



Научная статья
УДК 624.195

Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, А.В.АЛЕКСЕЕВ ✉, П.Э.ВЕРБИЛО

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Протосеня А.Г., Алексеев А.В., Вербилло П.Э. Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 252-260. DOI: 10.31897/PMI.2022.26

Аннотация. В статье представлено численное решение пространственной упругопластической задачи определения устойчивости грунтов забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива. Актуальность исследования связана с необходимостью учета зон нарушенных грунтов при оценке устойчивости забоя для расчета параметров крепи. На основе метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе PLAXIS 3D, выполнено построение конечно-элементной системы «грунтовой массив – нарушенность – крепь забоя» и моделирование пересечения нарушенных зон грунтового массива. Для оценки состояния грунтов приняты деформационный и прочностной критерий. Деформационный критерий выражен величиной расчетного смещения контура тоннеля в забое, а прочностной – коэффициентом запаса прочности до достижения предельных величин напряженного состояния по критерию Кулона – Мора. Результаты исследования представлены в виде гистограмм зависимостей коэффициента запаса прочности от расстояния до нарушенности при различной изгибной жесткости конструкции крепи забоя, а также изополей развития деформаций. Определены параметры вывалообразования в призабойной зоне при пересечении зон нарушенных грунтов. Локальное снижение прочностных и деформационных свойств в массиве по трассе тоннеля должно быть учтено при оценке устойчивости забоя тоннеля и расчете параметров крепи. В рамках построенной замкнутой системы получено качественное согласование результатов моделирования со случаем обрушения в забое при строительстве станции «Владимирская-2» Санкт-Петербургского метрополитена.

Ключевые слова: устойчивость забоя; прогноз устойчивости; крепь забоя; статический расчет; вывалообразование; равновесие грунтов забоя

Поступила: 20.04.2021

Принята: 26.04.2022

Онлайн: 13.07.2022

Опубликована: 13.07.2022

Введение. Подземное пространство Санкт-Петербурга имеет сложное строение и характеризуется наличием тектонических разломов [1], участков подъема и опускания геологических блоков с малой геодинамической подвижностью [2]. Это создает неблагоприятные условия для строительства и эксплуатации тоннелей метрополитена. В массиве сформированы локализованные зоны нарушенности, необходимость пересечения которых может осложнить условия строительства тоннелей. Под понятием «нарушенность» в статье понимается изменение прочностных и деформационных свойств инженерно-геологического элемента по техногенным или иным причинам. Исследованиями выявлены локализации снижения прочностных параметров и деформационных характеристик грунтов в массиве до двух раз [2-4]. Среди причин, приводящих к снижению прочностных свойств, выделяются процессы биохимического выветривания, разуплотнения и размягчения при увеличивающейся влажности, а также активная жизнедеятельность природной и привнесенной микробиоты [5, 6]. Случаи обрушения грунтов проходческого забоя при строительстве Санкт-Петербургского метрополитена приведены в работе [7].

Наличие в массиве зон нарушенности определяет новые требования к проектированию строительства тоннелей и пересадочных узлов станций. Одним из факторов риска при строительстве подземного сооружения является возможность обрушения грунтов в забое [8-10]. Вероят-



ность этого риска существенно повышается при подходе забоя к участку локального снижения прочности массива. В связи с этим, при оценке устойчивости грунтов забоя возникает необходимость учета особенностей строения грунтового массива. Актуальность исследования связана со сложностью и недостаточной изученностью напряженно-деформированного состояния физически нелинейного грунтового массива в нарушенных зонах [11, 12].

Большая часть работ по определению устойчивости основана на обосновании необходимого давления на грунтовое обнажение со стороны тоннеля, что справедливо для механизированной проходки [13-16]. В работах [17, 18] проводится анализ устойчивости забоя тоннеля неглубокого заложения. Описан подход к оценке устойчивости забоя с точки зрения двух групп предельных состояний, превышение критериев которых приводит к невозможности эксплуатации тоннеля, потере эксплуатационной пригодности, определяющейся оседаниями на поверхности [19]. Аналитический обзор подходов к оценке оседаний на поверхности представлен в [20]. Прогнозу устойчивости незакрепленного забоя посвящена работа [21]. В статье [22] проведено исследование устойчивости забоя при проведении тоннеля на глубине 8 м от подошвы четвертичных отложений. Вместе со сценарием незакрепленного забоя исследованы сценарии при различном давлении на поверхность забоя со стороны тоннеля [23, 24]. Выявлено уменьшение смещений по мере роста отпора со стороны крепи. Анализ влияния крепи лба забоя на напряженно-деформированное состояние посвящены работы [25, 26]. Способ крепления лба забоя анкерами описан в патенте [27]. В статье [26] разработана методика моделирования анкерной крепи с учетом закрепления анкера в замке. Приведены результаты натурных наблюдений за деформациями поверхности забоя. Демонстрируется влияние изгибной жесткости конструкций крепления на деформации массива. Оценке напряженного состояния в массиве посвящена работа [28]. Можно сделать вывод, что методологический подход, связанный с определением устойчивости через распределенное давление на забой, не учитывает формирование напряженно-деформированного состояния грунтов забоя в зависимости от изгибной жесткости конструкции крепления забоя. В работе [29] описывается устойчивость незакрепленного вертикального обнажения в недренированном массиве, обладающем недренированной прочностью на сдвиг. Устойчивости забоя в дренированном массиве, обладающем сцеплением и внутренним трением, посвящена работа [30]. Оценке напряженно-деформированного состояния выработок вблизи нарушения посвящены работы [31, 32] и исследование [33] о напряженно-деформированном состоянии грунтов забоя в зонах неоднородных грунтов. Метод расчета параметров крепи в забое по методу предельного равновесия рассматривался в работе [34]. Принятый в отечественной инженерной практике критерий устойчивости грунтовых обнажений описан в работе [35].

