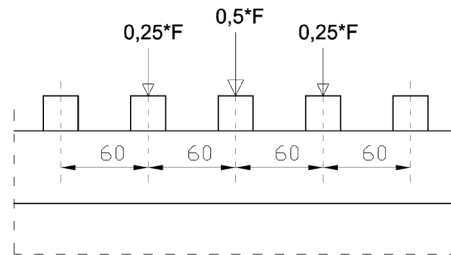


Рис. 2. Распределение концентрированной нагрузки от транспорта по шпалам

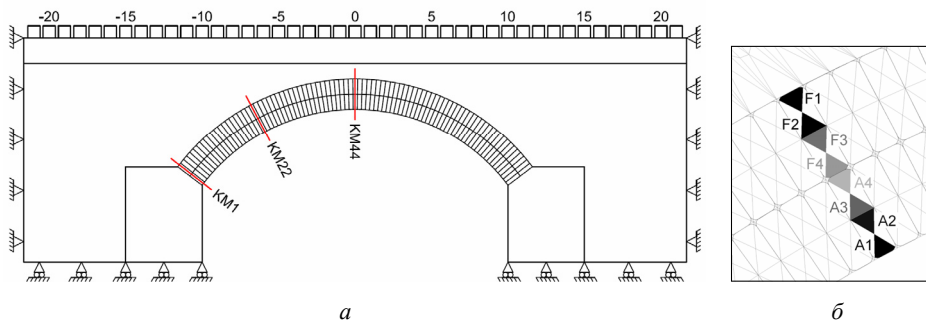


Рис. 3. Обозначение нагрузочных точек и исследуемого поперечного сечения вдоль ширины моста и вдоль поперечных сечений

Таблица 1. Определение характеристик кладки

| Тип модели: линейно-упругий                                  |          |                                        |
|--------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------|
| Параметр                                                     | Величина | Объяснение                             |
| $E_b$ (кН/м <sup>2</sup> )                                   | 5,00E+06 | Модуль упругости кладки (блоков)       |
| $\nu_b$ (–)                                                  | 0,2      | Коэффициент кладки (блоков) Пуассона   |
| $K_b$ (кН/м <sup>2</sup> )                                   | 2,78E+06 | Модуль компрессии                      |
| $G_b$ (кН/м <sup>2</sup> )                                   | 2,08E+06 | Модуль среза                           |
| $\gamma_b$ (кН/м <sup>3</sup> )                              | 18       | Объемный вес                           |
| Характеристика прочности кладки (для исследования усталости) |          |                                        |
| $f_b$ (Н/мм <sup>2</sup> )                                   | 8,00     | Прочность сжатия кирпича               |
| $f_m$ (Н/мм <sup>2</sup> )                                   | 1,00     | Прочность сжатия известкового раствора |
| $f_c$ (Н/мм <sup>2</sup> )*                                  | 1,93     | Прочность сжатия кладки                |

\*  $f_c = 0,5f_b^{0,65}f_m^{0,25}$  (на основе формулы Eurocode-6)

Таблица 2. Определение характеристики подстилающего слоя

| Тип модели: Mohr-Coulomb        |                               |                                 |                                            |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|
| Параметр<br>(единица измерения) | Уплотненный<br>песок<br>(НТ1) | Неуплотненный<br>песок<br>(НТ2) | Объяснение                                 |
| $E_f$ (кН/м <sup>2</sup> )      | 200 000                       | 20 000                          | Модуль упругости подстилающего слоя        |
| $\nu_f$ (–)                     | 0,3                           | 0,3                             | Коэффициент кладки (блоков) Пуассона       |
| $K_f$ (кН/м <sup>2</sup> )      | 1,67E+05                      | 1,67E+04                        | Модуль компрессии подстилающего слоя       |
| $G_f$ (кН/м <sup>2</sup> )      | 7,69E+04                      | 7,69E+03                        | Модуль среза подстилающего слоя            |
| $\phi_f$ (°)                    | 37,5                          | 30,0                            | Угол внутреннего трения подстилающего слоя |
| $c_f$ (кН/м <sup>2</sup> )      | 0                             | 0                               | Когеция подстилающего слоя                 |
| $\gamma_f$ (кН/м <sup>3</sup> ) | 19                            | 18                              | Объемный вес подстилающего слоя            |

