ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(10):160-171

УДК 624.195 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-160-171

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛКИ ДВУХПУТНОГО ТОННЕЛЯ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ РАЗМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА

М.С. Плешко[1], М.В. Плешко[1], И.В. Войнов[2], А.В. Костюхов[2]

[1] НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: mixail-stepan@mail.ru
[2] Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация: Приведены результаты определения напряженно-деформированного состояния обделки двухпутного тоннеля на различных стадиях размораживания грунтового массива на примере участка двухпутного перегонного тоннеля. При проведении исследования определены характеристики замороженных грунтов, выбрана модель грунта, построена расчетная модель, выполнены расчеты и установлены основные закономерности изменения напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки. Установлено, что после возведения обделки в замороженном грунтовом массиве, нагнетания раствора за обделку и набора прочности, обделка вступает в работу и начинает воспринимать нагрузки от горного, а также гидростатического давления, передаваемого на внешних границах замороженного грунтового массива. В процессе размораживания после частичного оттаивания грунта вокруг обделки происходит дополнительное обжатие обделки с одновременным ухудшением сцепления на контакте обделка-грунт. Это приводит к увеличению напряжений на внутреннем слое и к уменьшению напряжений на внешнем слое обделки. После полного оттаивания грунтового массива на обделку передается полное гидростатическое давление. В то же время проявляется взвешивающее действие грунтовых вод, что уменьшает величины нагрузок от горного давления. Из-за этого происходит незначительное уменьшение максимальных напряжений в обделке на внутреннем контуре. В целом на всех этапах размораживания опасных напряжений в обделке не возникло. К наиболее неблагоприятному расчетному случаю при этом можно отнеси взаимодействие обделки с неравномерно оттаявшим грунтовым массивом. В обделке возникает асимметрия напряжений и смещение пиковых значений сжимающих и растягивающих напряжений относительно центральных осей сечения тоннеля.

Ключевые слова: тоннель, обделка, математическая модель, искусственное замораживание, напряжения.

Для цитирования: *Плешко М.С., Плешко М.В., Войнов И.В., Костюхов А.В.* Анализ напряженно-деформированного состояния обделки двухпутного тоннеля на различных стадиях размораживания грунтового массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 160–171. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-160-171.

Stress state analysis of two-way tunnel lining at different stages of soil defrostation

M.S. Pleshko[1], M.V. Pleshko[1], I.V. Voynov[2], A.V. Kostyukhov[2]

[1] National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: mixail-stepan@mail.ru
[2] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

© М.С. Плешко, М.В. Плешко, И.В. Войнов, А.В. Костюхов 2019.

Abstract: The data on stress state of two-way tunnel lining at different stages of soil mass defrostation are presented in terms of a section in a two-way running tunnel. The research activities included determination of frozen soil characteristics, selection of soil mass model, construction of calculation model, calculations and finding of major variation patterns in the stress state of tunnel lining. It is found that after lining construction, injection of mortar in the gap behind the lining and development of strength, the lining takes over loads of rock pressure and hydrostatic pressure transferred from external boundaries of frozen soil. During defrosting, after partial thawing of soil, extra compression of the lining takes place with the simultaneous degradation of the lining–soil cohesion. This results in the increase in the stresses on the inner layer of the lining, on the one hand, and in the decrease in the stresses on the outer layer of the lining, on the other hand. After complete thawing of soil mass, the lining takes over total hydrostatic pressure. At the same time, the ascending force of groundwater manifests itself, which reduces the load due to rock pressure. As a consequence, the maximum stresses at the lining outback reduce slightly. On the whole, no hazardous stresses arose in the lining at any stage of defrostation. The worst estimated scenario is interaction of the lining with nonuniformly thawed soil. In this case, the lining experiences asymmetry of stresses and shift of peak compressive and tensile stresses off the central axes of the tunnel.

Key words: tunnel, lining, mathematical model, artificial freezing, stresses.

For citation: Pleshko M. S., Pleshko M. V., Voynov I. V., Kostyukhov A. V. Stress state analysis of two-way tunnel lining at different stages of soil defrostation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(10):160-171. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-160-171.

Постановка задачи исследования. Исходные данные

В статье приведены результаты анализа напряженно-деформированного состояния обделки двухпутного тоннеля на различных стадиях размораживания грунтового массива на примере участка перегонного тоннеля «Кожуховская линия ст. «Авиамоторная» — ст. «Некрасовка». Целью исследования является выявление возможных опасных концентраций напряжений в обделке и чрезмерных деформаций массива и обделки при поэтапном размораживании грунтового массива.

Задачи исследования:

- определение характеристик замороженных грунтов;
- выбор расчетной модели грунта;
- построение расчетной модели;
- расчет модели на основных этапах размораживания грунтов;
- анализ результатов расчета, установление основных закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния «обделка — грунтовый массив» на различных этапах жизненного цикла исследуемой системы.