Постановка проблемы. Вывалообразование при проходке тоннелей связано с активизацией деформационных процессов в призабойной зоне, которые будут достигать земной поверхности и приводить к дополнительным осадкам зданий. Недостаточная изученность процесса формирования вывалообразования в глинах под влиянием совокупности факторов и отсутствие метода расчета нагрузки на крепь забоя в нарушенных грунтах вызывают необходимость прогноза напряженно-деформированного состояния в забое тоннеля.

Целью исследования является изучение закономерности формирования вывалообразования и исследование состояния устойчивости забоя в зоне нарушенных грунтов. Наличие прогнозного представления о динамике изменения состояния устойчивости и потере равновесия грунтов призабойного пространства при пересечении зоны нарушенных грунтов позволит качественно изменить подход к проектированию временной крепи забоя, снизить вероятность реализации риска развития непрогнозируемых деформаций на земной поверхности и сохранить здания, подрабатываемые подземным сооружением. Достижение цели возможно с расчетом параметров крепи, обеспечивающих устойчивость грунтов забоя и их равновесие в забое. Задачами исследования являются: оценка влияния жесткости крепи на устойчивость грунтов в забое [36]; сопоставление жесткости крепи с величиной эквивалентного отпора со стороны крепи; исследование факторов, обуславливающих потерю устойчивости и равновесия грунтов забоя; выявление динамики изменения напряженно-деформированного состояния и критерия устойчивости по мере приближения забоя к зоне нарушенности с учетом свойств пород в нарушенной зоне [37].



В работе предлагается на основе упругопластической модели с упрочнением и критерия прочности, основанного на отношении максимальных касательных напряжений к предельным их значениям, выполнять прогнозирование устойчивого состояния и зоны возможного обрушения.

Методы исследования. Рассматриваемая задача в математической постановке относится к классу упругопластических задач с неизвестной границей, которая определяется в процессе ее решения. Известно [35, 38], что эти задачи сложны для получения аналитического решения даже в плоской постановке. В работе рассматривается пространственная постановка задачи, решение которой аналитическим методом еще не разработано. Поэтому был использован численный метод решения. Прогнозная модель основана на методе пространственного конечно-элементного моделирования геомеханических процессов при строительстве тоннеля в зоне нарушенности массива с реализацией в программном комплексе.

В призабойной зоне происходит активное перераспределение напряжений и деформации. Для оценки уровня напряжений предлагается использовать прочностной критерий, уровня деформаций – деформационный [39]. В качестве деформационного критерия принимается принятый в инженерной практике критерий устойчивости, выраженный через величину расчетного смещения контура подземного сооружения. В зависимости от величины реализовавшихся смещений контура и типа пород выделяются четыре категории устойчивости пород.

В качестве прочностного критерия устойчивости в обнажениях грунтов забоя тоннеля принимается условие [40]:

$$SF = \frac{\tau}{\tau_{sf}},$$

где τ – величина наибольшего касательного напряжения, связанная с критерием прочности Кулона – Мора, МПа; τ_{sf} – расчетная минимальная величина необходимого для равновесия касательного напряжения в проектном сценарии, МПа.

Для оценки параметра SF производилось численное моделирование в пространственной постановке с использованием последовательного снижения прочностных свойств грунтового массива в программном комплексе PLAXIS 3D. Алгоритм вычисления сводился к расчетам множества равновесных состояний системы при последовательно вводимых неуравновешенных силах, связанных со снижением прочности. В конце каждого этапа расчета геомеханическая система находилась в равновесном состоянии, однако на фазе численного расчета SF алгоритмом предусмотрено уменьшение прочностных свойств массива. Для этого в модель вводились неуравновешенные силы, и равновесие системы нарушалось. Дисбаланс сил приводил к развитию деформаций. Вместе с этим, постоянно анализу подвергалось отношение приращения деформаций, вызванных введением новых неуравновешенных сил на двух смежных шагах расчета. Этот алгоритм повторялся до момента, пока не был зафиксирован лавинообразный рост деформаций

