



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.19

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-2-3>

Жёсткость фланцевых стыков со связями растяжения сборных обделок тоннелей



Тимофей БАРАНОВ



Дамир ЗАЙНАГАБДИНОВ

Тимофей Михайлович Баранов¹,
Дамир Альфридович Зайнагабдинов²

^{1, 2} Иркутский государственный университет
путей сообщения, Иркутск, Россия.

✉ ¹ Baranov-87@yandex.ru.

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается вопрос об определении жёсткости продольного фланцевого стыка сборных обделок тоннелей со связями растяжения. Жёсткость фланцевых стыков влияет на корректность определения расчётных усилий в тоннельных обделках. В нормах проектирования тоннелей указывается необходимость учёта жёсткости сочленений сегментов сборных тоннельных обделок при расчёте усилий в несущих конструкциях, однако вопрос об определении величины и методах учёта этих жёсткостей остаётся открытым.

Целью данной работы является исследование расчётных предпосылок и раскрытие некоторых результатов определения жёсткостей обычных болтовых соединений сегментов сборных тоннельных обделок, а также влияние этих жёсткостей на усилия в обделках тоннелей. Вопрос актуален при выполнении поверочных расчётов существующих сооружений и при проектировании новых обделок с жёсткими болтовыми стыками и другими связями растяжения.

В статье приводится аналитическое решение задачи, основанное на совместности деформаций сборных элемен-

тов, получены зависимости угла взаимного поворота жёстких сегментов обделки тоннеля от изгибающих моментов, продольных сил и геометрических размеров элементов обделки. Корректность выводов проверена проведением серии численных экспериментов, в результате которых получены уточнённые кривые зависимостей тех же параметров, а также определена пространственная работа чугунных тьюбингов на контакте.

Путём решения контактно и физически нелинейной задачи работы фланцевого стыка чугунных тьюбингов со связями растяжения определён набор в начале линейных деформаций функций зависимости угла поворота сегментов от действующих в них усилий для конкретной конфигурации элементов. Раскрыта методика применения результатов исследования для моделирования обделок тоннелей в программе GTS NX в плоской постановке. Сравнительное моделирование однотипных тестовых задач работы тоннельных обделок кольцевого сечения показало, что в различных грунтовых условиях при введении параметров жёсткости стыков в обделках наблюдается увеличение изгибающих моментов до 8 % при практически неизменных продольных силах.

Ключевые слова: транспорт, тоннели, связи растяжения, жёсткость стыков, стыковые моменты, моделирование обделок, неупругое поведение.

Для цитирования: Баранов Т. М., Зайнагабдинов Д. А. Жёсткость фланцевых стыков со связями растяжения сборных обделок тоннелей // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 2 (99). С. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-2-3>.

Полный текст статьи на английском языке, публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Особенности моделирования работы чугунных обделок со связями растяжения между тубингами предусматривают учёт расположения и величины начальных зазоров в стыках и податливости стыков. Данное обстоятельство учтено в требованиях п. 5.6.5 СП 122.13330.2012¹, касающихся расчётов конструкций по первой группе предельных состояний. Значения податливости стыков обычно определяются так называемыми стыковыми моментами, при достижении которых жёсткость стыка переходит в пластическую стадию [1–3]. Однако в научной литературе, посвящённой проектированию и расчёту тоннелей [4; 5], ясно не указывается, какой должна быть жёсткость стандартного фланцевого болтового стыка до перехода стыка в пластический шарнир и какие зависимости существуют у этой жёсткости. В то же время в современных способах расчёта тоннелей имеется масса возможностей для уточнения характера работы чугунных тубинговых и других обделок тоннелей со связями растяжения во фланцевых стыках. Тема особенно актуальна при выполнении поверочных расчётов существующих тоннельных обделок.

Значительный объём исследований влияния жёсткости стыков численными методами проведён в зарубежных работах [6; 7], в которых приведены сравнительные расчёты усилий в сборных тоннельных обделках в зависимости от полученных коэффициентов жёсткости. В качестве коэффициентов жёсткости зарубежные авторы понимают отношение деформативных свойств сочленений

¹ СП 122.13330.2012 Тоннели железнодорожные и автомобильные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97 (с Изменениями № 1, 2).

сегментов обделок с указанной жёсткостью к деформативным свойствам самих сегментов сборных обделок. В этих работах отмечается изменение усилий в сборных обделках, однако коэффициенты жёсткости рекомендуется принимать постоянными вне зависимости от усилий в элементах. Оценка жёсткости фланцевых стыков в зависимости от горного давления и сейсмического воздействия также исследована авторами [8; 9].

Целью данной работы является исследование расчётных предпосылок и раскрытие некоторых результатов определения жёсткостей обычных болтовых соединений сегментов сборных тоннельных обделок, а также влияние этих жёсткостей на усилия в обделках тоннелей. В статье использованы аналитические и экспериментальные методы, а также компьютерное моделирование.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Тюбинги, представляющие собой литые изделия из серого чугуна со «спинкой», четырьмя бортами и рёбрами жёсткости, в поперечном к оси тоннеля направлении соединяются между собой, как правило, четырьмя болтами из обычной стали диаметром 20–45 мм. Поперечное соединение двух тубингов представлено на рис. 1. В статье рассматривается узел фланцевого (поперечного) соединения, хотя в конструкции тубинговых обделок, кроме этого, предусматриваются ещё продольные соединения колец между собой – продольная перевязка. Продольная перевязка также может включаться в работу несущих конструкций, но при условии значительных деформаций обделок, превращающих несущие конструкции в трубу, лежащую на упругом основании [10; 11].