Таблица 3. Определение характеристики основания

| Тип модели: Mohr-Coulomb        |          |                                   |
|---------------------------------|----------|-----------------------------------|
| Параметр<br>(единица измерения) | Величина | Объяснение                        |
| $E_a$ (кН/м <sup>2</sup> )      | 2,00E+05 | Модуль упругости основания        |
| $\nu_a$ (–)                     | 0,3      | Коэффициент Пуассона основания    |
| $K_a$ (кН/м <sup>2</sup> )      | 1,67E+05 | Модуль компрессии основания       |
| $G_a$ (кН/м <sup>2</sup> )      | 7,69E+04 | Модуль среза основания            |
| $\phi_a$ (°)                    | 40       | Угол внутреннего трения основания |
| $c_a$ (кН/м <sup>2</sup> )      | 0        | Когеция основания                 |
| $\gamma_a$ (кН/м <sup>3</sup> ) | 18       | Объемный вес основания            |

**Таблица 4. Определение характеристики связей/контактов. Связи между блоками кладки и кольцами**

| Тип модели: основанная на трении  |          |                                          |
|-----------------------------------|----------|------------------------------------------|
| Параметр<br>(единица измерения)   | Величина | Объяснение                               |
| $E_{bb}$ (кН/м <sup>2</sup> )     | 1,00E+06 | Нормальная жесткость раствора            |
| $G_{bb}$ (кН/м <sup>2</sup> )     | 0,50E+06 | Жесткость на срез раствора               |
| $k_{n,bb}$ (кН/м <sup>2</sup> /м) | 5,50E+08 | Нормальная жесткость связей/контактов    |
| $k_{s,bb}$ (кН/м <sup>2</sup> /м) | 3,30E+08 | Жесткость на срез связей/контактов       |
| $\varphi_{bb}$ (°)                | 30,96    | Угол внутреннего трения связей/контактов |
| $c_{bb}$ (кН/м <sup>2</sup> )     | 0        | Когезия связей/контактов                 |
| $f_{t,bb}$ (кН/м <sup>2</sup> )   | 0        | Прочность на растяжение связей/контактов |

*Примечание.* Из нормальной жесткости и жесткости на срез мы высчитывали жесткость связей/контактов по рекомендациям UDEC manual и исходили из предположения, по которому напряжение от растяжения не будет передаваться на связи/контакты.

**Таблица 5. Определение характеристики связей/контактов. Связи между аркой и подстилающим слоем, между подстилающим слоем и основанием**

| Тип модели: основанная на трении |          |                                          |
|----------------------------------|----------|------------------------------------------|
| Параметр<br>(единица измерения)  | Величина | Объяснение                               |
| $k_{n,c}$ (кН/м <sup>2</sup> /м) | 1,00E+06 | Нормальная жесткость связей/контактов    |
| $k_{s,c}$ (кН/м <sup>2</sup> /м) | 0,50E+06 | Жесткость на срез связей/контактов       |
| $\varphi_c$ (°)                  | 20       | Угол внутреннего трения связей/контактов |

На рис. 7, 8 при двух разных интенсивностях нагрузок (25 и 250 кН) для обоих типов подстилающего слоя сравниваются изменения напряжения в точках интрадоса (A1) и экстрадоса (F1) в поперечных сечениях КМ22 и КМ44 арки.

На основе рисунков можно установить, что в случае подстилающего слоя из менее неплотных материалов (НТ2) изменение напряжения значительно больше, чем в случае более плотного, жесткого подстилающего слоя (НТ1).

На рис. 9 изображены эталонные напряжения, возникающие под действием собственного веса арки в ее поперечных сечениях с учетом характеристик обоих типов подстилающего слоя.

Проверка пригодности к эксплуатации проводилась с помощью приблизительного метода, созданного по принципу допустимых напряжений при одноосной концентрированной нагрузке от транспорта величиной  $F = 250$  кН.