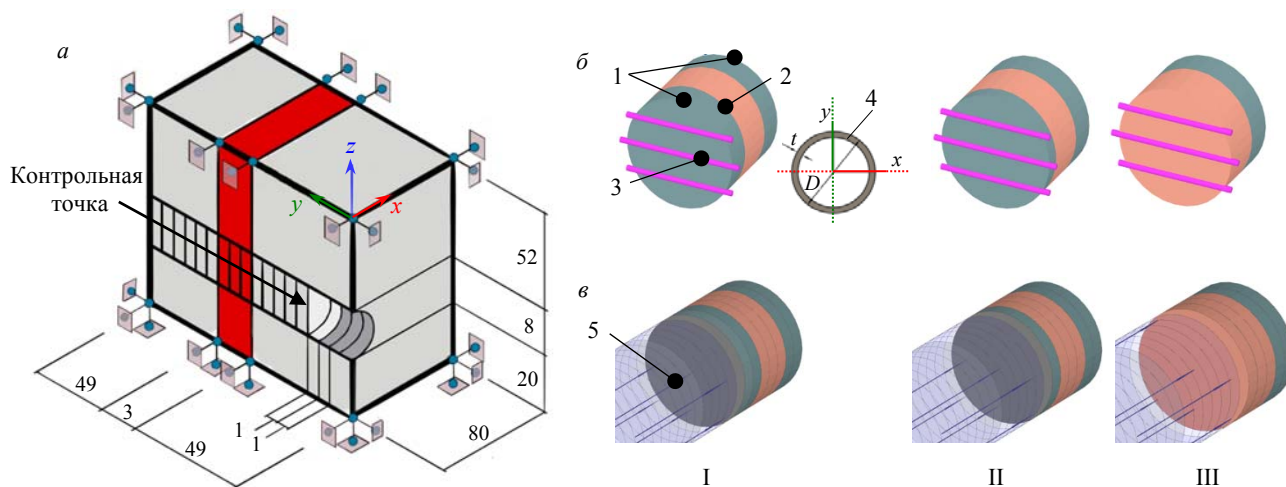


Рис.1. Расчетная схема (а) и этапы проведения тоннеля: моделирование работы крепи в явном виде (б); в эквивалентном виде (в) на расстоянии 2 м от нарушения (I), 1 м (II), на нарушении (III)

1 – ненарушенный массив; 2 – структурно-механическая нарушенность; 3 – балочный элемент конечной изгибной жесткости (расстрел); 4 – поперечное сечение расстрела; 5 – равномерно распределенное эквивалентное давление



в контрольной точке (рис.1) между последовательными шагами ввода неуравновешенных сил. На этом этапе расчета достигается постоянное значение SF , численно отражающее критерий прочности грунтов как отношение касательных напряжений в массиве к предельным напряжениям, при которых реализуется сдвиг по площадке скольжения.

Система «грунтовый массив – нарушенность – крепь лба забоя» моделировалась следующим образом. В качестве сплошной среды использовались два расчетных геологических элемента, один из которых описывался свойствами ненарушенного массива, другой – нарушенного. В качестве элементов обделки использовались плитные элементы толщиной 0,35 м. Временная крепь забоя моделировалась с помощью труб различного диаметра. Заделка труб в массив принималась равной 0,35 м. Параметры физико-механических свойств грунта представлены в таблице.

Параметры модели материала

Параметр	Вне зоны нарушения	В зоне нарушения
Объемный вес неводонасыщенного грунта γ_{unsat} , кН/м ³	22	22
Объемный вес водонасыщенного грунта γ_{sat} , кН/м ³	22	22
Коэффициент разрушения R_f	0,9	0,9
Начальный коэффициент пористости e_{int}	0,5	0,5
Параметр нелинейности m	0,75	0,75
Коэффициент Пуассона при разгрузке ν_{ur}	0,2	0,2
Критерий прочности	Кулона – Мора	Кулона – Мора
Модуль деформаций на 50 % прочности E_{50}^{ref} , МПа	75	50
Модуль деформаций при разгрузке E_{ur}^{ref} , МПа	225	150
Эффективное сцепление c' , кПа	75	25
Эффективный угол внутреннего трения ϕ' , град.	12	6
Предел прочности при растяжении σ_t , кПа	400	0
Коэффициент переуплотнения грунта OCR	10	3

Последовательность проведения прогнозной оценки устойчивости забоя в нарушенной зоне: назначение граничных условий пространственной модели; обоснование размеров зоны нарушения и принятых физико-механических параметров принятой модели; выделение в массиве области влияния нарушенной зоны на контролируемые параметры напряженно-деформированного состояния среды; определение динамики изменения коэффициента SF на основании моделирования работы крепи на каждом этапе строительства тоннеля при подходе к нарушенности.

Вертикальные границы модели закреплены от перемещений в нормальных направлениях, но могут свободно перемещаться в плоскости закрепления. Нижняя граница модели закреплена от перемещений в любом направлении, в то время как поверхность грунта свободна от закрепления (рис.1). Диаметр тоннеля задавался равным 8 м. Мощность зоны неустойчивых пород 3 м. Вертикальными линиями на рис.1 показаны этапы разработки тоннеля. Величина отставания обделки от забоя 1 м. Ширина кольца обделки 1 м. Изменение изгибной жесткости балочных элементов достигалось изменением диаметра расстрела. Марка стали и толщина стенки трубы оставались постоянными.