Статические расчёты обделок, заключающиеся в определении действующих в несущих

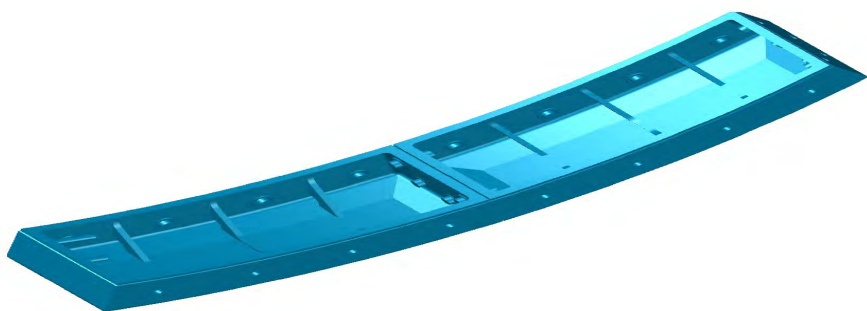


Рис. 1. 3D-модель поперечного стыка чугунных тубингов [выполнена авторами].



ших конструкциях обделок усилий, проводятся методами строительной механики и механики сплошных сред [12; 13]. Изложенные в литературе методы расчёта основаны на рассмотрении работы обделки как в упругой стадии, так и с учётом линейной жёсткости фланцевых стыков [14; 15]. В действительности соединение элементов не является ни абсолютно жёстким, ни линейно-упругим, особенно при отсутствии перевязки продольных стыков или малых продольных деформациях. В этом случае вследствие прогиба торцевых бортов и удлинения болтовых связей происходит раскрытие стыков между тубингами.

По первой группе предельных состояний предельные значения усилий N_b определяют по нормативному сопротивлению болтовой стали R_b , n с учётом коэффициента однородности k [16]:

$$N_b = A_b \cdot R_b \cdot n / k. \quad (1)$$

При раскрытии стыка с внутренней стороны у закругления торца тубинга образуется площадка смятия, через которую передаётся нормальная сила N и усилие в болтах N_b наиболее напряжённого внутреннего ряда. Высота площадки смятия:

$$x = \frac{N + N_b}{bR_p}, \quad (2)$$

где x – высота площадки смятия;

b – ширина элемента обделки;

R_p – расчётное сопротивление материала обделки.

Момент в пластическом шарнире:

$$M_{st}^+ = N \left(a_1 - \frac{x}{2} \right) + N_b \left(a_2 - \frac{x}{2} \right), \quad (3)$$

где $a_{1,2}$ – расстояние от точки взаимного поворота до ряда болтов, показанного на рис. 2.

Вследствие этого происходит перераспределение усилий в обделке с повышением её несущей способности. Предельное состояние по раскрытию стыков наступает значительно раньше, чем по прочности стыков.

Если момент в стыке $M \leq M_{st}^+ / b$, то расчёт производится в упругой стадии, а если $M > M_{st}^+ / b$ – возникает пластический шарнир.

Причём упругое поведение диктуется не жёсткостью тубинга на изгиб, а жёсткостью именно болтового соединения в стыке тубингов.

В случае действия отрицательных моментов площадка смятия образуется у чеканной канав-

ки, то есть на наиболее податливой торцевой поверхности тубинга. При определении высоты площадки смятия вводится не полная ширина, а сумма достаточно жёстких участков, через которые происходит передача усилия:

$$b_0 = 2 \cdot (b_k + \delta), \quad (4)$$

где b_k – толщина кольцевого ребра;

δ – толщина торцевого борта.

Усилие, приходящееся на один болт внутреннего ряда:

$$N_b^n = \frac{1}{m_1} \cdot \frac{M - N(a_n - r)}{(a_1 - r)^2 + (a_2 - r)^2} \cdot (a_1 - r), \quad (5)$$

где r – радиус закругления на грани элемента обделки.

Решение уравнений (1)–(5), основанных на анализе предельного состояния, приводятся в литературе по проектированию тоннелей [2; 16].

Для определения жёсткости болтового соединения рассмотрим деформационную схему стыка чугунного тубинга, представленную на рис. 2. Сумма моментов действующих в стыке сил при повороте вокруг точки O или вокруг точек, расположенных по радиусу кромки тубинга, позволяет составить уравнение равновесия сил:

$$M = N \cdot a_N + (N_1 \cdot a_1 + N_2 \cdot a_2). \quad (6)$$

При раскрытии стыка от действия сил каждый болт (пара болтов, расположенных в одном ряду) получит приращение длины δ , которое может быть связано с углом поворота α , выраженного в радианах, зависимостями:

$$\delta_{1,2} = \alpha \cdot a_{1,2}. \quad (7)$$

Закон Гука, определяющий классические зависимости относительных деформаций болтов ε с усилиями растяжения в них:

$$N_{1,2} = \varepsilon_{1,2} \cdot E_{bs} \cdot A_{b1,2} \quad (8)$$

где E_{bs} – модуль упругости болтовой стали;

$A_{b1,2}$ – суммарные площади болтов, расположенных в одном ряду.

Из определения относительной деформации и согласно рис. 2:

$$\varepsilon = \frac{\delta_{1,2}}{l_b}. \quad (9)$$

Подставляя (7)–(9) в (6) можно получить уравнение зависимости изгибающего момента в стыке и угла поворота стыка вокруг кромки тубинга:

$$M = N \cdot a_N + \frac{E_{bs}}{l_b} \alpha (A_{b1} \cdot a_1^2 + A_{b2} \cdot a_2^2). \quad (10)$$

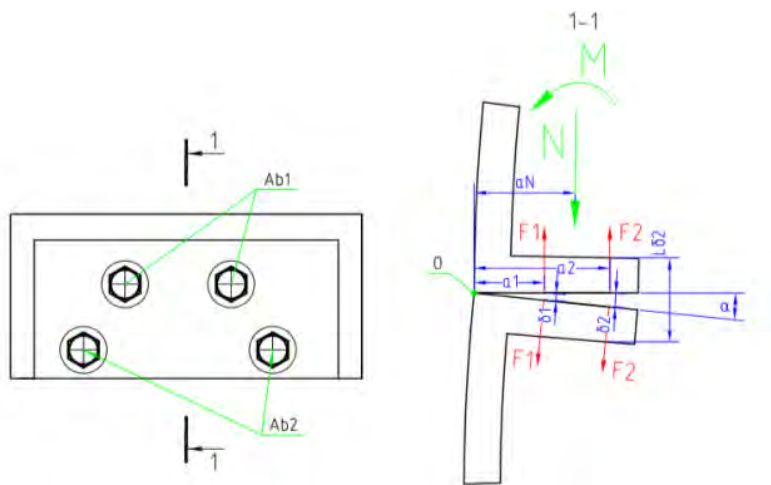


Рис. 2. Схема деформирования стыка [построена авторами].