Отдельные шаги расчетов в исследуемых поперечных сечениях представлены в табл. 6, 7. В данном случае  $S_u$  означает прочность на сжатие кладки ( $S_u = f_c = 1,93$  Н/мм<sup>2</sup>), а частное  $k/k_{adm}$  указывает на отношение коэффициента фактического и допустимого напряжения сжатия при количестве циклов. Поскольку величина частного  $k/k_{adm}$  меньше 1, это означает, что в данной точке поперечного сечения конструкция не соответствует требованиям усталости в случае неограниченного количества циклов нагружения ( $N = 10^8$ ). В таких случаях на основе анализа данных об интенсивности эксплуатации моста необходимо взвешивать, является ли количество циклов нагружения  $N_i$ , вызывающих усталость конструкции, достаточным.

Возможно также определить, какова величина прочности на сжатие кладки, которая достаточна для полного устранения проблемы усталости.

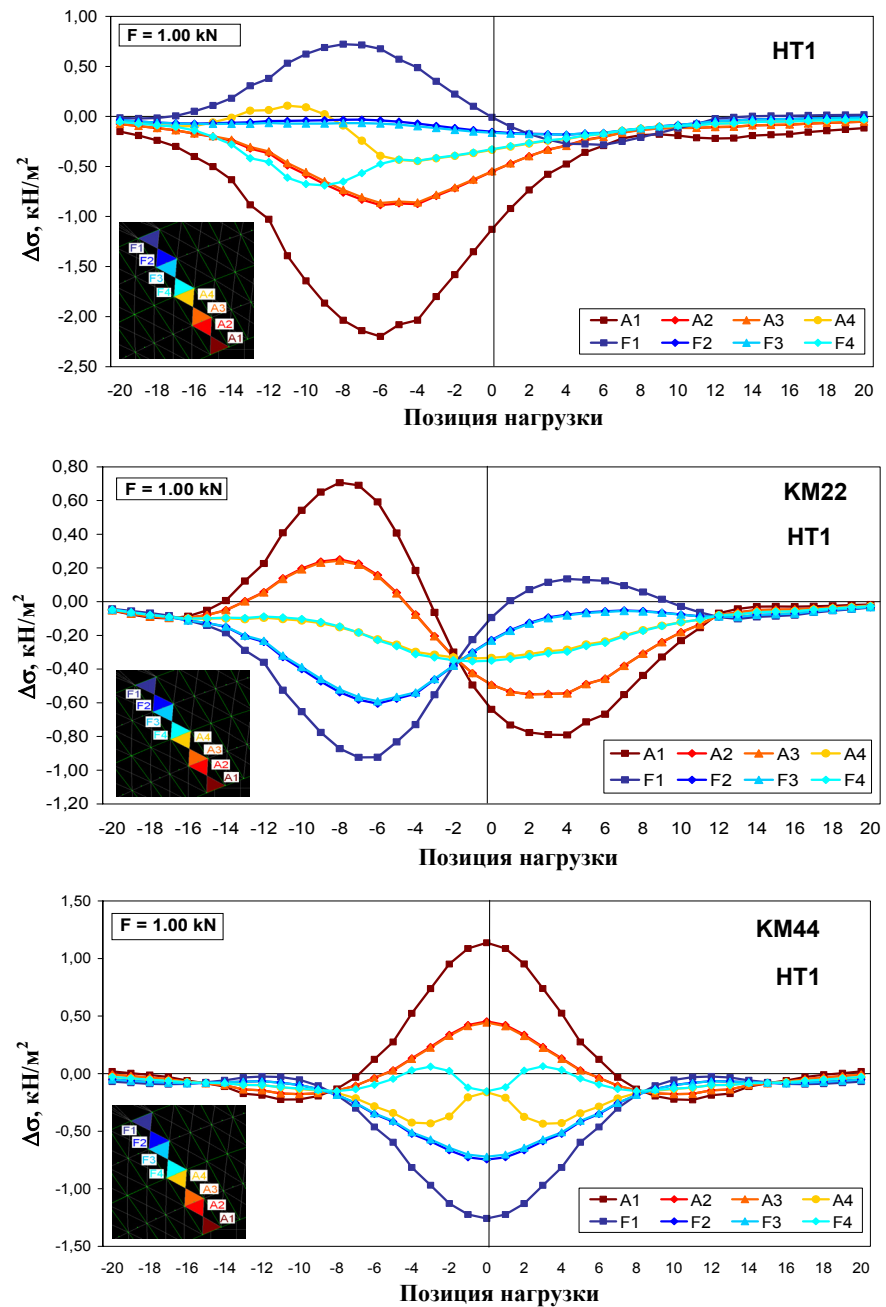


Рис. 4. Изменение эталонного напряжения  $\Delta\sigma$  в случае полезной нагрузки 1 кН при типе подстилающего слоя НТ1

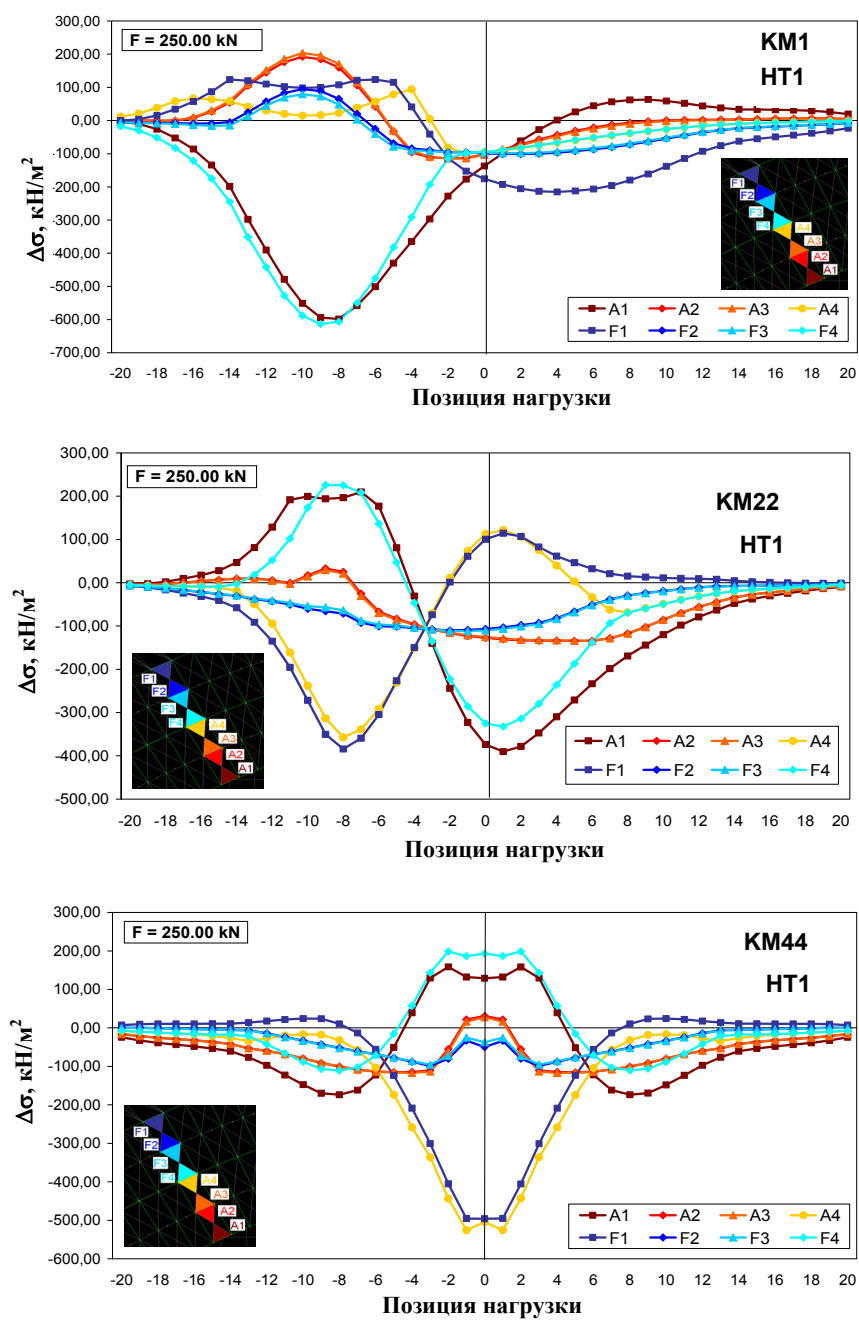


Рис. 5. Изменение эталонного напряжения  $\Delta\sigma$  в случае полезной нагрузки 250 кН при типе подстилающего слоя HT1

