

УДК 625.122

А. Л. Ланис

Результаты моделирования эксплуатируемых насыпей при напорном инъецировании твердеющих растворов

Поступила	22.05.2018
Рецензирование	29.06.2018
Принята к печати	30.06.2018

Дальнейшее развитие железнодорожного транспорта возможно путем повышения интенсивности движения за счет увеличения веса и количества поездов, скорости их движения. Рост дефектов и деформаций земляного полотна при этом является неизбежным, а вопросы, связанные с усилением грунтов земляного полотна, остаются актуальными. Среди перспективных способов усиления эксплуатируемых железнодорожных насыпей следует выделить напорное инъецирование, позволяющее выполнять работы с минимальным ограничением движения или без него. Повышение качества проектирования усиления зависит от учета особенностей образования дефектов и деформаций земляного полотна, а также вероятностного прогнозирования направлений разрывов грунта при распространении нагнетаемого под давлением раствора. Для решения этих вопросов выполнено численное моделирование с использованием метода дискретных элементов, основанного на уравнениях движения частиц, из которых состоит геосреда, определяемых балансом количества движения и силой взаимодействия между элементами.

В статье представлена модификация метода дискретных элементов, составленные модели, а также результаты моделирования эксплуатируемых насыпей. Рассмотрены особенности образования дефектов и деформаций в результате снижения физико-механических характеристик насыпных грунтовых массивов. Выполнена проверка адекватности полученных результатов путем сопоставления с результатами центрального моделирования устойчивости откосов насыпей, выполненного под руководством профессора Т. Г. Яковлевой в МИИТе. Выявлены особенности процессов, происходящих в земляном полотне при напорном инъецировании твердеющих растворов. Установлено, что на основании вероятностного подхода с использованием модифицированной модели грунтовой насыпи возможно определить направления возникновения разрывов структуры грунта, значения критических давлений при напорном инъецировании твердеющих растворов.

Ключевые слова: *земляное полотно, усиление грунтов, напорное инъецирование, дискретные элементы.*

Мероприятия, в результате которых обеспечивается надежная эксплуатация железнодорожных инфраструктурных объектов, могут быть реализованы при капитальном ремонте или новом строительстве, что требует ограничения движения и приводит к дополнительным экономическим издержкам. Таким образом, одним из приоритетных вопросов является разработка и внедрение способов усиления земляного полотна железных дорог с проведением работ без ограничения движения [1]. К таким способам может быть отнесено напорное инъецирование, а также различные модификации этого метода, основанные на совмещении известных методов армирования и инъецирования [2, 3].

В результате напорного инъецирования твердеющих растворов под давлением, превышающим структурную прочность грунтового массива, образуется несущая геотехногенная структура, включающая затвердевший раствор, уплотненный грунт и грунт естественного сложения. Метод может быть использован для экс-

плуатируемых насыпей и их оснований на железных и автомобильных дорогах [1, 2, 4].

Для эффективного проектирования мероприятий по усилению грунтов земляного полотна необходимо не только точно определить причину возникновения дефектов и деформаций, но и выявить места их зарождения [5], ослабленные зоны [6]. Распространение инъецируемого раствора происходит прежде всего по этим ослабленным зонам. Многолетние исследования показали, что механические характеристики армированного методом напорного инъецирования грунта зависят в первую очередь от объема и свойств затвердевшего раствора. Свойства инъецируемого раствора подбираются путем соотношения вяжущего и заполнителя. Этот вопрос широко рассмотрен в литературе и не требует, по мнению автора, дополнительных исследований. Наибольший интерес представляет напряженно-деформированное состояние грунта до усиления и в окрестности разнообразных по форме включений из затвердевшего раствора

после усиления, а также направление распространения раствора.

Зарождение дефектов и деформаций в эксплуатируемых насыпях, образование разрывов структуры грунтовых массивов, распространение инъецируемого раствора, а также другие подобные внутренние процессы описать классическими математическими приемами не представляется возможным [7]. Несмотря на множество известных теоретических описаний отдельных аспектов поведения сыпучих материалов и грунтов, рассмотренные геотехнические задачи из-за повышенной сложности до сих пор не решены полностью.