Если площади всех четырёх болтов в стыке одинаковые и равны A_b , то уравнение (10) можно переписать в виде:

$$M = N \cdot a_N + k \cdot \alpha, \quad (11)$$

где $k = 4A_b \frac{E_{bs}}{l_b} (a_1^2 + a_2^2)$ – коэффициент линейной

жёсткости стыка.

Задавшись предельными значениями относительных деформаций, можно определить предельный угол поворота стыка. Моментом предельного состояния по углу поворота при образовании пластического шарнира будет момент, когда деформация в дальнем от точки поворота болте (ряда болтов) ε достигнет предельной ε_{lim} :

$$\alpha_{lim} = \varepsilon_{lim} \frac{l_{b2}}{a_2}, \quad (12)$$

а сам угол поворота будет линейно зависеть от действующих в стыке усилий и геометрии соединения, пока в одном из ряда болтов их материал не перейдёт в пластическую стадию:

$$\alpha = \frac{M - Na_N}{k}. \quad (13)$$

Линейная зависимость (11) сохраняется до тех пор, пока изгибающий момент не достигнет момента перехода в начальную пластическую стадию $M \rightarrow M'$, при этом угол поворота $\alpha \rightarrow \alpha'$. В уравнении (10) относительная деформация наиболее удалённого от точки поворота болта ε_1 переходит в пластическую зону текучести $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_T$. При этом принято допущение, что материал болтов работает как упругопластический материал по типу билинейной диаграммы Прандтля. Момент перехода определится как:

$$M' = N \cdot a_N + \frac{E_{bs}}{a_2} \cdot \varepsilon_T (A_{b1} \cdot a_1^2 + A_{b2} \cdot a_2^2), \quad (14)$$

а угол при этом будет равен:

$$\alpha' = \frac{l_b}{a_2} \varepsilon_T. \quad (15)$$

При дальнейшем увеличении момента $M > M'$ напряжение в болтах дальнего ряда не меняется, а общая жёсткость болтового соединения падает:

$$M = N \cdot a_N + \alpha \cdot k' + m_{yield} \quad (16)$$

где $k' = \frac{E_{bs}}{l_b} \cdot A_{b1} \cdot a_1^2$ – коэффициент неупругой

жёсткости стыка;

$m_{yield} = \varepsilon_T \cdot E_{bs} \cdot A_{b2} \cdot a_2$ – остаточный момент.

На рис. 3 приведён график, показывающий зависимость угла поворота стыка от величины изгибающего момента с учётом уравнений (10), (14) и (16). Если допустить разгрузку стыка с момента $M' > M \geq M_{st}$, то в стыке может наблюдаться остаточный угол поворота α_{res} , определяемый остаточным моментом и жёсткостью болтов первого ближайшего к точке поворота ряда:

$$\alpha_{res} = - \frac{m_{yield}}{\frac{E_{bs}}{l_b} \cdot A_{b1} \cdot a_1^2}. \quad (17)$$

Таким образом, для корректного моделирования жёсткости стыкового соединения со связями растяжения в сборных обделках тоннелей получены аналитические зависимости жёсткости стыков и величины действующих в стыке усилий. Общая жёсткость обделки формируется не столько изгибной жёсткостью чугунного тюбинга или железобетонного блока, сколько гораздо менее жёсткими



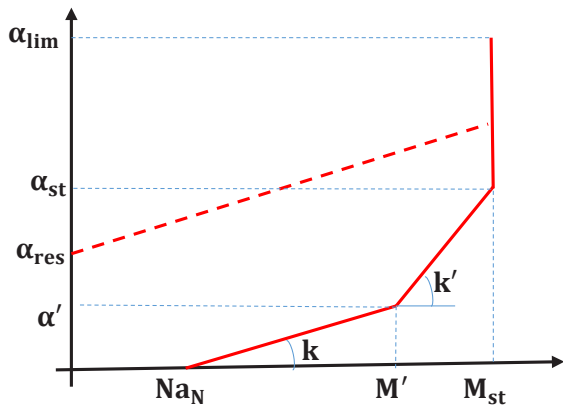


Рис. 3. График зависимости угла поворота стыка от момента [построен авторами].

Таблица 1
Материалы модели стыка [составлена авторами по данным СП.16.13330.2017*]

Элемент	Материал	Модель материала	Параметры модели
Тюбинги	Серый чугун СЧ-20-40	Мизеса	$E = 100 \text{ ГПа}$ $\nu = 0,1$ $\sigma_{\text{yield}} = 200 \text{ МПа}$
Болты	Ст3	Мизеса	$E = 206 \text{ ГПа}$ $\nu = 0,2$ $\sigma_{\text{yield}} = 245 \text{ МПа}$ $A_b = 13,85 \text{ см}^2$

* СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с изменениями № 1, 2, 3).

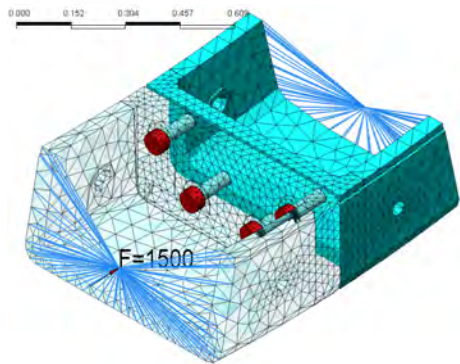


Рис. 4. Общий вид модели стыка тюбингов [модель реализована авторами].

стыками, по сравнению с которыми изгибом элемента обделки можно пренебречь.