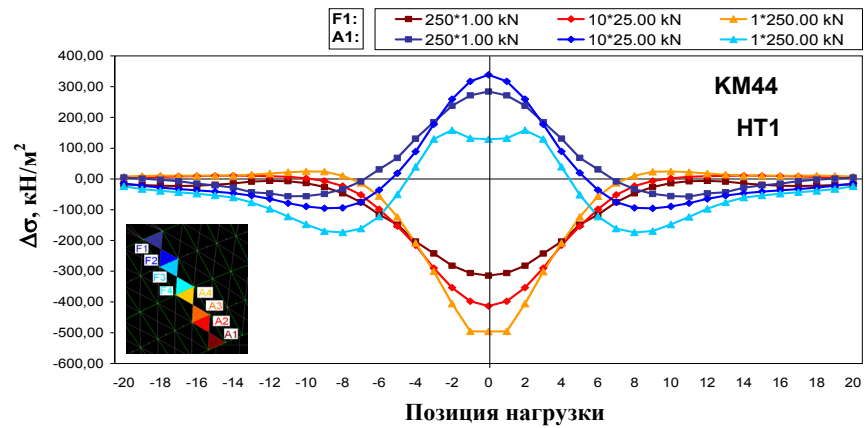


Рис. 6. Сопоставление изменения эталонного напряжения в поперечном сечении KM44 в случаях различной интенсивности нагрузок

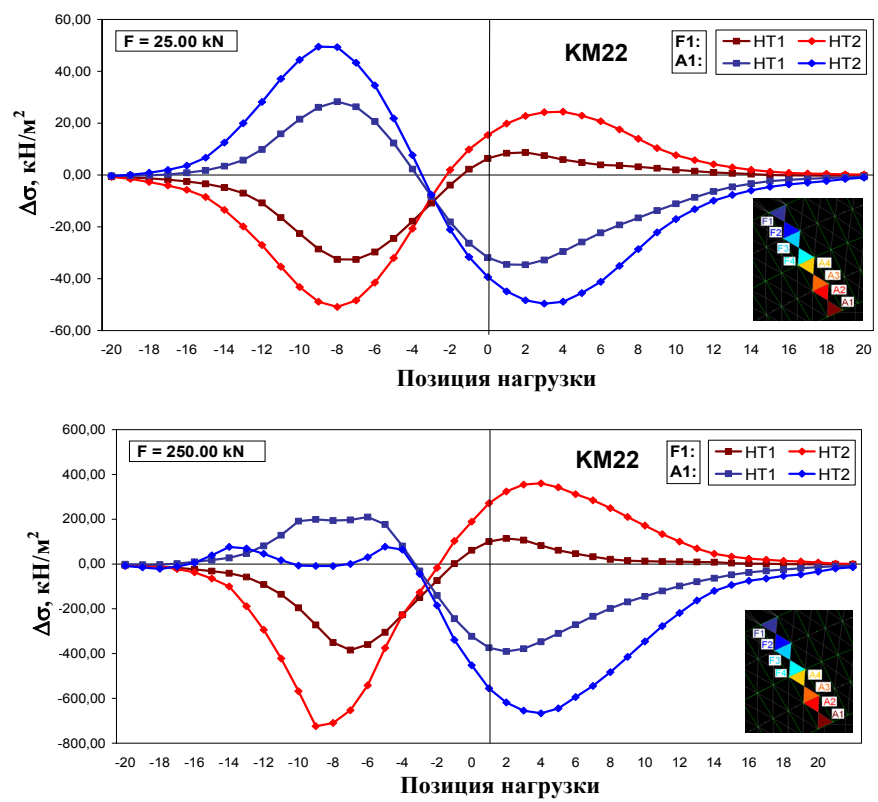


Рис. 7. Сопоставление изменения эталонного напряжения в поперечном сечении KM22 в случаях различной интенсивности нагрузок и различных типов подстилающего слоя