Исследуемый объект находится в Юго-Восточном округе Москвы в районе Рязанского проспекта. Работы по замораживанию грунтов производились для создания безопасных условий при замене режущих инструментов щитового проходческого комплекса с внешним диаметром 10,69 м.

В соответствии с проектным решением по производству работ замораживание грунта производилось по контуру проходческого механизированного комплекса, при этом его головная часть была заглублена в замораживаемый массив на 3 м.

Геологический разрез участка замораживания представлен переслаивающимися песчаными и глинистыми грунтами, физико-механические характеристики которых приведены в таблице. Замораживание грунтов производилось от отметки 109,45 м до отметки 129,45 м в семи грунтовых слоях с применением твердого диоксида углерода, что являет-

ся прогрессивной технологией для городского подземного строительства [1, 2]. Уровень грунтовых вод расположен на отметке 142 м.

Работы по замораживанию выполнялись с земной поверхности при помощи следующей системы замораживающих колонок:

• 146 замораживающих скважин внешним диаметром 127 мм и толщиной стенки 5 мм, из которых 112 скважин имеют длину 40 м, остальные — переменную длину;

• 6 термометрических скважин, из которых 5 имеют длину 40 м, и 1 имеет длину 25 м;

Физико-механические характеристики грунтов
Physical and mechanical characteristics of soil

№ слоя	Номенклатурное описание грунтов (по ГОСТ 25100-2011)	Мощность слоя, принятая в расчете, м	Плотность грунта природного сложения, кг/м^3	Предел прочности при сжатии замороженного грунта, МПа	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град	Модуль деформации, МПа
1*	Насыпной грунт: песок средней крупности, средней плотности, средней степени водонасыщения, перемятый с суглинком, с вкл. мусора строительного	2,5	1820	—	2	36	10,9
2	Песок средней крупности средней плотности, от средней степени водонасыщения до насыщенного водой	7,0	1870	—	2	38	23,3
3	Песок средней крупности средней плотности, насыщенный водой	5,5	1980	—	4	36	24
4	Песок мелкий средней плотности, насыщенный водой	2,5	1980	—	6	29	38,7
5	Песок средней крупности средней плотности, насыщенный водой	2,5	1990	—	1	32,7	43,6
6	Суглинок легкий песчанистый пылеватый тугопластичный	2,0	2010	—	28	19	16,2
1з*		2,0	2010	1,3	320	19	60
7	Песок мелкий средней плотности, насыщенный водой	2,6	1980	—	6	37	29
2з		2,6	1980	2,1	360	33	450
8	Глина легкая пылеватая, тугопластичная	1,3	1840	—	43	18	13
3з		1,3	1840	1,1	320	18	60
9	Песок пылеватый плотный, насыщенный водой	7,4	2010		1	30	36
4з		7,4	2010	2,2	360	30	450
10	Суглинок тяжелый песчанистый полутвердый	1,4	2040	—	36	23	23,5
5з		1,4	2040	1,3	320	24	80
11	Глина легкая пылеватая полутвердая	2,9	1940	—	52	19	25
6з		2,9	1940	1,2	320	19	90
12	Глина тяжелая твердая	н.д.	1760	—	75	21	30,9
7з		2,4	1760	1,1	320	21	100

* Примечание: 1 — слой в естественном состоянии; 1з — слой в замороженном состоянии

• 2 гидронаблюдательные скважины длиной 35 м.

Схема размещения колонок в плоскости сечения тоннеля показана на рис. 1. Протяженность участка замораживания по трассе тоннеля составила около 15 м.

Конструкция обделки тоннеля запроектирована ОАО «Ленметрогипротранс». Материал обделки — армированный бетон, класс по прочности на сжатие В45, марка по морозостойкости не ниже F200, марка бетона по водонепроницаемости W12. Внутренний радиус обделки — 4700 мм, внешний — 5150 мм.

Выбор метода численного моделирования и модели грунта

Анализ напряженно-деформированного состояния системы «обделка — массив» при поэтапном размораживании грунтов требует рассмотрения следующих этапов:

Этап 1. Взаимодействие обделки с замороженным массивом с проектными параметрами.

Этап 2. Взаимодействие обделки с частично размороженным грунтовым массивом.

Этап 3. Взаимодействие обделки с грунтовым массивом после окончания процесса размораживания.

В качестве дополнительных, теоретически возможных расчетных случаев также рассматриваются:

• Взаимодействие обделки с массивом, в котором над тоннелем сохранилась толща замороженных грунтов.

• Взаимодействие обделки с неравномерно оттаявшим грунтовым массивом.

Наиболее адекватным численным методом для рассмотрения выделенных этапов является метод конечных элементов в пространственной постановке.

Разрабатываемая модель должна обеспечивать учет: истории загружения обделки в процессе строительства; нелинейности деформирования породного массива; особенности совместных деформаций на контактах обделки — массива и отдельных грунтовых слоев; трещиноватости и нарушенности массива; изменения свойств замороженного массива и др.