Для оценки особенностей происходящих в насыпном массиве процессов деформирования [8] рассмотрены возможности метода дискретных элементов, основанного на уравнениях движения частиц [9, 10], из которых состоит геосреда, определяемых балансом количества движения и силой взаимодействия между элементами [8–11]. На рис. 1 изображена модель грунта, состоящая из отдельных частиц, в идеализированном виде они могут быть представлены шаровой формой (см. рис. 1, б).

Между частицами модели возникает трение F_{tij} , отталкивание F_{nij} и сцепление F_{cij} [8]. Указанные силы отражены в уравнениях движения:

$$m_i \frac{d^2 \vec{r}_{ni}}{dt^2} = \sum_{j=1}^{n_c} (\vec{F}_{nij} + \vec{F}_{tij}) + \sum_{j=1}^{n_c} (\vec{F}_{cij}) + m_i \vec{g}, \quad (1)$$

$$I_i \frac{d^2 \vec{\alpha}_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{n_c} (\vec{F}_{tij} \times \vec{r}_{tij}) + \sum_{j=1}^{n_c} (\vec{F}_{cij} \times \vec{r}_{cij}), \quad (2)$$

где m_i – масса; $\vec{r}_{ni}$ – радиус-вектор центра масс; t – момент времени; $\vec{g}$ – ускорение свободного падения; I_i – момент инерции; $\vec{\alpha}_i$ – угол поворота; $\vec{r}_{tij}$, $\vec{r}_{cij}$ – радиус-векторы.

Сила отталкивания $\vec{F}_{nij}$ по модулю определяется следующим выражением:

$$F_{nij} = \frac{2E_i E_j}{E_i + E_j} \min(r_i, r_j) \delta_{nij}, \quad (3)$$

где E_i , E_j – модули упругости; δ_{nij} – нормальное сжатие шаров.

Сила трения принимается равной

$$\vec{F}_{tij} = -\frac{\vec{v}_{tij}}{|\vec{v}_{tij}|} \min(\operatorname{tg} \varphi_i, \operatorname{tg} \varphi_j) F_{nij}, \quad (4)$$

где $\vec{v}_{tij}$ – скорость по касательной i -го элемента относительно j -го в точке их контакта; φ_i , φ_j – углы внутреннего трения; принимается, что трение действует после разрыва сцепления между элементами на контактах.

Сила сцепления $\vec{F}_{cij}$ возникает между i -м и j -м элементами и по модулю равна:

$$F_{cij} = \begin{cases} 2 \min(r_i, r_j) E_{cij} \delta_{cij}, & \delta_{cij} < \delta_{cij}^*, \\ 0, & \delta_{cij} \geq \delta_{cij}^*, \end{cases} \quad (5)$$

где δ_{cij} – длина виртуальной пружины сцепления; $\delta_{cij}^* = 2 \min(r_i, r_j) \frac{C_{ij}}{E_{cij}}$, $C_{ij} = \min(C_i, C_j)$,

$$E_{cij} = \frac{2 E_{ci} E_{cj}}{E_{ci} + E_{cj}}.$$

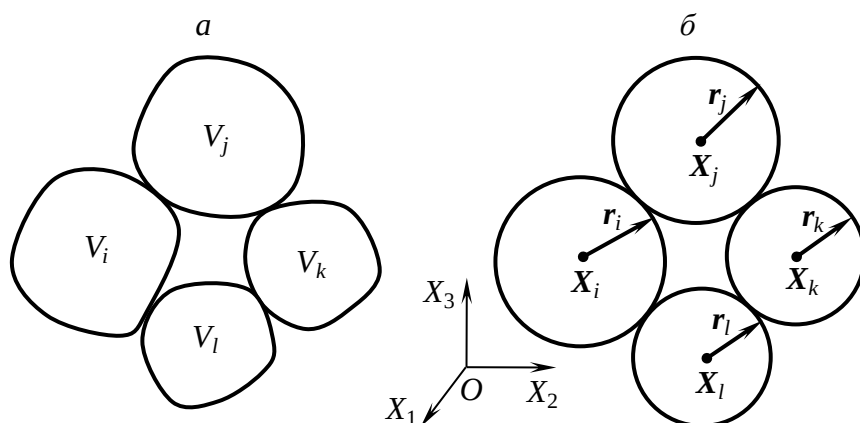


Рис. 1. Модель грунта:
а – фрагмент грунта; б – дискретная модель

В расчетах вместо E_{cij} удобнее использовать параметр $\varepsilon_{cij}^* = \frac{C_{ij}}{E_{cij}}$. В этом случае получим $\delta_{cij}^* = 2 \min(r_i, r_j) \varepsilon_{cij}^*$.