Данные зависимости в виде функций $\alpha(N, M)$ можно использовать в расчётных программах конечно-элементного анализа напрямую либо с учётом уточнённой методики. Рассмотрим пример данной задачи, решённой методом конечных элементов с учётом физической нелинейности материалов и контактной нелинейности.

В программе midas FEA смоделирован стык двух чугунных тюбингов с болтовым

соединением, показанный на рис. 4. В табл. 1 приведены характеристики материалов в модели. Контактная задача сформирована стандартным методом *surface-to-surface contact* с коэффициентом статического трения, равным 0,4.

Нагрузки модели приняты положительными и отрицательными постепенно возрастающими моментами с различными продольными сжимающими силами от 0 до 3000 кН с шагом 500 кН. Силы приложены к торцам расчётной области модели равномерно по всей площади поверхности посредством соединения узлов жёсткой вставкой.

Результаты моделирования показывают зависимости угла поворота двух тюбингов относительно друг друга, напряжений в болтах, изменение площадки контакта тюбингов от действующих на тюбинг моментов.

При действии положительных моментов, раскрывающих зазор между тюбингами внутри тоннеля, пластический шарнир образуется при достижении расчётного сопротивления болтов в обоих рядах. На рис. 5а показано изменение напряжений в болтах каждого ряда и рост угла взаимного поворота

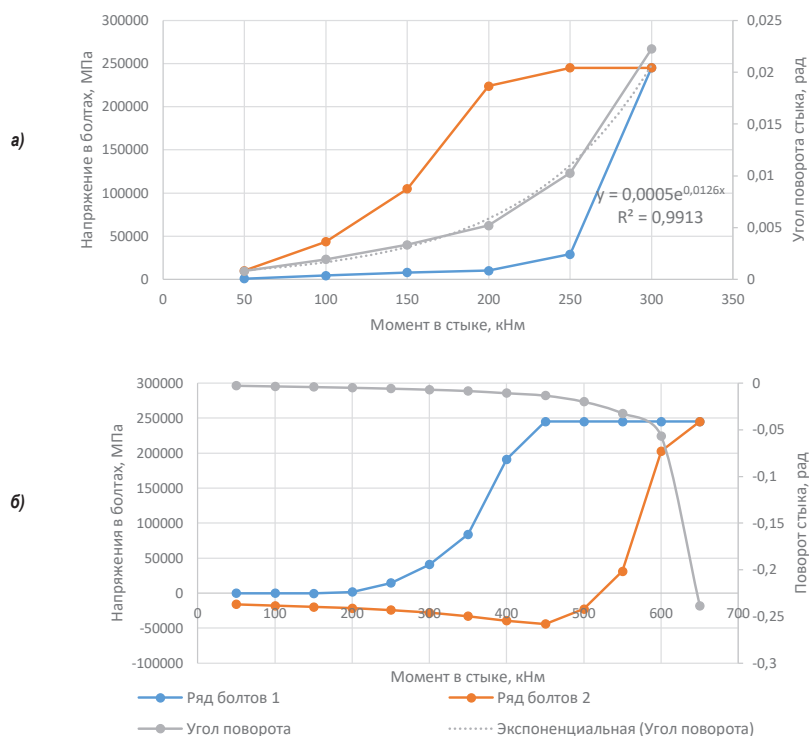


Рис. 5. Деформируемость стыка (а – при отсутствии продольного усилия; б – при наличии сжимающего продольного усилия) [диаграммы построены авторами].

тубингов. В качестве примера приведены графики при нулевом продольном усилии. По достижении момента 200 кНм стык деформируется линейно, затем сначала в дальнем ряду, а затем в ближнем к точке поворота ряду материал болтов переходит в пластическую стадию, и рост угла поворота увеличивается согласно выраженному экспоненциальному закону.

При наличии продольных сил значение стыкового момента M_{st} увеличивается, а распределение напряжений в болтах меняется. На рис. 5б показаны графики угла поворота и напряжений в болтах при действии отрицательных моментов, раскрывающих стык со стороны горной породы. Значительная часть графика до момента, когда в дальнем ряду болтов начинается происходить пластическая деформация, также линейная.

Численное моделирование стыков даёт схожий результат с аналитическими решениями, представленными на рис. 3. Наблюдаются некоторые отличия в «пологости» поведения, которое обусловлено допущением о единой и жёстко определённой точке взаимного поворота тубингов. Численное решение показывает, что при наличии продольной сжимающей силы пятно контакта тубингов

распределяется неравномерно. Пространственная жёсткость такова, что участок между продольными рёбрами тубингов при осевом сжатии не соприкасается, а контакт тяготеет к рёбрам и спинке элементов, как показано на рис. 6. При росте изгибающих моментов пятно контакта мигрирует к спинке в сторону точки O на схеме рис. 2, а передаваемая через контакт сила растёт. Аналогичная картина наблюдается при приложении отрицательных моментов, где пятно контакта расположено по продольным рёбрам тубингов.

Зависимость жёсткости стыка от продольной силы и момента по результатам численного эксперимента представлена на рис. 7. В пределах линейных деформаций болтов отличия в жёсткости незначительные, то есть жёсткость стыков практически не зависит от величины продольного усилия. Продольные силы влияют на величину стыковых моментов, а также на жёсткость стыков при значительных изгибающих моментах, приближающихся к стыковым.