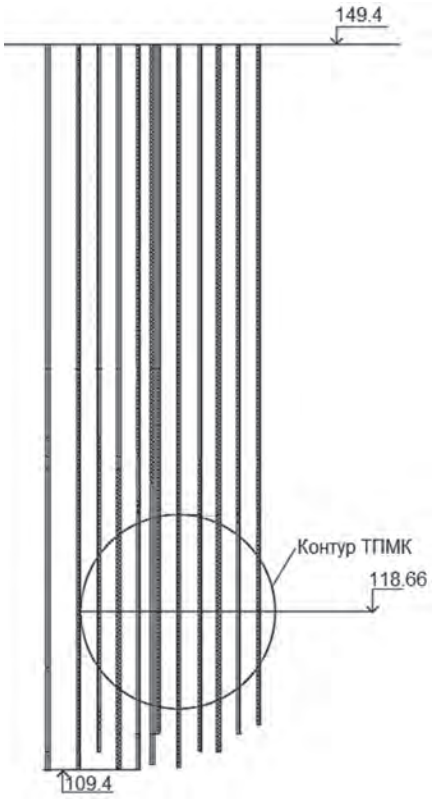

Рис. 1. Положение замораживающих колонок относительно сечения тоннеля и земной поверхности

Fig. 1. Position of freezing columns relative to the tunnel section and the earth's surface

Комплексный анализ этих факторов возможен в программном комплексе Midas GTS NX, нашедшим широкое применение для геотехнических расчетов [3, 4]. В программе реализовано автоматизированное и реалистическое определение стадии строительства для последовательной активации и дезактивации частей экскавации, структурных частей, нагрузок и граничных условий. Имеется

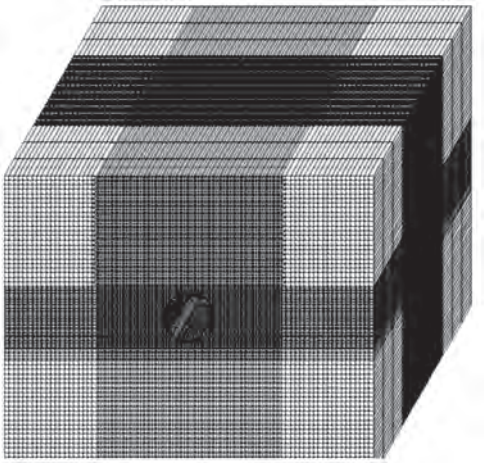

Рис. 2. Внешний вид пространственной численной модели тоннеля в грунтовом массиве
Fig. 2. 3D numerical model of a tunnel in a soil mass

возможность использования различных пластичных моделей материалов, позволяющих адекватно моделировать реальное поведение исследуемой системы.

Подробный обзор моделей грунтов выполнен в ряде работ и справочной литературе [5—7]. В качестве основой модели в настоящем исследовании принята идеально-пластическая модель Кулона-Мора. Модель позволяет рассмотреть упругую и пластическую стадии деформирования материала. Пластические деформации реализуются после некоторого предела в виде сдвиговых деформаций на площадках скольжения. Этому процессу препятствует структурное сцепление и внутренне трение материала. Прочность грунта определяется максимальными и минимальными главными напряжениями. Оценка прочности производится с помощью критерия прочности Кулона-Мора.

Важным преимуществом модели является ее широкое апробирование на практике, а также минимальные требования к исходным характеристикам материала (модуль общей деформации, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения, сцепление).

Пространственная численная модель тоннеля разработана в реальном масштабе (1:1) и имеет призматическую форму (рис. 2). Размеры граней приняты не менее 10R, где R — внешний радиус тоннеля. Для разбивки модели использованы изопараметрические восьмиузловые конечные элементы, позволяющие определять параметры напряженно-деформированного состояния, как континуальных объектов, так и массивных конструкций. Граничные условия модели заданы в виде ограничений перемещений узлов внешних нижней и боковых поверхностей грунтового массива модели в перпендикулярном направлении. Узлы верхней поверхности модели могут свободно деформироваться в вертикальном направлении.

Нагрузки на обделку от горного давления определялись расчетом и прикладывались в форме контактных напряжений к внешней цилиндрической грани крепи. Для всех тоннельных конструкций задан режим учета собственного веса. Такой подход широко апробирован на практике [8—14]. Гидростатическое давление моделировалось в зависимости от состояния грунтового массива по следующим схемам:

- при взаимодействии обделки с замороженным грунтом гидростатическое давление прикладывалось на верхнюю грань замороженного массива, значения нагрузки определялись по высоте столба грунтовых вод над замороженным грунтовым массивом;
- при взаимодействии обделки с частично или полностью размороженным грунтовым массивом гидростатическое давление прикладывалось на внешнюю поверхность обделки, значения нагрузки определялись в зависимости от высотной отметки конкретной точки обделки.