Ситуации, при которых насыпь теряет устойчивость, возможно моделировать в двумерной постановке (2D) [9]. В данном случае под потерей устойчивости насыпи понимается как обрушение массива в окрестности откосов, так и образование трещин на его поверхности.

На рис. 2 показана расчетная область, представляющая собой насыпь, сформированную из дискретных элементов. Сцепление $C_i = C$ является переменной величиной, и его значение конкретизируется при решении задачи. Геометрические параметры насыпи a и α зафиксированы и равны 8 м и 38° соответственно, значение ее высоты h , так же как и значение сцепления C , конкретизируется при решении задачи.

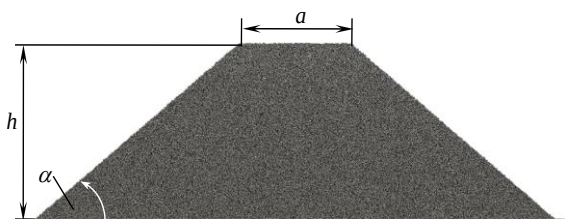


Рис. 2. Схема насыпного грунтового массива

Компьютерное моделирование потери устойчивости грунтовой насыпи проводится следующим образом. Вначале выбирается такое значение сцепления C , при котором насыпь сохраняет устойчивость. Затем последовательным уменьшением величины C достигается ситуация, при которой в некоторых

областях насыпного массива происходит развитие трещин и/или линий скольжения. Найденное таким образом значение C считаем критическим, при котором начинается потеря устойчивости насыпи.

Численные эксперименты показывают, что с увеличением высоты насыпи h растет значение сцепления C , при котором начинается потеря ее устойчивости. На рис. 3 показаны стадии t_0 , t_1 , t_2 развития деформаций в грунтовой насыпи разной высоты. Насыпь высотой 6 м начинает терять устойчивость при $C = 20$ кПа, высотой 9 м – при $C = 25$ кПа и высотой 12 м – при $C = 30$ кПа. При этом характер разрушения и последовательность его проявления на поверхности и внутри насыпного массива для трех рассматриваемых ситуаций являются различными.

В первом случае (см. рис. 3, а), практически одновременно появляются трещины на горизонтальной поверхности насыпи и на ее откосах (стадия t_1). Затем, в процессе дальнейшего деформирования массива, трещины на верхней части его поверхности раскрываются, а на откосах в основном заживают (стадия t_2). Во втором случае (см. рис. 3, б), вначале на горизонтальной поверхности, практически на ее середине, появляется первая трещина (стадия t_1). Далее эта трещина продолжает раскрываться, а внутри массива нарезаются несколько линий скольжения (стадия t_2). В третьем случае (см. рис. 3, в) первые трещины появляются на откосах насыпи, ближе к ее основанию (стадия t_1). При дальнейшем деформировании массива (стадия t_2) около середины верхней горизонтальной части его поверхности нарезается трещина, аналогичная показанной на рис. 3, б.

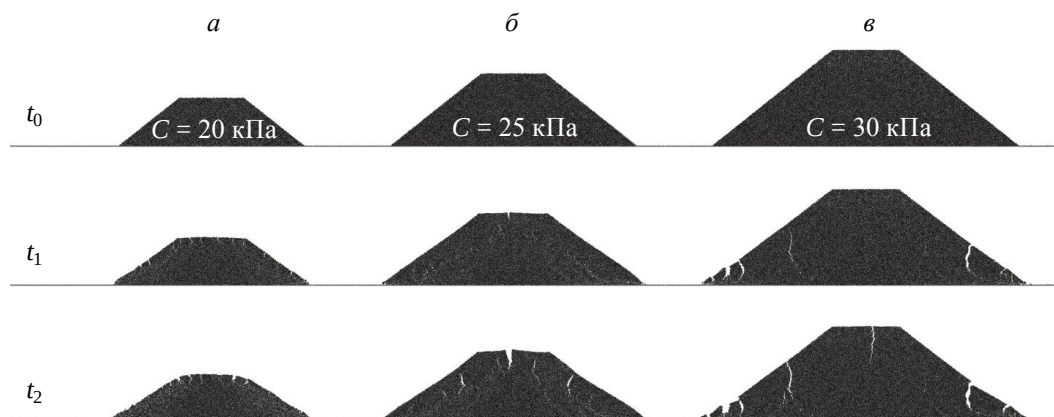


Рис. 3. Развитие деформаций в грунтовой насыпи высотой 6 м (а), 9 м (б) и 12 м (в)