Результаты. *Определение влияния жесткости крепи на устойчивость пород в забое.* Для определения категории устойчивости были построены изополя перемещений поверхности забоя в зависимости от жесткости временной крепи (рис.2). Несмотря на то, что на нарушении при креплении забоя расстрелами диаметром 150 мм будет выполняться критерий прочности на поверхности забоя ($SF = 1,16$), по деформационному критерию устойчивости при уровне смещений в 240 мм состояние пород относится к категории неустойчивого.

При диаметре расстрелов 450 мм в забое реализуются деформации около 7 см, что в соответствии с деформационным критерием, предложенным Н.С.Булычевым, относится к категории среднеустойчивого состояния осадочных пород. При исследовании прочности для сценария крепления забоя расстрелами диаметром 450 мм критерий прочности также будет удовлетворен ($SF = 1,33$), а по фактору деформативности состояние грунтов в забое будет относиться к среднеустойчивым.

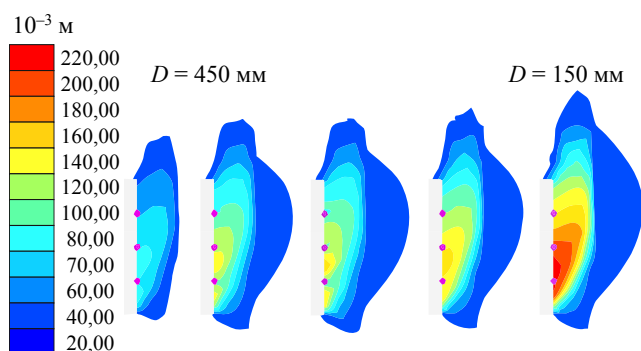


Рис.2. Изополя перемещений за фазу расчета

изменении прочностных параметров массива. Для исследования возможности задания жесткости крепления эквивалентным давлением со стороны крепи было проведено моделирование и сравнение зон обрушения из критерия прочности Кулона – Мора. С помощью алгоритма определения SF в массиве выделялся объем породы, вовлеченный в процессы сдвижения. Сформировавшийся вывал можно визуализировать на этапе определения критерия SF с помощью изополей приращения деформаций. На рис.3 представлены результаты определения формы потери равновесия пород забоя при диаметре временных конструкций крепления забоя балочными элементами диаметром 150 мм (рис.3, а) и эквивалентном давлении 18,87 кПа (рис.3. б). Синим цветом на рис.3 обозначена поверхность, являющаяся границей приращения смещений на этапе определения SF , за пределами этой поверхности в массиве не реализуются деформации, связанные с вводом неуравновешенных сил и соблюдается условие прочности Кулона – Мора.

Сопоставленные объемы вовлеченных в деформирование грунтов позволяют сделать вывод о том, что потеря прочности происходит по схожим сценариям. Вытянутый вверх вывал характерен для нарушенного грунтового массива и связан с накоплением и увеличением пластических деформаций сдвига и увеличивающимися при подходе к нарушенности касательными напряжениями.

Определение влияния изменения напряженно-деформированного состояния на прочность пород в забое. При приближении забоя к зоне нарушенных грунтов для всех расчетных сценариев крепления

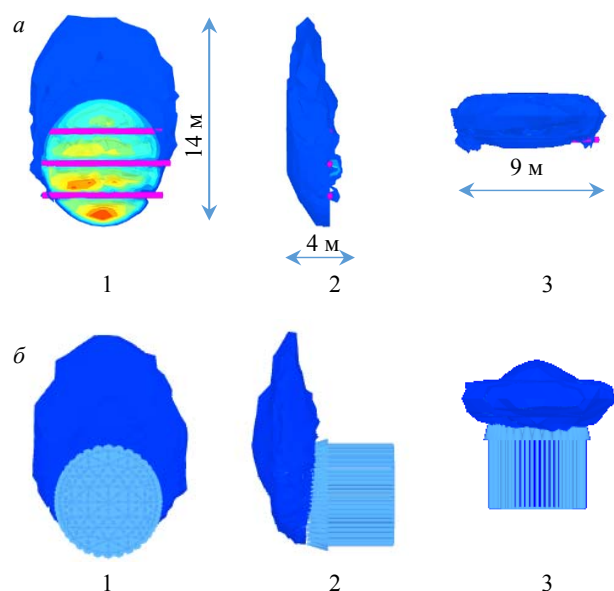


Рис.3. Результат прогнозирования зоны возможного вывалообразования при нагрузке на забой:

а – главные виды при диаметре расстрелов 150 мм;
б – главные виды при эквивалентном давлении 18,87 кПа

1 – фронтальный вид; 2 – вид слева; 3 – вид сверху

Исходя из критерия устойчивости по деформативности и прочности, можно судить о том, что при уменьшении изгибной жесткости временного крепления забоя происходит изменение состояния устойчивости, т.е. рационально подобранная жесткость временной крепи забоя способна оказать влияние на устойчивость пород в забое.