При выполнении серий расчетов параметры замороженных грунтов изменялись ступенчато от наибольших значений

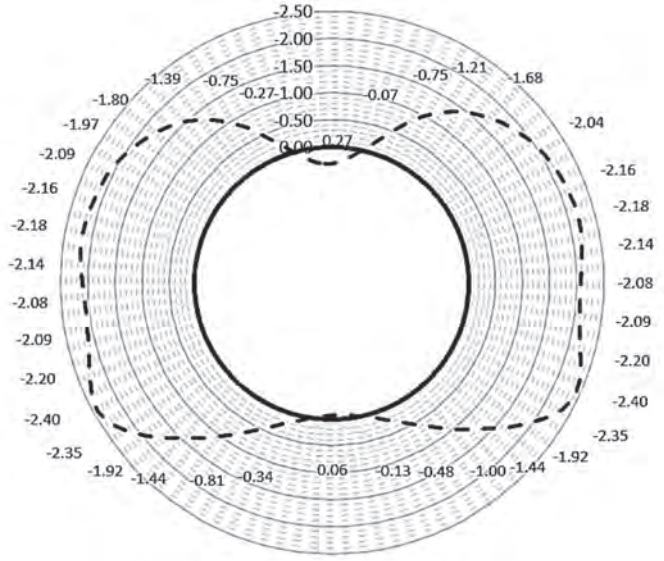

Рис. 3. Эпюра нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем контуре обделки, МПа (1 этап)

Fig. 3. Epure of normal shearing stresses at the backward boundary of lining, MPa (stage 1)

температур и объемов замороженных зон к минимальным. В ходе расчетов определялись все компоненты объемного напряженно-деформированного состояния обделки. Далее рассчитывались главные напряжения и деформации и выполнялся анализ для выявления основных закономерностей.

Анализ результатов численного моделирования

На первом этапе моделирования выполнен расчет модели, включающий замороженный грунтовый массив с проектными характеристиками. На рис. 3 представлена полученная по результатам расчета эпюра нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем контуре обделки.

На рис. 4 представлена аналогичная эпюра для внешнего контура обделки. Максимальные сжимающие напряжения на внутреннем контуре составили 2,4 МПа, растягивающие — 0,27 МПа, на внешнем контуре обделки выявлены только сжимающие напряжения с максимальной величиной 1,7 МПа. Прочностной анализ показал, что обделка имеет на первом этапе взаимодействия с замороженным грунтовым массивом значительный запас несущей способности.

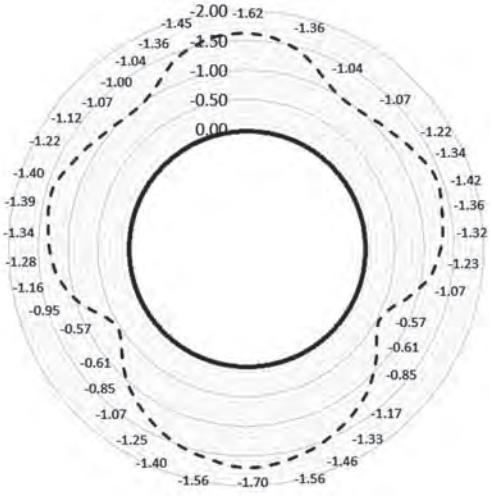

Рис. 4. Эпюра нормальных тангенциальных напряжений на внешнем контуре обделки, МПа (1 этап)

Fig. 4. Epure of normal shearing stresses at the outward boundary of lining (stage 1)

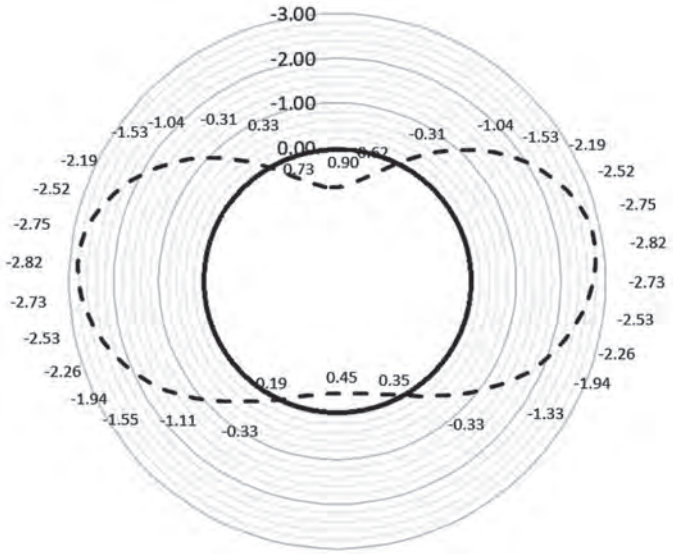

Рис. 5. Эпюра нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем контуре обделки, МПа (2 этап)

Fig. 5. Epure of normal shearing stresses at the backward boundary of lining, MPa (stage 2)

На втором этапе выполнен анализ взаимодействия системы «обделка — замороженных грунтовый массив» на стадии частичного оттаивания грунта за обделкой. Эпюры напряжений для расчетного случая формирования за обделкой зоны оттаявшего грунта толщиной 2,0 м представлены на рис. 5 и 6.