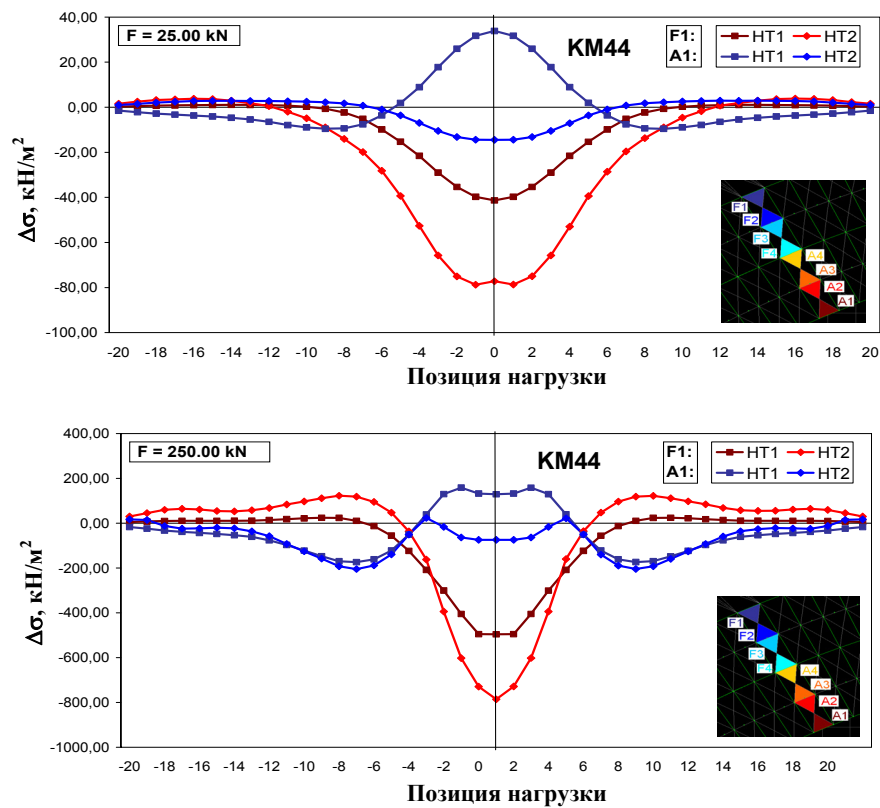


Рис. 8. Сопоставление изменения эталонного напряжения в поперечном сечении KM44 в случаях различной интенсивности нагрузок и различных типов подстилающего слоя

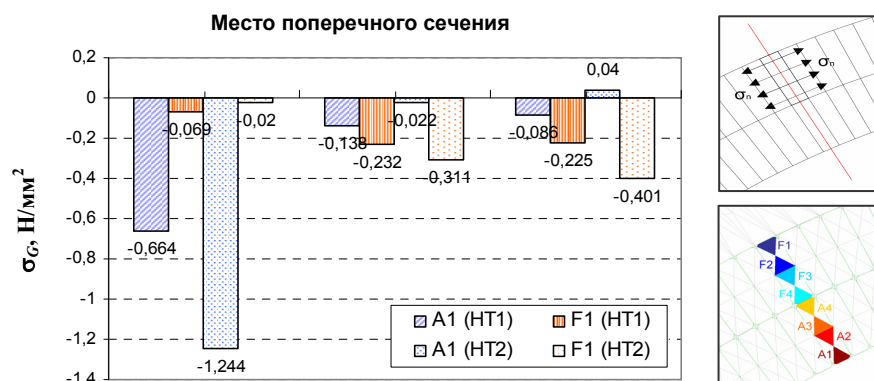


Рис. 9. Напряжение, вытекающее из собственного веса в различных типах подстилающего слоя