Определение величины эквивалентного отпора со стороны крепи. Влияние распределенного по поверхности забоя давления на деформирование исследовано в работе [41]. В работе [42] выявлена зависимость давления отпора при

забоя происходит увеличение объема вовлеченных в сдвиговые процессы нарушенных грунтов. Для качественного сравнения результатов по критерию прочности были определены отношения действующих в массиве напряжений к предельным касательным напряжениям незакрепленного забоя тоннеля (рис.4). По изополям напряжений были определены вовлеченные в сдвиговые процессы объемы нарушенных грунтов.

Динамика изменения критерия SF в зависимости от расстояния до зоны нарушенности и типа крепи. Изучение динамики изменения SF начиналось в зоне влияния нарушенности на расстоянии 2 м от нарушения. Определение зоны влияния обосновано предварительными расчетами смещений вдоль оси тоннеля по мере строительства тоннеля. Зоной влияния считалось расстояние, на котором происходило увеличение деформаций поверхности забоя более, чем на 5 % относительно средних смещений. Технология проведения тоннеля предусматривала его



проходку на полное сечение с величиной заходки 1 м. Для наглядности представления этапности проходки на рис.1 изображены изолированные от остальной модели объемные элементы, соответствующие этапам проходки.

Расчетные сценарии приближения забоя к зоне нарушенных грунтов в зависимости от параметров крепи выделены в шесть групп (рис.5): 1) забой подходит к зоне нарушенности без какого-либо крепления; 2) диаметр расстрельных элементов – 150 мм; 3) диаметр расстрельных элементов – 450 мм; 4) эквивалентное давление на лоб забоя – 2,23 кПа; 5) эквивалентное давление на лоб забоя – 37,18 кПа; 6) эквивалентное давление на лоб забоя – 75,52 кПа.

По проектному сценарию, описывающему вхождение забоя в зону влияния нарушенности без крепи (группа 1), наблюдается потеря прочности грунтов забоя на нарушенности, до подхода к нарушению запас достигал 38 %. При эквивалентном давлении 2,23 кПа вхождение забоя в зону нарушенности будет сопровождаться резким превышением касательных напряжений по отношению к предельным за счет того, что зона нарушенности является «накопителем» исторических пластических деформаций сдвига.

Факторы, обуславливающие потерю устойчивости и равновесия грунтов забоя. При положении забоя на расстоянии 2 м от нарушения в уровне верхнего расстрела формируется зона концентрации объемных деформаций. За появление объемных деформаций отвечают нормальные напряжения, реализующиеся за счет извлечения объема грунта и ввода крепи в работу. Дальнейшее перераспределение напряжений, выявленное с помощью алгоритма определения SF , показывает, что по мере вхождения забоя в зону нарушенных грунтов на забое будут формироваться участки превышения предела прочности на растяжение. Вывал принимает очертания линзы, контур которой на рис.6 обозначен зеленым цветом. Снижение прочности массива приводит к увеличению объема грунтов, вовлеченных в сдвиговые процессы. Происходит формирование нового вывала. Участки локализации объемных деформаций смещаются к будущей поверхности скольжения и формируют контур второго вывала в форме капли.

Относительно небольшой объем первого обрушения связан с превышением напряжения предельных значений на растяжение. Подтверждением этому служит визуализация отдельных областей в расчетной модели, в которых превышен предел прочности на растяжение (зеленые точки на рис.6). В дальнейшее разрушение грунтов больший вклад вносят касательные напряжения. Красным цветом на рис.6 показаны точки, в которых превышены предельные напряжения сдвига на площадках. При этом картина визуализированных областей предельного состояния может иметь большие геометрические параметры, чем на изополях смещений.

Это объясняется вовлечением не всего объема в процессы активного сдвижения.

Таким образом, изгибная жесткость временного крепления забоя оказывает

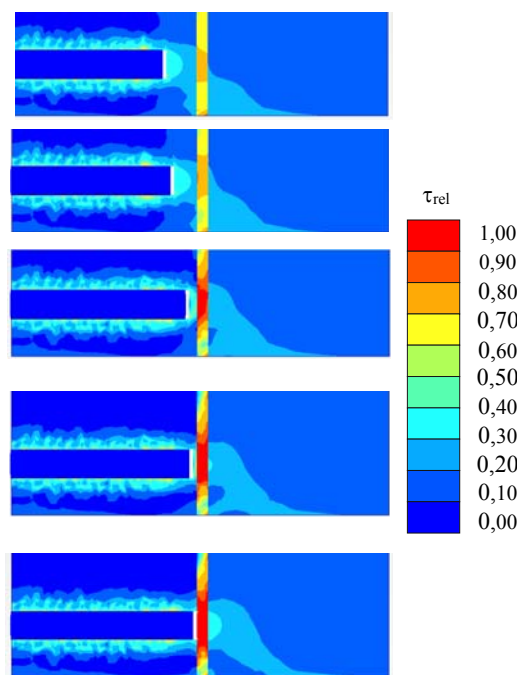


Рис.4. Изополя отношения действующих в массиве касательных напряжений к предельным