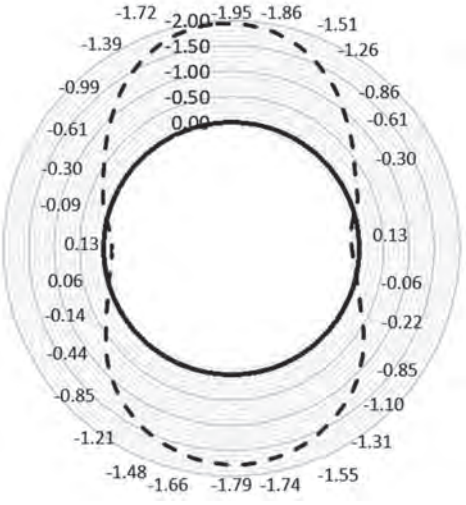

Рис. 6. Эпюра нормальных тангенциальных напряжений на внешнем контуре обделки, МПа (2 этап)

Fig. 6. Epure of normal shearing stresses at the outward boundary of lining (stage 2)

Количественный анализ полученных данных опасных напряжений в обделке не выявил.

На третьем этапе выполнен анализ взаимодействия обделки с полностью оттаявшим грунтовым массивом. Эпюры напряжений для данного расчетного случая представлены на рис. 7 и 8.

Количественный анализ полученных данных показывает, что критические напряжения в обделке также не возникают.

Сводный график изменения напряжений в обделке по исследованным этапам размораживания грунтового массива приведен на рис. 9.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. После возведения обделки в замороженном грунтовом массиве, нагнетания раствора за обделку и набора прочности обделка вступает в работу и начинает воспринимать нагрузки от горного давления, а также гидростатического давления, пе-

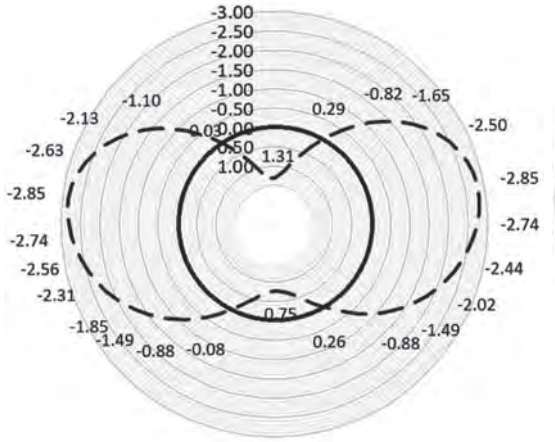

Рис. 7. Эпюра нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем контуре обделки
Fig. 7. Epure of normal shearing stresses at the backward boundary of lining

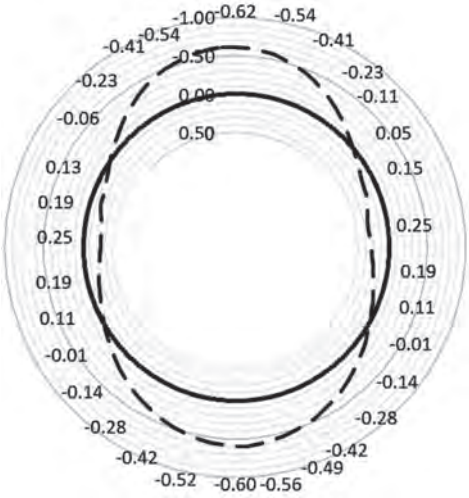

Рис. 8. Эпюра нормальных тангенциальных напряжений на внешнем контуре обделки
Fig. 8. Epure of normal shearing stresses at the outward boundary of lining

редаваемого через замороженный грунтовый массив.

В процессе размораживания, после частичного оттаивания грунта вокруг обделки происходит дополнительное обжатие обделки с одновременным ухудшением сцепления на контакте «обделка — грунт». Это, с одной стороны, приводит к увеличению напряжений на внутреннем слое, а с другой — к уменьшению напря-