Рассмотрим линейные части жёсткостей, так как основные усилия в обделках тоннелей приходятся на упругие деформации конструкций. В диапазоне моментов 200–400 кНм представляется возможным определить ли-



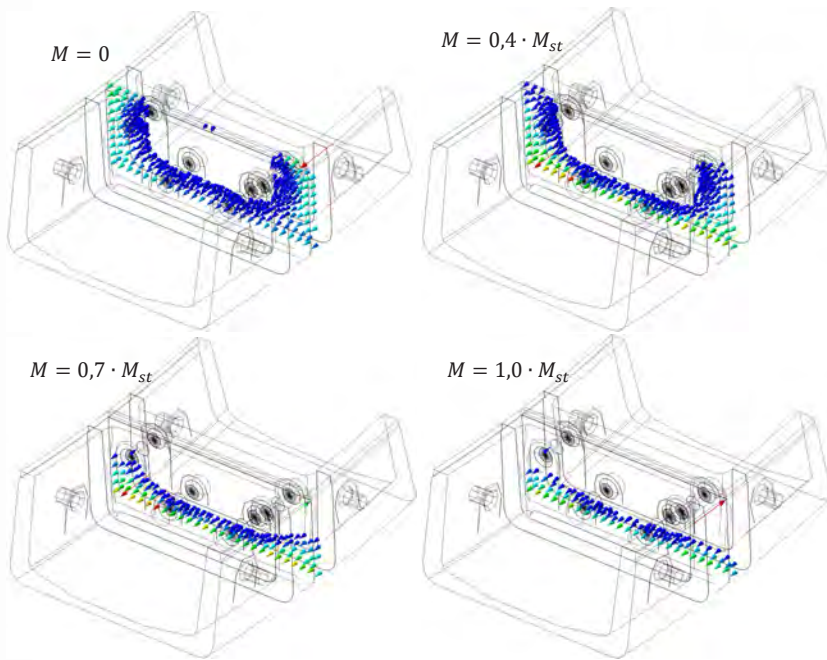


Рис. 6. Миграция пятна контакта в стыке при росте момента [модель разработана авторами].

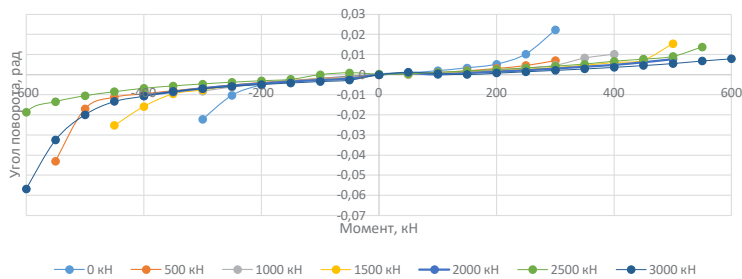


Рис. 7. Жёсткость стыка при различных продольных силах [графики построены авторами].

нейные функции углов поворота $\alpha(N, M)$, как:
 $\alpha(N) = a \cdot M + b$, (18)
 где a и b – коэффициенты аппроксимации, приведённые в табл. 2.

Параметр a , который имеет физический смысл линейной жёсткости из уравнения (11), от роста силы меняется в пределах -25 % ... +6 %. При расчётах обделок тоннелей совсем отсутствующие продольные силы встречаются достаточно редко, поэтому начиная с силы в 500 кН диапазон вариации составляет -10 % ... +6 %, что находится в пределах инженерной погрешности расчётов несущих конструкций тоннелей.

Из данного исследования можно сделать следующие выводы:

1) жёсткость болтовых продольных стыков со связями растяжения незначительно зависит от величины продольной силы в стыке;

2) в определённых пределах жёсткость не меняется, а угол поворота элементов обделки друг относительно друга изменяется линейно в зависимости от величины момента в районе стыка;

3) при появлении пластических деформаций в болтах жёсткость стыка падает, причём продолжает уменьшаться при возрастании момента;

4) величина стыкового момента определяется появлением в болтах пластических деформаций, а предельная величина угла поворота элементов обделки определяется предельной деформацией наиболее удалённого от места поворота болтов соединения.

Проведём тестовые расчёты тоннельной обделки, состоящей из чугунных тубингов, с применением полученных зависимостей. Целью расчётов является определение изме-

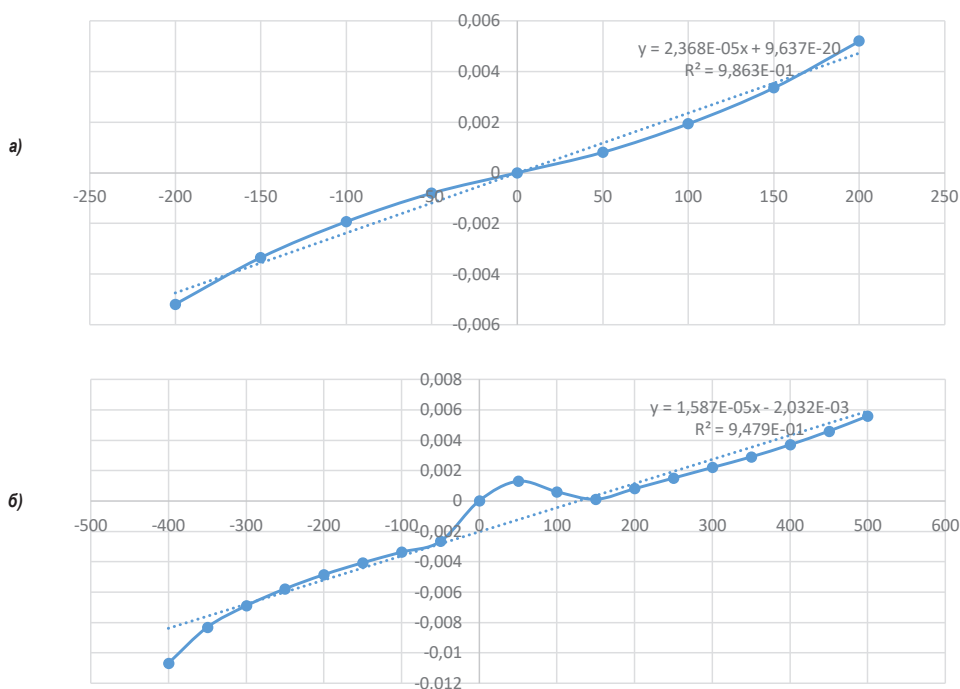


Рис. 8. Линейные аппроксимации жёсткости (а – при отсутствии продольной силы; б – при сжимающей силе в 3000 кН)
[графики построены авторами].