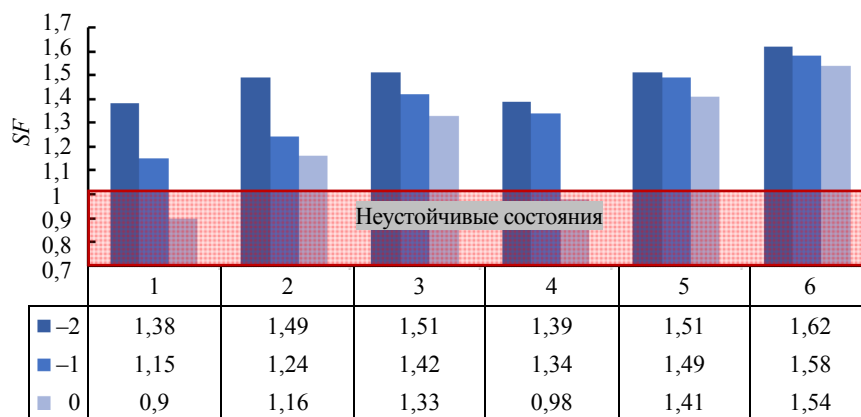


Рис.5. Гистограмма зависимости SF от расстояния до нарушенности (-2; -1; 0 м) при разных параметрах крепи забоя

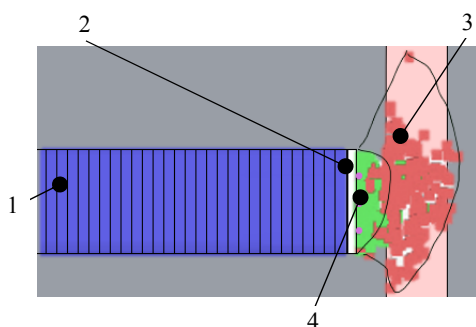


Рис.6. Фрагмент модели на этапе статического равновесия

1 – обделка тоннеля; 2 – конструкция временной крепи забоя; 3 – участки превышения предельных напряжений сдвига на площадке; 4 – участки превышения предельных напряжений растяжения

влияние на состояние устойчивости в забое. Вне зависимости от способа крепления грунтов забоя на нарушенных грунтах происходит накопление касательных напряжений и угловых пластических деформаций изменения формы. При приближении забоя к зоне нарушенных грунтов в сценариях отсутствия крепи или недостаточного отпора (менее 2,23 кПа) со стороны крепи в грунтах забоя не выполняется критерий прочности по растягивающим напряжениям и напряжениям сдвига.

Обсуждение. Для сравнительного анализа был рассмотрен случай обрушения грунта в забое переходного коридора пересадочного узла строящейся станции «Владимирская-2» с действующей станции «Владимирская», который произошел в октябре 1989 г. «21 октября 1989 г. неожиданно прогнулся и был выдавлен 4-й расстрел, из забоя произошел вывал породы объемом 10-15 м³.

Через час вновь произошел вывал из кровли забоя объемом около 2 м³, а после очередным вывалом породы снесло все крепление кровли, забоя и забутовку. В кровле над 6-м кольцом обделки образовался купол высотой до 7 м с объемом вывала 170 м³» [30]. Опыт измерения нагрузок на конструкцию опережающей крепи подземного сооружения описан в работе [40]: «Нагрузка на крепь от горного давления на 60-е сутки составляла 110 кПа», что для рассматриваемых условий эквивалентно давлению в 0,1 γН. Распределенное давление от веса обрушенных в забое «Владимирской-2» пород по площади забоя равно около 80 кПа, что меньше, чем зафиксированное в исследовании [43]. Несмотря на то, что нагрузки были меньше ожидаемых, произошедшее обрушение разрушило крепь забоя и подвергло сооружения на поверхности риску сверхнормативных смещений.

Таким образом, произведенные расчеты позволили описать произошедшее в 1989 г. обрушение. При этом наблюдается качественная сходимость предполагаемых параметров обрушения. Численная величина может отличаться по причине отсутствия данных об инженерно-геологических параметрах на участке строительства.

Заключение. С использованием предложенной пространственной упругопластической модели с упрочнением выполнен прогноз напряженно-деформированного состояния в массиве нарушенных грунтов. На основании критериев устойчивости и несущей способности сделан прогноз вывалообразования в призабойной зоне тоннеля. Установлены пространственные очертания вывалов и их размеры, которые являются теоретической основой для расчета вертикальных нагрузок на временную крепь забоя в нарушенной зоне.

Численные эксперименты на пространственных упругопластических моделях позволили выявить механизм и закономерности формирования зон предельного состояния по мере приближения к зоне нарушенных грунтов. На поверхности забоя развиваются зоны превышения растягивающих напряжений и формируется поверхность скольжения.

Моделирование элементов конечной жесткости показало динамику изменения устойчивости и параметра SF для различных проектных сценариев вхождения забоя в зону нарушенности. Анализ полученных зависимостей показал, что наибольшая величина SF характерна для участка ненарушенного грунта, а снижение параметра SF происходит по мере приближения к зоне нарушенности во всех проектных сценариях с разной динамикой.

Использование метода итерационного снижения прочностных параметров при оценке устойчивости забоя тоннеля определило формы возможной потери устойчивости. При сопоставлении полученных форм вывала на станции «Владимирская-2» с данными натурных наблюдений установлено качественное согласие формы вывала.