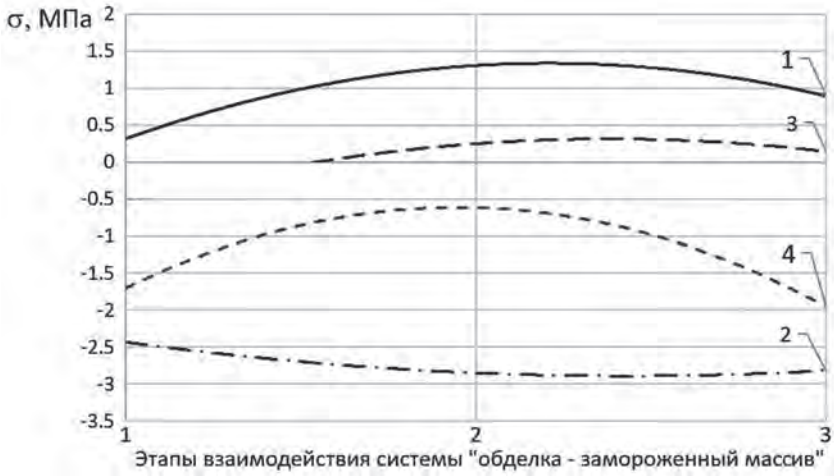

Рис. 9. Сводные графики изменения максимальных нормальных тангенциальных напряжений в обделке: 1 — растягивающих на внутреннем контуре; 2 — сжимающих на внутреннем контуре; 3 — растягивающих на внешнем контуре; 4 — сжимающих на внешнем контуре
Fig. 9. Comprehensive plots of change in maximum normal shearing stresses in lining: 1—tension at the backward boundary; 2—compression at the backward boundary; 3—tension at the outward boundary; 4—compression at the outward boundary

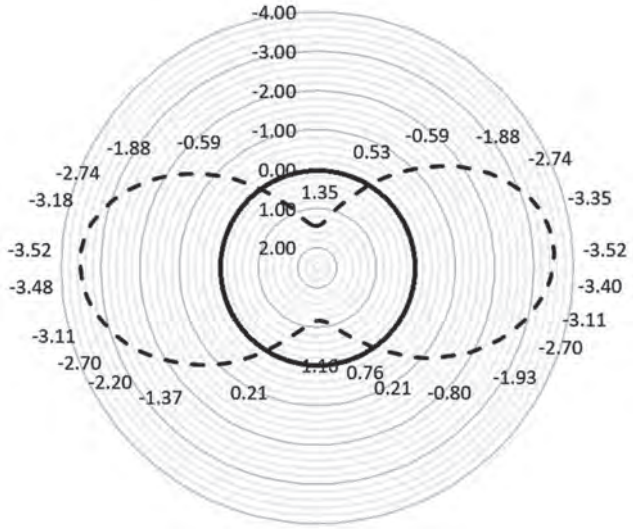

Рис. 10. Эпюра нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем контуре обделки
Fig. 10. Epure of normal shearing stresses at the backward boundary of lining

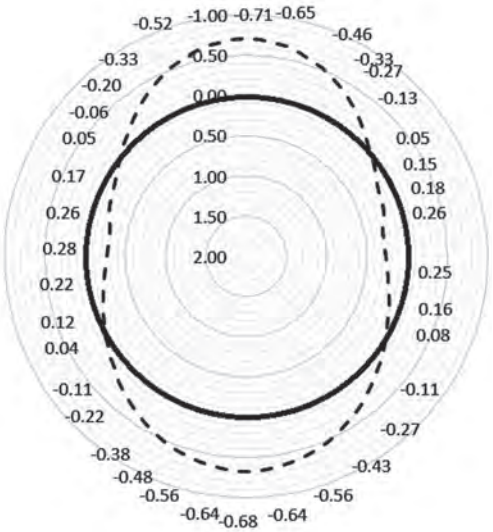

Рис. 11. Эпюра нормальных тангенциальных напряжений на внешнем контуре обделки
Fig. 11. Epure of normal shearing stresses at the outward boundary of lining

жений на внешнем слое обделки. После полного оттаивания грунтового массива на обделку передается полное гидростатическое давление. В то же время проявляется взвешивающее действие грунтовых вод, что уменьшает величины нагрузок от горного давления. Из-за этого происходит незначительное уменьшение максимальных напряжений в обделке на внутреннем контуре.

В качестве первого дополнительного, теоретически возможного расчетного случая, рассмотрено взаимодействие обделки с частично оттаявшим массивом, в котором над тоннелем сохранилась толща замороженных грунтов мощностью 4,0 м. При этом грунты в боках тоннеля полностью оттаяли. Рассмотрен наихудший сценарий, когда гидростатическое давление передается на толщу замороженного грунта, а взвешивающее действие воды проявляется только в боках тоннеля. Полученные в результате расчета эпюры напряжений представлены на рис. 10 и 11.