Таблица 6. Проверка пригодности к эксплуатации в точке поперечного сечения интрадоса (A1) в случае  $F = 250$  кН

| HT1  | $S_u$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\sigma_G$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta\sigma^{(-max)}$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta\sigma^{(+max)}$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $ S_{max} $<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta S$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta S/S_u$ | $k_{adm}$ | $k$   | $k/k_{adm}$ | $N_i$    |
|------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------|-------|-------------|----------|
| KM1  | 1,93                          | -0,664                             | -0,598                                          | 0,064                                           | 1,262                               | 0,662                              | 0,34           | 0,262     | 0,654 | <b>2,50</b> | 3,37E+04 |
| KM22 | 1,93                          | -0,138                             | -0,390                                          | 0,210                                           | 0,528                               | 0,600                              | 0,31           | 0,290     | 0,274 | 0,94        | $> 10^8$ |
| KM44 | 1,93                          | -0,086                             | -0,170                                          | 0,159                                           | 0,256                               | 0,329                              | 0,17           | 0,528     | 0,123 | 0,25        | $> 10^8$ |
| HT2  | $S_u$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\sigma_G$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta\sigma^{(-max)}$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta\sigma^{(+max)}$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $ S_{max} $<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta S$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta S/S_u$ | $k_{adm}$ | $k$   | $k/k_{adm}$ | $N_i$    |
| KM1  | 1,93                          | -1,244                             | -0,742                                          | 0,161                                           | 1,986                               | 0,903                              | 0,47           | 0,19      | 1,03  | <b>5,35</b> | 1,33E+00 |
| KM22 | 1,93                          | -0,022                             | -0,667                                          | 0,077                                           | 0,689                               | 0,744                              | 0,39           | 0,23      | 0,36  | <b>1,53</b> | 3,81E+06 |
| KM44 | 1,93                          | -0,040                             | -0,205                                          | 0,024                                           | 0,165                               | 0,229                              | 0,12           | 0,76      | 0,09  | 0,11        | $> 10^8$ |

Таблица 7. Проверка пригодности к эксплуатации в точке поперечного сечения (F1) в случае  $F = 250$  кН

| HT1  | $S_u$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\sigma_G$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta\sigma^{(-max)}$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta\sigma^{(+max)}$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $ S_{max} $<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta S$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta S/S_u$ | $k_{adm}$ | $k$  | $k/k_{adm}$ | $N_i$    |
|------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------|------|-------------|----------|
| KM1  | 1,93                          | -0,069                             | -0,215                                          | 0,124                                           | 0,284                               | 0,339                              | 0,18           | 0,51      | 0,15 | 0,29        | $> 10^8$ |
| KM22 | 1,93                          | -0,232                             | -0,384                                          | 0,114                                           | 0,616                               | 0,498                              | 0,26           | 0,35      | 0,32 | 0,92        | $> 10^8$ |
| KM44 | 1,93                          | -0,225                             | -0,496                                          | 0,114                                           | 0,721                               | 0,610                              | 0,32           | 0,28      | 0,37 | 1,31        | 1,34E+07 |
| HT2  | $S_u$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\sigma_G$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta\sigma^{(-max)}$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta\sigma^{(+max)}$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $ S_{max} $<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta S$<br>(Н/мм <sup>2</sup> ) | $\Delta S/S_u$ | $k_{adm}$ | $k$  | $k/k_{adm}$ | $N_i$    |
| KM1  | 1,93                          | -0,020                             | -0,025                                          | 0,058                                           | 0,045                               | 0,083                              | 0,04           | 2,09      | 0,02 | 0,01        | $> 10^8$ |
| KM22 | 1,93                          | -0,311                             | -0,724                                          | 0,360                                           | 1,035                               | 1,084                              | 0,56           | 0,16      | 0,54 | 3,35        | 1,06E+03 |
| KM44 | 1,93                          | -0,401                             | -0,786                                          | 0,122                                           | 1,187                               | 0,908                              | 0,47           | 0,19      | 0,62 | 3,21        | 1,74E+03 |

На рис. 10, а представлены величины параметров  $k/k_{adm}$  в зависимости от прочности на сжатие кладки в поперечном сечении KM1 и KM22 арки в условиях применения менее плотного подстилающего слоя. По данным таблицы можно установить те величины минимальной прочности на сжатие, при которых даже в условии произвольно высокого числа циклов нагружения не будет возникать усталостное разрушение. На рис. 10, б представлены различные величины повторения циклов нагружения, вызывающие усталостное разрушение в зависимости от прочности на сжатие.