Прогнозная оценка устойчивости и формы потери равновесия на основе упругопластической модели с упрочнением позволит детализировать технологические этапы проведения тоннеля с учетом исторически сформировавшихся за предыдущие стадии проходки напряжений. Предложенный метод оценки устойчивости забоя тоннеля отличается от известных методов учетом объемного напряженного состояния нарушенного грунтового массива, возможностью определения



зон разрушения в забое от действия растягивающих напряжений и предельных состояний при пластическом деформировании.

Результатом использования предложенного метода является качественно сопоставимая форма пространственного очертания вывала и определение величины нагрузок на временную крепь забоя. Это позволяет произвести расчет крепи по схеме заданных нагрузок и рассмотреть множество проектных сценариев в рамках одной прогнозной геомеханической модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахарева Т.С., Жамойда В.А., Зубарев С.Э. и др. Геологический атлас Санкт-Петербурга. СПб: Комильфо, 2009. 57 с.
2. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 1. С. 1-47.
3. Lunardi P. Design and construction of tunnels: Analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS) // Design and Construction of Tunnels: Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soils (ADECO-RS). Leipzig: Springer, 2008. 577 p. DOI: 10.1007/978-3-540-73875-6
4. Michalowski R.L., Drescher A. Three-dimensional stability of slopes and excavations // Geotechnique. 2009. Vol. 59. Iss. 10. P. 839-850. DOI: 10.1680/geot.8.P.136
5. Дашко Р.Э., Власов Д.Ю., Шидловская А.В. Геотехника и подземная микробиота. СПб: Институт «ПИ Геореконструкция», 2014. 280 с.
6. Дашко Р.Э., Шидловская А.В., Панкратова К.В., Жукова А.М. Техногенная трансформация основных компонентов подземного пространства мегаполисов и ее учет в геомеханических расчетах (на примере Санкт-Петербурга) // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 65-70.
7. Власов С.Н., Маковский Л.В., Меркин В.Е. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов. М.: «ТИМР», 2000. 201 с.
8. Anagnostou G. The contribution of horizontal arching to tunnel face stability // Geotechnik. 2012. Vol. 35. Iss. 1. P. 34-44. DOI: 10.1002/gete.201100024
9. Peila D. A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face // Geotechnical and Geological Engineering. 1994. Vol. 12. Iss. 3. P. 145-168. DOI: 10.1007/BF00426984
10. Sitarenios P., Kallivokas G., Prountzopoulos G. et al. Investigation of tunnel face stability and deformation using critical state plasticity // Tunnelling in a challenging environment: Proceedings of the 2nd Eastern European Tunnelling Conference. 2014. Vol. 47. P. 182-192. DOI: 10.1016/j.tust.2014.12.014
11. Протосеня А.Г., Иовлев Г.А. Прогноз напряженно-деформируемого состояния в окрестности подземного сооружения в нелинейно-деформируемых грунтовых массивах // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 2. С. 215-227.
12. Chakeri H., Ozelik Y., Unver B. Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB // Tunnelling and Underground Space Technology. 2013. Vol. 36. P. 14-23. DOI: 10.1016/j.tust.2013.02.002
13. Протосеня А.Г., Беляков Н.А., До Нгок Тхай. Разработка метода прогноза давления пригруза забоя и осадок земной поверхности при строительстве тоннелей механизированными проходческими комплексами // Записки Горного института. 2015. Т. 211. С. 53-62.
14. Broere W. Tunnel face stability & new CPT applications: Doctoral thesis. Amsterdam: Delft Univ., 2001. 208 p.
15. Eshraghi A., Zare S. Face Stability Evaluation of a TBM-Driven Tunnel in Heterogeneous Soil Using a Probabilistic Approach // International Journal of Geomechanics. 2014. Vol. 15. Iss. 6. № 04014095. DOI: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000452
16. Jia-hua Zhang, Wei-jun Wang, Dao-bing Zhang et al. Safe range of retaining pressure for three-dimensional face of pressurized tunnels based on limit analysis and reliability method // KSCE Journal of Civil Engineering. 2018. Vol. 22. Iss. 11. P. 4645-4656. DOI: 10.1007/s12205-017-0619-5
17. Mollon G., Dias D., Soubra A. Probabilistic Analysis of Circular Tunnels in Homogeneous Soil Using Response Surface Methodology // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 2009. Vol. 135. Iss. 9. P. 1314-1325. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000060
18. Prountzopoulos G. Investigation of the excavation face stability in shallow tunnels: Doctoral thesis. Athens, 2012. 452 p.
19. Mustafin M., Bykasov D. Adjustment of Planned Surveying and Geodetic Networks Using Second-Order Nonlinear Programming Methods // Computation. 2021. Vol. 9. № 13. P. 1-17. DOI: 10.3390/computation9120131
20. Карасев М.А. Анализ причин деформации земной поверхности и характер формирования мульды оседания, вызванной строительством транспортных тоннелей // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 163-170.
21. Kavvas M., Prountzopoulos G., Tzivakos K. Prediction of Face Stability in Unsupported Tunnels using 3D Finite Element Analyses // 2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling (EURO, TUN 2009), 9-11 September 2009, Bochum, Germany. Bochum: Aedificatio Publishers, 2009. P. 1-4.
22. Трушко В.Л., Шоков А.Н. Геомеханическое обоснование устойчивости лба забоя выработок большого сечения в протерозойских глинах // Записки Горного института. 2012. Т. 195. С. 146-148.
23. Anagnostou G., Schuerch R. Tunnel face stability and tunnelling induced settlements under transient conditions: Technical report. Zurich, 2016. 181 p.
24. Vermeer P.A., Ruse N., Marcher T. Tunnel heading stability in drained ground // Felsbau. 2002. Vol. 20. № 6. P. 8-18.
25. Беляков Н.А., Карасев М.А. Анализ влияния опережающего крепления лба забоя тоннеля анкерами на развитие геомеханических процессов в породном массиве // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. М.: Академическая наука, 2015. С. 120-127.