Анализ полученных данных показывает, что в этом случае наблюдается незначительный рост сжимающих напряжений на внутреннем контуре обделки, не приводящий к существенному снижению запаса прочности обделки по сравнению с рассмотренными ранее этапами. Дополнительно рассмотрен расчетный слу-

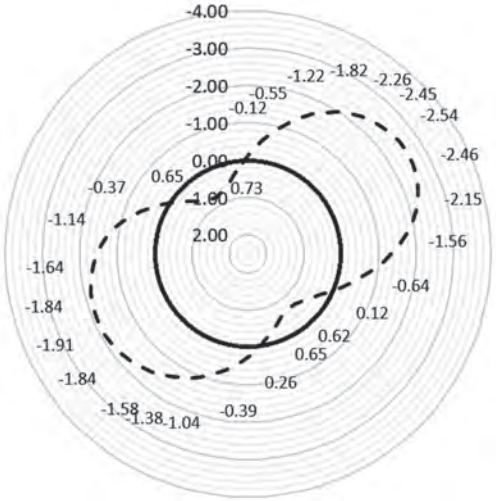

Рис. 12. Эпюра нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем контуре обделки
Fig. 12. Epure of normal shearing stresses at the backward boundary of lining

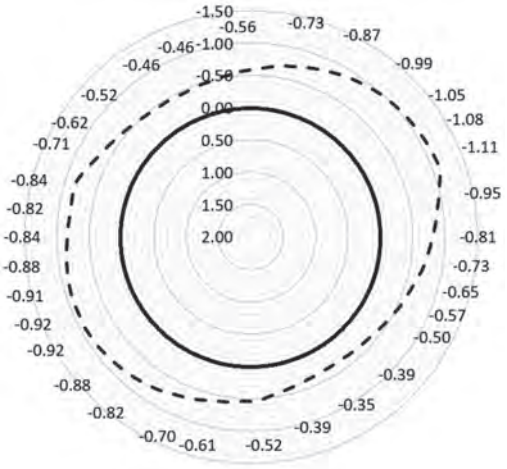

Рис. 13. Эпюра нормальных тангенциальных напряжений на внешнем контуре обделки
Fig. 13. Epure of normal shearing stresses at the outward boundary of lining

чай, при котором с правой стороны относительно центральной вертикальной оси тоннеля массив полностью оттаял, а с левой — оттаяла 1/3 часть объема предварительно замороженного грунта. Полученные в результате расчета эпюры напряжений представлены на рис. 12 и 13.

Анализ полученных расчетных данных показывает, что в случае неравномерного оттаивания грунтового массива в обделке возникает асимметрия напряжений и смещение пиковых значений сжимающих и растягивающих напряжений относительно центральных осей сечения тоннеля. Критических концентраций напряжений при этом не возникает, обделка в целом продолжает работать в нормальном эксплуатационном режиме.

В целом на всех рассмотренных этапах обделка имеет значительный запас несущей способности. Выполненные работы по замораживанию и дальнейший процесс размораживания массива не приводит к ухудшению условий ее эксплуатации.

Заключение

Определение напряженно-деформированного состояния обделки двухпутного тоннеля на различных стадиях искусственного замораживания грунтового массива показало, что принятые конструктивные и технологические решения обеспечивают необходимый запас несущей способности обделки. Для повышения эффективности совместного взаимодействия системы «обделка — грунтовый массив» также рекомендуется:

1. Выполнить тщательный тампонаж замораживающих колонок.

2. После реализации начальной стадии оттаивания массива вокруг обделки выполнить цементацию заобделочного пространства через тампонажные отверстия блоков обделки по контуру тоннеля.

3. После производства работ по цементации и набора расчетной прочности раствора, выполнить геофизическое обследование заобделочного пространства на предмет наличия заобделочных пустот. В случае их обнаружения, принять меры к их незамедлительной ликвидации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вакуленко И. С.*, *Николаев П. В.* Анализ и перспективы развития способа искусственного замораживания горных пород в подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 3. — С. 338—346.

2. *Николаев П. В.*, *Шуплик М. Н.* Математическое моделирование процесса искусственного замораживания грунтов с применением твердого диоксида углерода // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 11. — С. 243—251.

3. *Pleshko M., Voinov I., Revyakin A.* Assessment of the impact of railway tunnel lining defects with a long working lifespan on its carrying capacity / MATEC Web of Conferences Cep. «International Science Conference SPbWOSCE-2016 «SMART City»» 2017, pp. 05004.

4. *Плешко М. С.*, *Плешко М. В.*, *Войнов И. В.* Оценка технического состояния железнодорожных тоннелей с большим сроком эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 1. — С. 34—40. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-34-40.

5. *Gianpiero Russo, Andrea Corbo, Filippo Cavuoto, Silvia Autuori*. Artificial Ground Freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis // Tunnelling and Underground Space Technology. 2015. No 50.

6. *Выбор* математической модели грунта для геотехнических расчетов в PLAXIS: Специальный курс. — СПб., 2010.

7. *Бережной Д. В.*, *Сагдатулин М. К.* Моделирование деформирования обделки тоннеля метрополитена, расположенной в грунте, с учетом контактного взаимодействия // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — Т. 17. — № 15. — С. 289—293.

8. *Безродный К. П.*, *Лебедев М. О.* Натурные исследования напряженно-деформированного состояния систем «обделка-массив» в составе горно-экологического мониторинга // Метро и тоннели. — 2011. — № 6. — С. 28—30.