Существенное значение имеет проверка адекватности (достоверности) полученных результатов. Результаты выполненных расчетов методом дискретных элементов могут быть сопоставлены с результатами моделирования устойчивости откосов насыпей, выполненных с использованием центробежного моделирования под руководством профессора Т. Г. Яковлевой в МИИТе [12, 13].

На рис. 4 приведено сравнение результатов, полученных в ходе эксперимента и при компьютерном моделировании. На рис. 4, а представлен вид физической насыпи с углом откосов к горизонту $\alpha = 38^\circ$, моделирующей натурную высотой $h = 9$ м, из легкого пылеватого суглинка при $C = 20$ кПа. Эксперимент проводился методом центробежного моделирования [10]. Нарушение предельного равно-

весия физической модели, подвергшейся действию на центрифуге только объемных сил, начинается с возникновения трещины почти строго по продольной оси модели. Численный эксперимент (см. рис. 4, б) проводился при $C = 25$ кПа, $h = 9$ м. При компьютерном моделировании, так же как и при физическом центробежном моделировании, в центре насыпи на ее поверхности образуется трещина. Помимо нее, внутри массива также развились несколько трещин и линий скольжения.

Схожие результаты получились для насыпи высотой 6 м (рис. 5).

Компьютерное моделирование показало, что характер разрушения и последовательность его проявления на поверхности и внутри насыпного массива существенно зависят от его высоты. При этом зависимость предель-

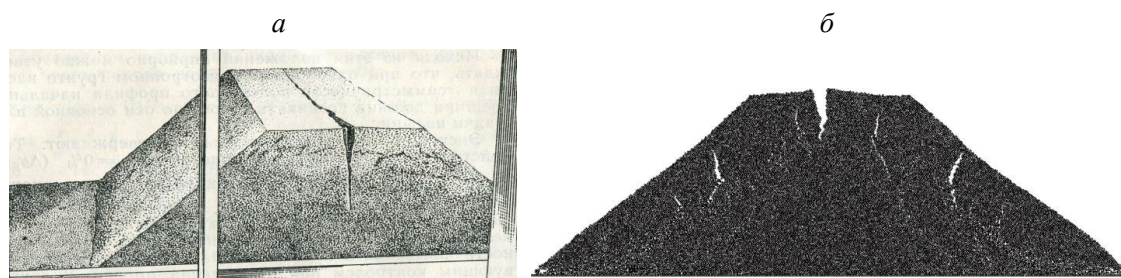


Рис. 4. Образование трещины почти строго по продольной оси модели насыпи в ходе эксперимента (а) и в расчете (б)