26. Лебедев М.О., Карасев М.А. Влияние крепления лба забоя тоннеля на развитие геомеханических процессов в породном массиве // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2016. № 3. С. 24-32.
27. Патент № 2723422 РФ. Способ крепления лба забоя тоннеля / М.О.Лебедев. Опубл. 11.06.20. Бюл. № 17.
28. Oreste P. Evaluation of the tunnel face stability through a ground stress analysis with a hemispherical geometry approximation // American Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 12. № 11. P. 1995-2003. DOI: 10.3844/ajassp.2014.1995.2003
29. Broms B.B., Bennermark H. Stability of clay at vertical openings // Journal of Soil Mechanics & Foundations Division. 1967. Vol. 93. Iss. 1. P. 71-94. DOI: 10.1061/JSFEAQ.0000946
30. Vlasov S.N., Makovskij L.V., Merkin V.E. Accidents in transportation and subway tunnels – construction and operation. Moscow: Elex-KM Publishers, 2001. 200 p.
31. Черданцев Н.В. Геомеханическое состояние массива горных пород вокруг выработки и геологического нарушения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 12. С. 52-58.
32. Черданцев Н.В. Исследование состояния анизотропного массива горных пород в окрестности выработки, пройденной вблизи дизъюнктивного нарушения // Промышленная безопасность и геомеханика. 2017. № 2. С. 34-40.
33. Senent S., Jimenez R. A tunnel face failure mechanism for layered ground, considering the possibility of partial collapse // Tunnelling and Underground Space Technology. 2015. Vol. 47. P. 182-192. DOI: 10.1016/J.TUST.2014.12.014
34. Oreste P. The stability of the excavation face of shallow civil and mining tunnels // Acta Geotechnica Slovenica. 2011. Vol. 8. № 2. P. 57-65.
35. Аннин Б.Д., Коробейников С.Н. Методы теории упругости и пластичности в механике горных пород и геодинамике // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2012. Т. 9. № 1. С. 5-10.
36. Lunardi, P., Bindi R. The evolution of reinforcement of the advance core using fibre-glass elements // Felsbau. 2004. Vol. 22. № 4. P. 8-19.
37. Brinkgreve R.B.J., Bakker H.L. Nonlinear finite element analysis of safety factors // 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, 6-10 May 1991, Cairns, Australia. Rotterdam: Balkema, 1991. P. 1117-1122.
38. Мурзалымов В.М., Каралантарлы Н.М. Решение упругопластической задачи для массива, ослабленного круговой выработкой при действии тектонических и гравитационных сил // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 1. С. 207-216.
39. Weiping Liu, Shaofeng Wan, Xinqiang Song et al. Face Stability Analysis of Shield Tunnel Using Slip Line Method // Mathematical Problems in Engineering. 2019. Vol. 2019. № 5902837. DOI: 10.1155/2019/5902837
40. Pan Q., Dias D. Safety factor assessment of a tunnel face reinforced by horizontal dowels // Engineering Structures. 2017. Vol. 142. P. 56-66. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.03.056
41. Hrubesova E., Duris L. Assessment of tunnel's face support pressure // Building up Efficient and Sustainable Transport Infrastructure 2017 (BESTInfra2017), 21-22 September 2017, Prague, Czech Republic. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017. Vol. 236. № 012074. DOI: 10.1088/1757-899X/236/1/012074
42. Kaihang Han, Chengping Zhang, Wei Li, Caixia Guo. Face Stability Analysis of Shield Tunnels in Homogeneous Soil Overlaid by Multilayered Cohesive-Frictional Soils // Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2016. № 1378274. DOI: 10.1155/2016/1378274
43. Маслак В.А. Опыт обеспечения устойчивости забоя и кровли при строительстве выработок в протерозойских глинах // Записки Горного института. 2009. Т. 183. С. 297-299.

Авторы: А.Г.Протосеня, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-7829-6743> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.В.Алексеев, канд. техн. наук, ассистент, [Alekshev_AV2@pers.spmi.ru](mailto:Alekseev_AV2@pers.spmi.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2581-4433> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), П.Э.Вербилло, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-6776-5866> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.