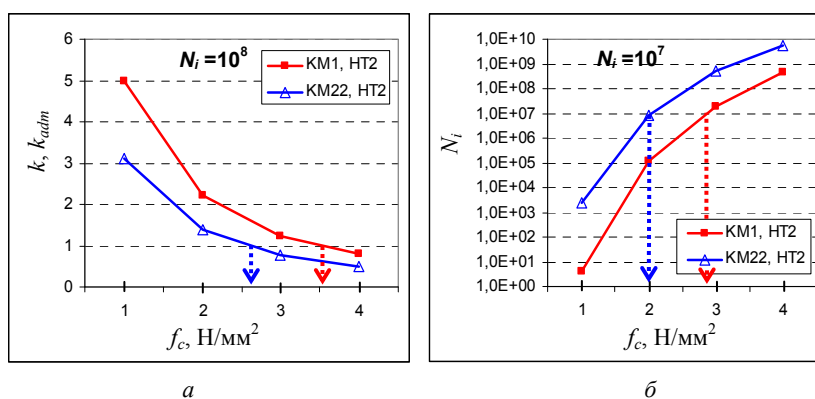


Рис. 10. Определение величины минимальной прочности:  
а – на основании коэффициента  $k/k_{adm}$ ; б – на основании количества повторных циклов  $N_i$

Таким образом, применение предложенного метода позволяет обеспечить проверку опасности усталостного разрушения в арочных мостах от напряжения сжатия, возникающего под воздействием эксплуатационных нагрузок. Для заданной переменной нагрузки также может быть установлена минимальная величина прочности на сжатие, обеспечивающая предотвращение возникновения усталостного разрушения. Для случаев арок низкой прочности количество циклов нагрузки, вызывающих усталостное разрушение, в большей степени зависит от характеристики механики грунта подстилающего слоя, находящегося за аркой.

УДК 343.9:614

С. Б. Пономарёв, доктор медицинских наук, профессор  
М. М. Горохов, доктор физико-математических наук, профессор  
Е. В. Шудегова, аспирант; А. Ф. Потапов, студент  
В. Х. Сибгатова, магистрант; Т. В. Бабайлова, магистрант  
Ижевский государственный технический университет

#### ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ПЕРЕДВИЖНОЙ УСТАНОВКИ ПО УТИЛИЗАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ОТХОДОВ

*Работа посвящена созданию программного комплекса по нахождению оптимального маршрута передвижения установки для уничтожения медицинских отходов. Рассчитано оптимальное движение и работа передвижной установки по утилизации медицинских отходов на территории Удмуртской Республики. Программный комплекс позволяет вести мониторинг уничтожения опасных медицинских отходов и получать необходимые отчеты по его результатам.*

Проблема утилизации медицинских отходов остро стоит перед всеми российскими медицинскими учреждениями. Как известно, отходы лечебных учреждений представляют большую опасность из-за содержания в них токсичных химических веществ, а также риска распространения инфекции. Медицинские отходы – это использованные перевязочные материалы, одноразовые шприцы и системы, перчатки, халаты, рентгеновские пленки, инфицированные отходы пищеблоков, зараженная кровь, кожные лоскуты, иссеченные органы, просроченные, фальсифицированные и конфискованные лекарственные препараты и т. д., которые образуются в больницах, поликлиниках, диспансерах, хосписах, медицинских НИИ и учебных заведениях, ветлечебницах, аптеках, оздоровительных и санитарно-профилактических учреждениях, лабораториях, на станциях скорой помощи и переливания крови и т. д. Сегодня во всех цивилизованных странах опасные медицинские отходы только уничтожают и делают это исключительно высокотемпературным термическим способом.

Для эффективной термической утилизации медицинских отходов могут быть использованы передвижные комплексы, которые курсируют по точкам образования таких отходов (лечебные учреждения сельских районов) и уничтожают эти отходы непосредственно на месте их образования.