9. *Анциферов С. В.*, *Саммаль А. С.*, *Дворянкин В. Г.*, *Тормышева О. А.* Метод расчета обделок с учетом веса размещенного внутри тоннелей массивного оборудования // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2018. — № 3. — С. 210—220.

10. *Деев П. В.*, *Саммаль А. С.*, *Анциферов С. В.*, *Шелепов Н. В.* Влияние величины технологического зазора на напряженное состояние обделок тоннелей // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2018. — № 4. — С. 287—293.

11. *Прокопов А. Ю.*, *Прокопова М. В.*, *Ротенберг М. А.* Математическое моделирование взаимовлияния автодорожного тоннельного комплекса № 6—6а и действующего железнодорожного тоннеля № 5 в г. Сочи // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № S7. — С. 101—109.

12. *Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y.* A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019, 85, pp. 406—417.

13. *Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W.* A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, 72, pp. 55—63.

14. *Kang Y., Liu Q., Cheng Y., Liu X.* Combined freeze-sealing and New Tubular Roof construction methods for seaside urban tunnel in soft ground // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. 58, pp. 1—10. ГИАБ

REFERENCES

1. Vakulenko I. S., Nikolaev P. V. Analysis and prospects for the development of the method of artificial freezing of rocks in underground construction. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 3, pp. 338—346. [In Russ].

2. Nikolaev P. V., Shuplik M. N. Mathematical modelling of the process of artificial freezing of soils using solid carbon dioxide. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 11, pp. 243—251. [In Russ].

3. Pleshko M., Voinov I., Revyakin A. Assessment of the impact of railway tunnel lining defects with a long working lifespan on its carrying capacity. *MATEC Web of Conferences Cep. «International Science Conference SPbWOSCE-2016 «SMART City»»*, 2017, pp. 05004.

4. Pleshko M. S., Pleshko M. V., Voynov I. V. Estimation of technical state of long-term service railway tunnels. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 1, pp. 34—40. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-34-40.

5. Gianpiero Russo, Andrea Corbo, Filippo Cavuoto, Silvia Autuori. Artificial Ground Freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015. No 50.

6. *Vybor matematicheskoy modeli grunta dlya geotekhnicheskikh raschetov v PLAXIS*: Spetsial'nyy kurs [Selection of a mathematical mode of soil for geotechnical calculations in PLAXIS: Special course], Saint-Petersburg, 2010.

7. Berezhnoy D.V., Sagdatullin M.K. Modeling of the deformation of the of the underground tunnel lining located in the ground, taking into account the contact interaction. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. Vol. 17, no 15, pp. 289—293. [In Russ].

8. Bezrodnyy K.P., Lebedev M.O. Mining and environmental monitoring during the construction and operation of the North Caucasus transport tunnels. *Metro i tonneli*. 2011, no 6, pp. 28—30. [In Russ].

9. Antsiferov S.V., Sammal' A.S., Dvoryankin V.G., Tormysheva O.A. Method of calculating lining, taking into account the weight of the massive equipment placed inside the tunnels. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2018, no 3, pp. 210—220. [In Russ].

10. Deev P.V., Sammal' A.S., Antsiferov S.V., Shelepov N.V. Effect of technological gap on the stress state of tunnel lining. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2018, no 4, pp. 287—293. [In Russ].

11. Prokopov A.Yu., Prokopova M.V., Rotenberg M.A. Mathematical modelling of the mutual influence of the road tunnel complex number 6—6a and the existing railway tunnel number 5 in Sochi city. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no S7, pp. 101—109. [In Russ].

12. Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y. A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, 85, pp. 406—417.

13. Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, 72, pp. 55—63.

14. Kang Y., Liu Q., Cheng Y., Liu X. Combined freeze-sealing and New Tubular Roof construction methods for seaside urban tunnel in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. 58, pp. 1—10.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Плешко Михаил Степанович[1] — д-р техн. наук, профессор, доцент,
e-mail: mixail-stepan@mail.ru,
Плешко Марианна Викторовна[1] — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: pleshkomv@yandex.ru,
Войнов Иван Вячеславович[2] — аспирант, e-mail: voinov_22@mail.ru,
Костюхов Андрей Владимирович[2] — магистрант, e-mail: kostyukhov@mail.ru,
[1] НИТУ «МИСиС»,
[2] Ростовский государственный университет путей сообщения,
Для контактов: Плешко М.С., e-mail: mixail-stepan@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.S. Pleshko[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Assistant Professor,
e-mail: mixail-stepan@mail.ru,
M.V. Pleshko[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: pleshkomv@yandex.ru,
I.V. Voynov[2], Graduate Student, e-mail: voinov_22@mail.ru,
A.V. Kostyukhov[2], Master's Degree Student, e-mail: kostyukhov@mail.ru,
[1] National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia,
[2] Rostov State Transport University, 344038, Rostov-on-Don, Russia.
Corresponding author: M.S. Pleshko, e-mail: mixail-stepan@mail.ru.