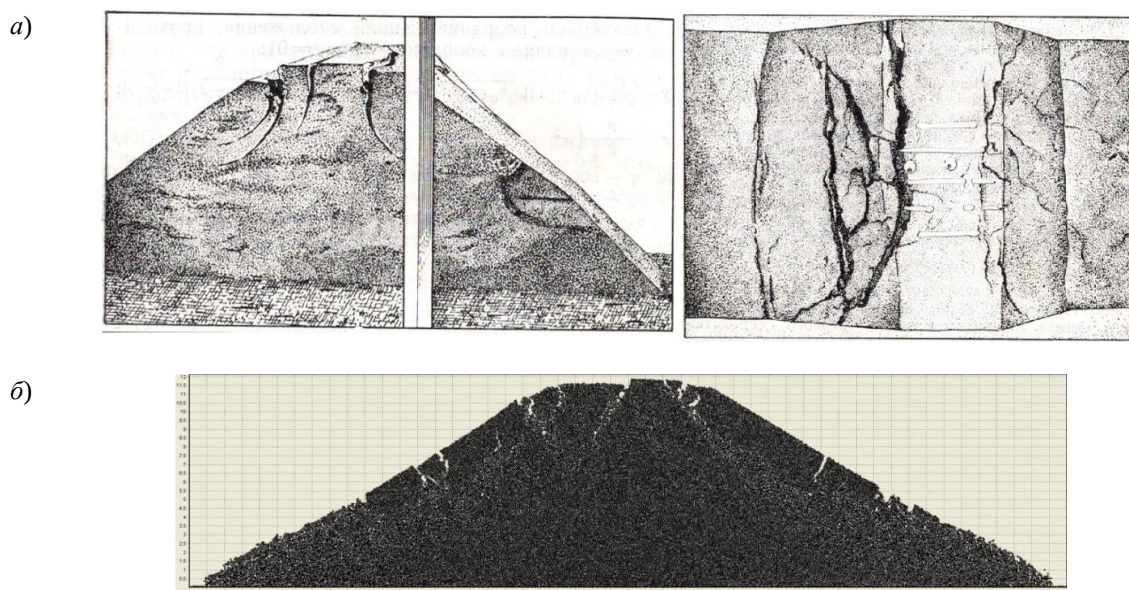


Рис. 5. Образование трещин в моделированной насыпи высотой 6 м в ходе эксперимента (а) и в расчете (б)

ного значения сцепления, при котором начинается потеря устойчивости насыпи, линейная в диапазоне рассмотренных в данной работе значений ее высот от 6 до 12 м.

Сравнение результатов эксперимента, проведенного методом центробежного моделирования, с численными результатами показало их близкую сходимость. Это говорит в пользу того, что с использованием метода дискретных элементов можно успешно решать задачи механики грунтов, связанные с расчетами железнодорожного полотна.

На реальных объектах эти деформации внешне не наблюдаются, так как верх земляного полотна представлен сыпучим материалом балластной призмы, а откосы покрыты балластными шлейфами, растительностью.

Все эти процессы происходят внутри земляного полотна, и их изучение имеет существенное значение для проектирования противодеформационных мероприятий. В то же время известны многочисленные факты образования балластных углублений, деформаций на откосах. Это внешние проявления выявленных в исследовании внутренних процессов.

Следующая задача, решаемая в настоящей работе, связана с процессами, происходящими в земляном полотне при инъецировании твердеющих растворов. На рис. 6 представлена насыпь, имеющая форму трапеции, расположенная в плоскости Oxz . Ее высота h и основания l_0 , l_1 равны 6, 22 и 4 м соответственно. Она сформирована из дискретных элементов Ω_i , $i = 1, 2, \dots, N$. Коэффициент трения сколь-