Таблица 2

Параметры линейной аппроксимации жёсткости по формуле (17)
[таблица составлена авторами]

Продольная сжимающая сила N	$a \cdot 10^{-5}$	$b \cdot 10^{-4}$	Коэффициент детерминации R^2
0	2,368	0	0,986
500	1,781	3,291	0,99
1000	1,892	10	0,963
1500	1,804	4,832	0,965
2000	1,629	14,55	0,968
2500	1,654	18	0,963
3000	1,587	20,32	0,948

нения внутренних усилий в обделках без учёта жёсткости стыков элементов обделки и с учётом этих жёсткостей. Расчёт выполняется в плоской постановке в программе конечно-элементного моделирования геотехнических сооружений GTS NX. Обделка выполнена из чугунных тубингов внутренним диаметром 7,78 м, расположение стыков тубингов показано на рис. 9.

Грунты, окружающие обделку, смоделированы с использованием упругопластической модели с изотропным упрочнением Hardening Soil (HS), реализованной в про-

грамме GTS NX. Модель точно описывает поведение грунта при экскавации грунта, при устройстве подпорных стен и проходке тоннелей, сопровождающейся уменьшением среднего эффективного напряжения и одновременно мобилизацией сопротивления пород сдвигу [17; 18].

В качестве примера для тестовой задачи примем физико-механические свойства грунтов трёх типов, приведённые в табл. 3. Расчётная область модели имеет размеры 100 x 100 м. В центре находится подкрепляющее грунтовый массив кольцо, обладающее жёст-



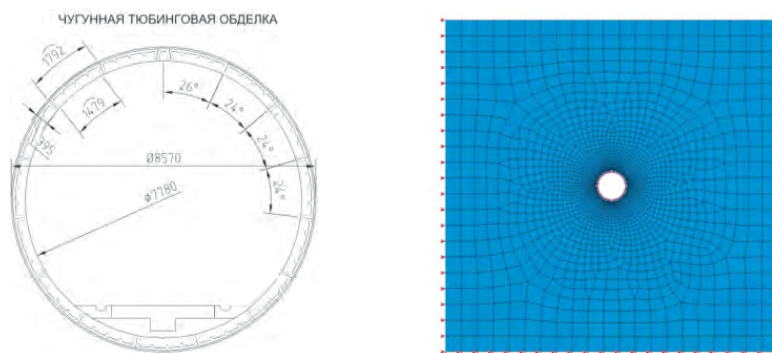


Рис. 9. Конструкция обделки железнодорожного тоннеля и КЭ-модель [схема и изображение подготовлены авторами].

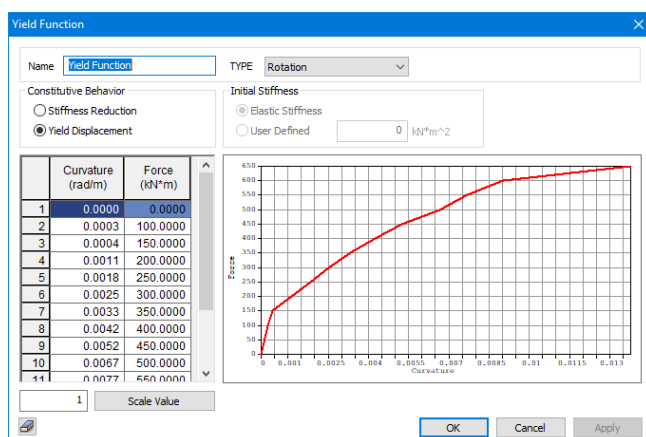


Рис. 10. Свойства неупругого шарнира [скриншот окна программы GTS NX при работе на основе модели авторов].

костью кольца из чугунных тюбингов шириной 0,75 м. Расчёт выполняется в две стадии:

1) начальная стадия для определения бытового давления и исходных перемещений грунтового массива;

2) вторая стадия, на которой происходит экскавация грунта и моментальное подкрепление отверстия обделкой. Интерфейсные элементы контакта грунт-обделка не применялись.

Вид конечно-элементной модели представлен на рис. 9. Внедрение жёсткости стыков осуществляется путём назначения шарнира на узел конечного элемента обделки, обладающего свойствами деформируемости, как показано на рис. 7 или по линейному уравнению (18). Жёсткость стыка моделируется свойством Beam-Lumped («Балка-сосредоточенный шарнир»). Неупругое поведение описывается скелетными кривыми, которые являются эмпирическими гистерезисными моделями. Продольная жёсткость представлена пружиной в центре элемента, а изгибные

жёсткости представлены пружинами на концах элементов и описаны зависимостями усилий от перемещений.

В расчётах возможно применение следующих типов зависимостей или типов гистерезисных моделей:

– Origin-oriented (исходно-ориентированная): точки реакции при начальном нагружении и при разгрузке движутся вдоль трёхлинейной скелетной кривой. Данная модель используется в тестовых расчётах.

– Возможно при дальнейших исследованиях применение иных моделей: Resk-oriented, Kinematic, Takeda и иных.

Согласно руководству по работе с программой^{2, 3}, свойства неупругого поведения задаются в функции *Yield Function* в виде

² Benchmarks & Verifications Manuals. Chapter 3. Material Nonlinearity / MIDAS IT Co., Ltd. [Электронный ресурс]: <https://globalsupport.midasuser.com/helpdesk/File/Get/3848666>. Доступ 28.02.2022.

³ GTS NX On-line Manual. Справка при работе с программой.