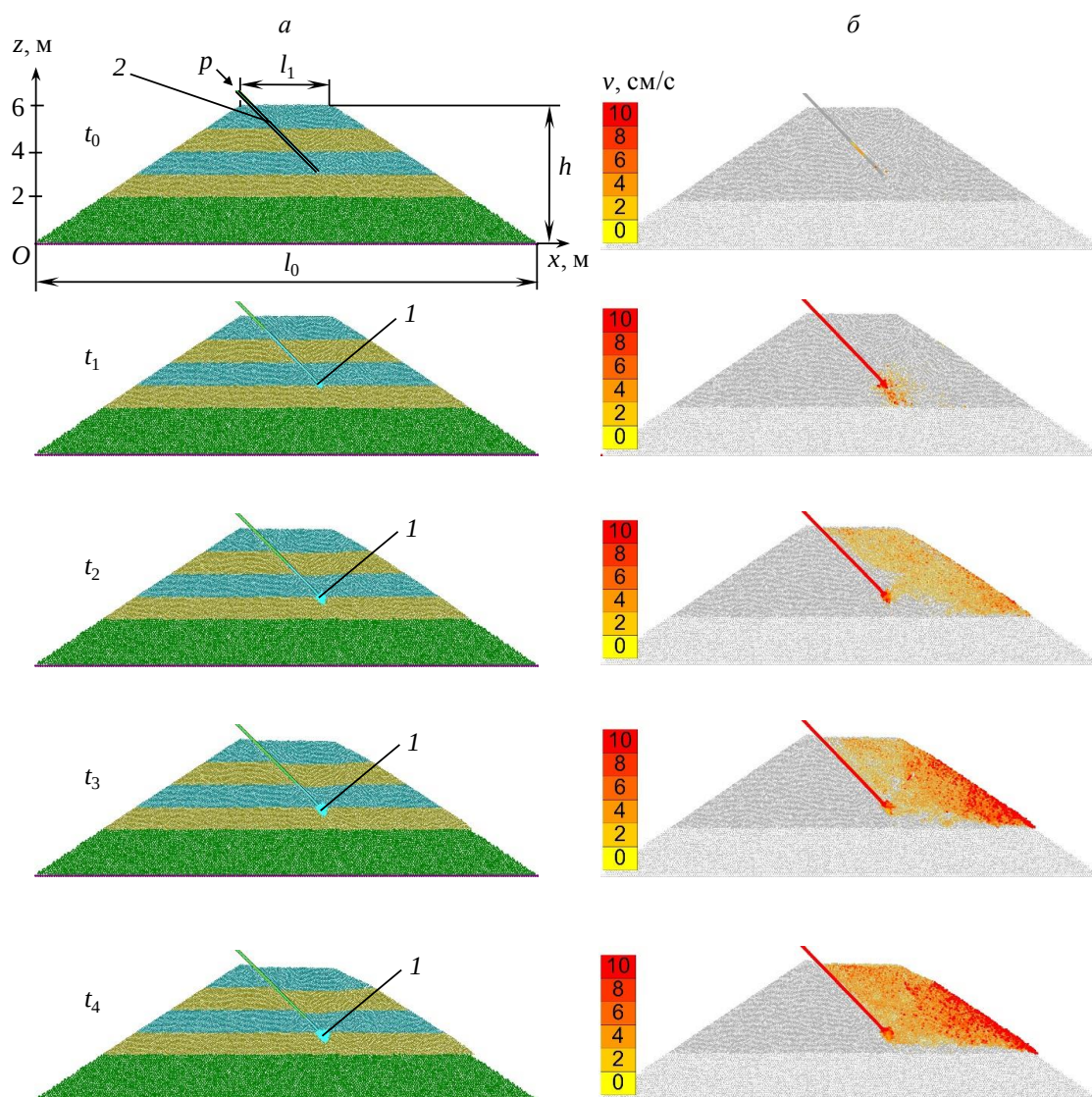


Рис. 6. Стадии t_0 – t_4 инъецирования давлением p раствора 1 через трубу 2 в насыпной массив с характеристиками $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$; $c = 12 \text{ кПа}$:
 a – деформированное состояние; b – поле скоростей

жения по контакту элементов $k = 0,4$, сцепление $C = 12$ кПа, деформация разрушения элемента сцепления $\varepsilon^* = 0,05$. Сила тяжести направлена против оси Oz .

Элементы, образующие нижнее основание насыпи, считаем граничными дискретными элементами (ГДЭ). Обозначим их символом Γ_k ($k = k_1, k_2, \dots, k_n$; n – число ГДЭ). Центры Γ_k расположены на оси Ox . На элементы Γ_k накладываются граничные условия:

$$v_k = (0, 0), \quad \omega_k = 0, \quad (6)$$

где v_k – вектор скорости центра k -го элемента; ω_k – угловая скорость.

Стенки инжектора сформированы также из дискретных элементов. Эти элементы внедряются под углом 45° к верхнему основанию насыпи на глубину 3 м (см. рис. 6). Далее в инжектор под давлением p нагнетаются элементы, моделирующие твердеющий раствор.

На рис. 7 представлены стадии инъектирования. На рис. 7, *а* показаны разрывы деформаций (желтые частицы имеют хотя бы один разрыв сцепления с соседними частицами, у красных частиц все контакты сцепления разрушены). На рис. 7, *б* показаны поля нормальных напряжений к контактам частиц (давление на выходе раствора из трубы варьируется от 2 до 10 МПа).