Таблица 3

Физико-механические характеристики грунтов при использовании модели HS
[таблица составлена авторами по данным работы [18]]

Вид грунтов	Объёмный вес грунта	Секунций модуль упругости при 50%-ном значении ($\sigma_1 - \sigma_3$) из трёхосных испытаний	Тангенциальный модуль упругости из компрессионных испытаний	Модуль упругости при разгрузке – повторном нагружении из компрессионных испытаний	Коэффициент Пуассона при разгрузке – повторном нагружении	Параметр нелинейности компрессионной кривой	Коэффициент бокового давления грунта	Эффективное сцепление из трёхосных испытаний	Эффективный угол внутреннего трения из трёхосных испытаний
Обозначения	γ	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	ν_{ur}	m	K_0	c'	φ'
Ед. изм.	кН/м ³	МПа			–	–	–	кПа	град.
Условия № 1. Супеси пылеватые	21,4	12	10,5	36	0,35	0,5	0,642	20	21
Условия № 2. Песок	15,2	26	19	110	0,3	0,8	0,426	1,0	35
Условия № 3. Плотные глины	22,5	305	191	610	0,2	0,65	0,609	125	23

положительной ветви зависимостей угла поворота *Curvature* (rad/m) от момента *Force* (кН•м) (рис. 10). Поведение при отрицательном моменте вычисляется автоматически. В процессе тестирования работы функции в версии GTS NX 2019 v1.2 на простых моделях выяснено, что при назначении свойств неупругого шарнира в плоской задаче желательно в поле компонентов *Hinge location* указывать направление степени свободы шарнира R_z и компоненты I&J.

Результаты сравнительного моделирования представлены в виде перемещений обделки тоннеля, продольных сил и изгибаю-

щих моментов в ней, как показано на рис. 11 для грунтовых условий № 1 (супеси пылеватые). В моделях с учётом жёсткости стыков введены свойства неупругого поведения в местах расположения стыков тюбингов, модели без учёта жёсткости полностью идентичны первым без введения неупругого поведения стыков.

Сравнительное моделирование показало, что при различных грунтовых условиях учёт жёсткости стыков слабо влияет на общие перемещения обделок и продольные силы в них. Основное влияние наблюдается в величине изгибающих моментов, где наличие

Таблица 4

Результаты сравнительных тестовых расчётов [таблица составлена авторами]

Результаты		Перемещения, мм		Продольные силы, кН		Моменты, кНм	
Грунтовые условия	Жёсткость стыков	В своде	В стенке	В своде	В стенке	В своде	В стенке
Усл. № 1	Учёт	77,27	51,05	-2216,4	-3279,6	-507,2	+460,1
	Без учёта	76,98	51,09	-2217,0	-3279,8	-496,1	+447,4
	Разница	0,4 %	-0,1 %	0,0 %	0,0 %	2,2 %	2,8 %
Усл. № 2	Учёт	16,07	10,8	-1208,6	-2142,2	-155,2	+142,3
	Без учёта	16,29	10,85	-1211,5	-2139,8	-144,9	+132,4
	Разница	-1,4 %	-0,5 %	-0,2 %	0,1 %	6,6 %	7,0 %
Усл. № 3	Учёт	33,40	24,47	-1670,0	-3092,1	-106,9	+105,1
	Без учёта	33,45	24,48	-1670,1	-3091,1	-98,3	+96,3
	Разница	-0,1 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	8,0 %	8,4 %

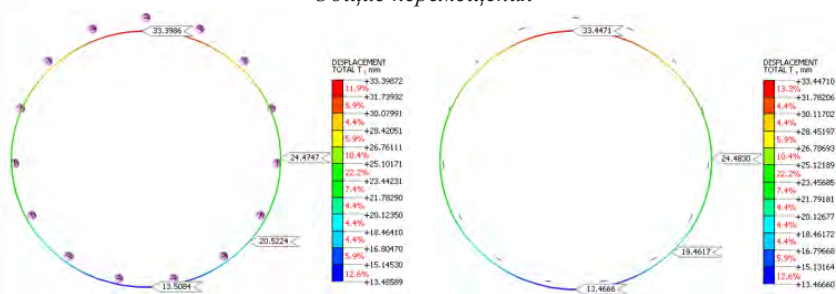




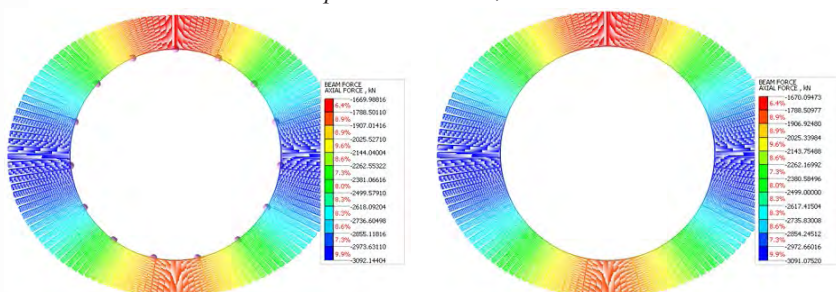
При учёте жёсткости стыков

При отсутствии учёта жёсткости
стыков

Общие перемещения



Продольные силы, кН



Моменты, кНм

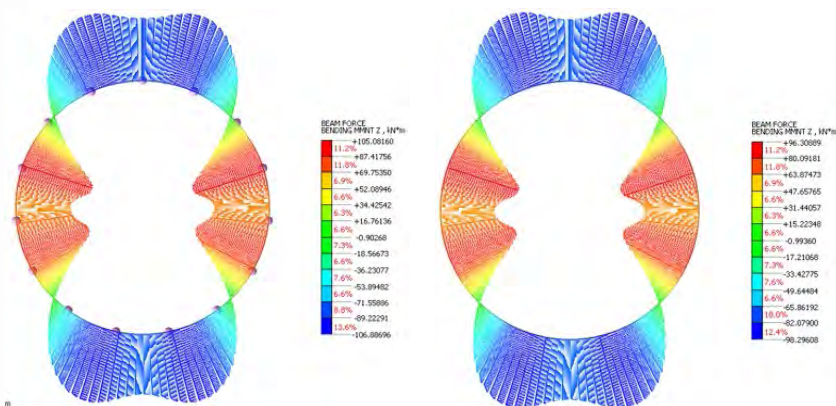


Рис. 11. Результаты сравнительных расчётов при грунтовых условиях № 1 [результаты моделирования авторами].

неупругих элементов с поведением стыка со связями растяжения увеличивает изгибающие моменты на 2,2–8,4 %. Более выраженное влияние наблюдается при меньшей величине моментов в плотных глинах.

ВЫВОДЫ

Современные способы расчётов сборных тоннельных обделок, конструктивно имеющих связи растяжения в стыках, позволяют учитывать изгибную жёсткость поперечных стыков при определении усилий. Аналитически выведены уравнения жёсткости данного

соединения в зависимости от величины изгибающего момента, продольной силы, расположения и марки стали болтов и геометрии стыка. Полученная трёхлинейная функция описывает зависимость угла взаимного поворота элементов обделки от величины действующих усилий и показывает три основных этапа снижения жёсткости. Первый этап заключается в линейном поведении всех элементов и начальной жёсткости стыка. Второй этап наступает при достижении предела текучести материала дальнего от центра поворота ряда болтов, характеризуется снижением

жёсткости и остаточным углом поворота при разгрузке. Третий этап – возникновение пластического шарнира.

Данные рассуждения были проверены при моделировании стыка двух чугунных тюбингов. Характер полученных зависимостей совпадает с аналитическим решением. Дополнительно получены линейные уравнения жёсткости на начальных стадиях нагружения стыков, где показано, что влияние продольной силы на жёсткость достаточно слабое ввиду пространственного пятна контакта тюбингов. Графики неупругого поведения по результатам конечно-элементного моделирования введены в виде функций для тестовых расчётов обделок тоннелей.

Сравнительные расчёты обделок с учётом и без учёта жёсткости стыков при прочих равных условиях показали, что наличие учёта жёсткости стыков ведёт к повышению изгибающих моментов в обделках до 8,4 % при определенных грунтовых условиях. В то же время разные грунтовые условия сказываются на усилиях по-разному, в более плотных грунтах влияние наличия стыков при расчётах увеличивается.

Таким образом, предложенный подход позволяет получать более точную картину оценки напряжённо-деформированного состояния сборных тоннельных обделок со связями растяжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений: Учебник для вузов. – Изд. 2. – М.: Недра, 1994. – 384 с.
2. Храпов В. Г., Демешко Е. А., Наумов С. Н. и др. Тоннели и метрополитены / Под ред. В. Г. Храпова. – М.: Транспорт, 1989. – 383 с.
3. Guan, Zhenchang; Deng, Tao; Wang, Gang; Jiang, Yujing. Studies on the key parameters in segmental lining design. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, Vol. 7, pp. 674–683. DOI: 10.1016/J.JRMGE.2015.08.008.
4. Маковский Л. В., Поляков Д. В. Моделирование статической работы круговых тоннельных обделок с податливыми стыками во взаимодействии с грунтовым массивом // *Транспортное строительство*. – 2015. – № 11. – С. 25–27. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25048451>. Доступ 21.03.2022.

5. Шейн Аунг Тун. Моделирование тоннельных обделок // *Мир транспорта*. – 2012. – № 4. – С. 60–65. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/703>. Доступ 21.03.2022.

6. Ranjbar, G., Shahriar, K., Ahangari, K. Effect of segmental joint stiffness on tunnel lining internal forces under static conditions. *Journal of Mining and Environment*, 2019, Vol. 10, No. 4, pp. 1031–1043. DOI: 10.22044/JME.2019.8581.1738.

7. Ranjbar, G., Shahriar, K., Ahangari K. Effect of Segmental Joint on Internal Forces in Tunnel Lining under Seismic Loading by Numerical Method. *Journal of Mining and Environment*, 2020, Vol. 11, No. 3, pp. 737–751. DOI: 10.22044/JME.2020.8979.1785.

8. Mitkees, H. A., Sorour, T. M., Abdel-Motaal, M. A. Seismic Response of Segmented Tunnel Liner. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2020, Vol. 11, Iss. 7, pp. 1237–1245. [Электронный ресурс]: <https://www.ijser.org/researchpaper/Seismic-Response-of-Segmented-Tunnel-Liner.pdf>. Доступ 21.03.2022.

9. Hefny, A., Chua, H. An investigation into the behaviour of jointed tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, Vol. 21, Iss. 3–4, pp. 428–434. DOI: 10.1016/J.TUST.2005.12.070.

10. Чеботаев В. В., Кубышкин А. А. Расчётное моделирование статической работы сборных железобетонных обделок с перевязкой швов // *Исследования конструкций и материалов для метро- и тоннелестроения: Сб. научных тр.* – М.: ЦНИИС, 2002. – Вып. 207. – С. 15–27.

11. Зайнагабдинов Д. А., Май Дык Минь. Модели для расчёта тоннелей, пересекающих активные разломы // *Наукоедение: интернет-журнал*, 2013. – № 3. [Электронный ресурс]: <http://naukovedenie.ru/PDF/25tvn313.pdf>. Доступ 21.03.2022.

12. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. / Под ред. Б. Е. Победри. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

13. Сонин А. Н. Исследование статической работы обделок коллекторных тоннелей // *Сб. науч. тр. Исследования тоннельных конструкций и способов их сооружения*. – Вып. 560. – М.: МИИТ, 1977. – С. 43–46.

14. Орлов С. А. Методы статического расчёта сборных железобетонных обделок тоннелей. – М.: Госстройиздат, 1961. – 136 с.

15. Podjadtke, R., Weidig, G. Adjustable flexible segment lining. *Tunnel*, 2010, No. 7, pp. 37–42.

16. Волков В. П., Наумов С. Н., Пирожкова А. Н., Храпов В. Г. Тоннели и метрополитены. – Изд. 2, перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1975. – 552 с.

17. Schanz, T., Vermeer, P. A., Bonnier, P. G. The Hardening-Soil Model: Formulation and verification. In: *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Ed. by Ronald B. J. Brinkgreve. Routledge, 1999, 328 p., pp. 281–290. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315138206>. eBook ISBN 9781315138206. ISBN 9789058090409.

18. Строкова Л. А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 69–74. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11643120>. Доступ 21.03.2022. ●

Информация об авторах:

Баранов Тимофей Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и транспортных тоннелей Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия, Baranov-87@yandex.ru.

Зайнагабдинов Дамир Альфридович – кандидат технических наук, доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и транспортных тоннелей Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия, damiimt@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 28.02.2022, одобрена после рецензирования 18.04.2022, принята к публикации 25.04.2022.