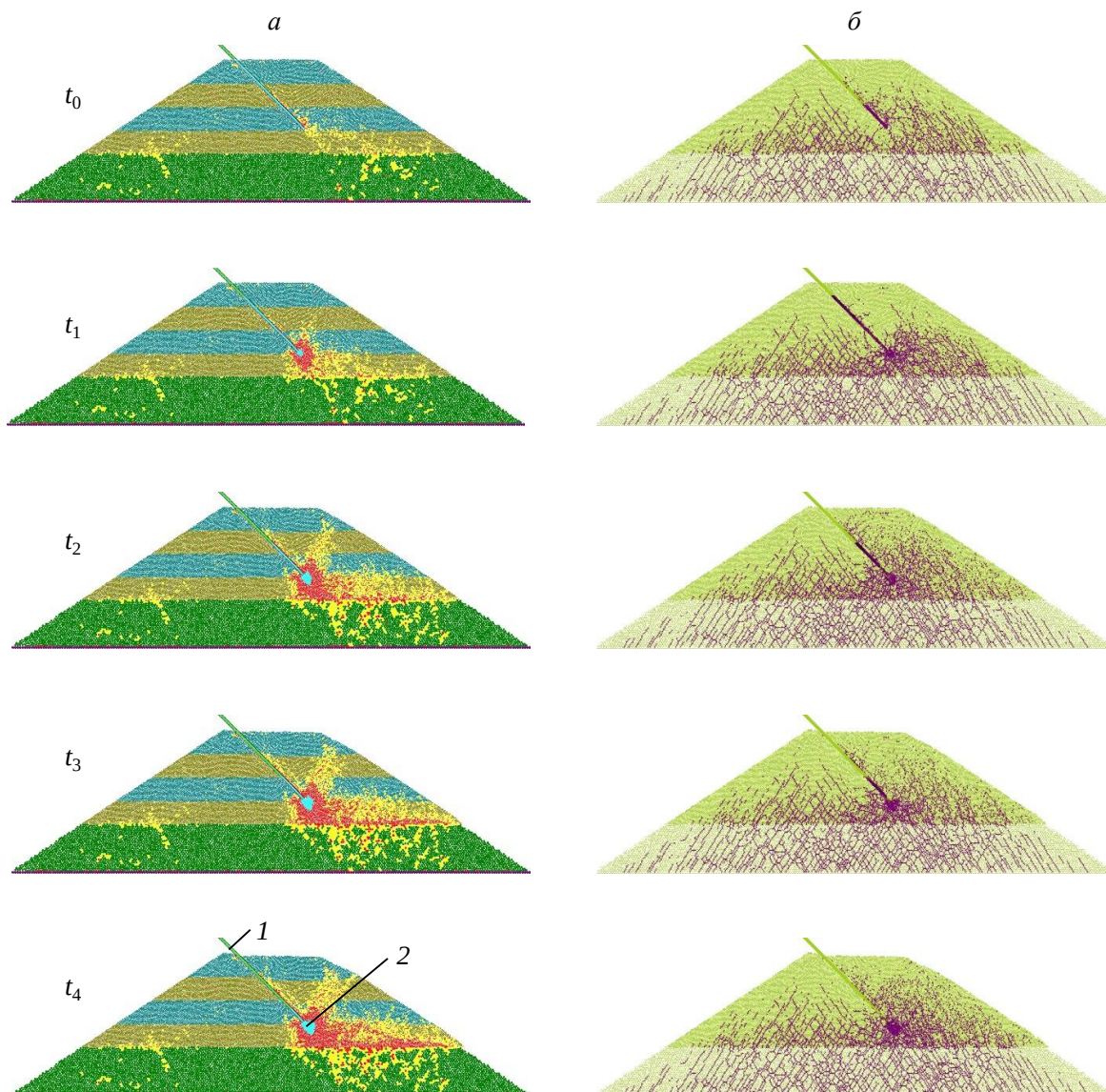


Рис. 7. Стадии t_0 – t_4 инъектирования давлением p раствора 1 через трубу 2 в насыпной массив с характеристиками $\rho = 1\,800$ кг/м³; $c = 12$ кПа:
а – разрывы деформаций; *б* – поля нормальных напряжений к контактам частиц

Анализируя рис. 6 и 7, можно сделать вывод, что в результате вероятностного подхода с использованием модифицированной модели грунтовой насыпи на основании метода дискретных элементов возможно определить направления возникновения разрывов структуры грунта земляного полотна, значения давлений инъецирования. По форме разрывов возможно отследить образование прослоев затвердевшего раствора. Отмечено, что для грунтовых насыпей при инъецировании в определенном диапазоне значений давления происходит поднятие поверхности, склонов, что недопустимо для эксплуатируемого железнодорожного земляного полотна.

В результате выполненных исследований по моделированию работы земляного полотна определены места зарождения ослабленных зон с последующим образованием дефектов и деформаций в насыпи. Отмечено, что выявленные внутренние процессы в насыпях для земляного полотна проявляются внешне только с течением времени в виде балластных углублений и деформаций на откосах. Модифицированная модель грунтовой насыпи на основании метода дискретных элементов, использованная в работе, позволяет имитировать распространение инъецируемого раствора в земляном полотне. При этом возможно получить направления и оптимальные значения давления распространения раствора.

Библиографический список

1. Ланис А. Л. Способы усиления земляного полотна инъецированием // Известия Транссиба. 2016. № 3 (27). С. 117–124.
2. Ланис А. Л., Разуваев Д. А., Ломов П. О. Сопряжение подходных насыпей с мостами и путепроводами // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 2 (48). С. 110–120.
3. Ломов П. О. Определение коэффициента пористости грунта, уплотненного методом раскатки скважин // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6 (59). С. 94–99.
4. Колос А. Ф. Противодинамическая стабилизация железнодорожного земляного полотна путем цементации грунтов основной площадки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.2006. СПб., 2000. 30 с.
5. McHenry M., Rose J. Railroad subgrade support and performance indicators // Research Report KTC-12-02 / FR 136-04-6F. Kentucky, 2012. P. 32.
6. Аитиз Е. С. К стратегии реконструкции дефектного и деформирующегося земляного полотна с целью обеспечения надежной эксплуатации в условиях повышения осевых и погонных нагрузок // Тр. междунар. науч.-практ. конф. М. : МИИТ, 2004. С. II-10–II-11.
7. Ланис А. Л., Разуваев Д. А. Повышение качества усиления грунтовых массивов по результатам геотехнического мониторинга // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 4. С. 5–11.
8. Alam M., Luding S. Rheology of bidisperse granular mixtures via event driven simulations // J. Fluid Mech. 2003. Vol. 476. P. 69–103.
9. Cundall P. A., Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies // Geotechnique. 1979. Vol. 29, № 1. P. 47–65.
10. Хан Г. Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11, № 1. С. 109–114.
11. Ланис А. Л., Хан Г. Н. Численное моделирование нагружения насыпного массива // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 1. С. 55–58.
12. Яковлева Т. Г., Иванов Д. И. Моделирование прочности и устойчивости земляного полотна. М. : Транспорт, 1980. 255 с.
13. Яковлева Т. Г., Виноградов В. В., Фроловский Ю. К. Способы усиления насыпей армогрунтовыми конструкциями // Путь и путевое хозяйство. 1997. № 1. С. 7–10.

A. L. Lanis

The Results of Modeling the Operated Railroad Sub Grades Under the Pressure Injection of Solidifying Grouts

Abstract. Further development of the railway transport is conditioned by increasing its traffic intensity, tonnage and number of trains, speed of their movement. Increasing amount of defects and deformations of the

railroad subgrades is inevitable; thus, the issues related to the subgrades soils reinforcement are urgent. Among promising ways of reinforcing the operated railway subgrades, a pressure injection that allows executing them without or with a minimum restriction of movement must be emphasized. The improvement in reinforcement quality depends on proper consideration of the defect specifics and deformations development, as well as the probabilistic forecasting of the soils fracture direction under the spreading of a pressurized grout. To solve these problems, the numerical modeling with the use of the discrete elements method based on the equations for the motion of particles, which the geologic environment is composed of, determined by the balance of momentum and the interaction force between the elements was carried out.

The article suggests the modification of the discrete elements method, created models, as well as the results of the operated subgrades modeling. The paper also considers specific features of the defects and deformations development as a result of a decrease in the physico-mechanical characteristics of the filled-up soil masses. The obtained results' validity was tested by the comparison with the results of a centrifugal modeling of the sub grades slopes stability, performed under the supervision of the MIIT Professor T. G. Yakovleva. The peculiarities of the processes taking place in the railroad bed under the pressure injection of the solidifying grouts are revealed. On the basis of probabilistic approach and using a modified model of a soil subgrade, it was found, that it was possible to determine the directions of the soil fracture, as well as the critical pressures when injecting the solidifying grout.

Key words: *railroad bed; soils reinforcement; pressure injection; discrete elements.*

Ланис Алексей Леонидович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» СГУПС. E-mail: LanisAL@stu.ru