

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2020, №2, Том 7 / 2020, No 2, Vol 7 <https://t-s.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/11SATS220.pdf>

DOI: 10.15862/11SATS220 (<http://dx.doi.org/10.15862/11SATS220>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Краснов М.А., Горшков Н.И., Юань Ц., Жданова С.М. Особенности напряженно-деформированного состояния систем «выемка – геосреда» и «насыпь – геосреда» в процессе моделирования их возведения (часть II) // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №2, <https://t-s.today/PDF/11SATS220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/11SATS220

For citation:

Krasnov M.A., Gorshkov N.I., Yuan J., Jdanova S.M. (2020). Peculiarities of the stress-strain state of the “excavation – geo-environment” and “embankment – geo-environment” systems in the process of erecting them (part II). *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/11SATS220.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/11SATS220

УДК 72

Краснов Михаил Александрович

ФБГОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Инженер кафедры «Автомобильные дороги»
E-mail: Mike_mail@mail.ru

Горшков Николай Иванович

ФБГОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Профессор кафедры «Автомобильные дороги»
Доктор технических наук, доцент
E-mail: Fem_soft@mail.ru

Юань Цзинвэнь

ФБГОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Аспирантка кафедры «Автомобильные дороги»
E-mail: 444703108@qq.com

Жданова Светлана Мирзахановна

ФБГОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия
Профессор кафедры «Строительства»
Доктор технических наук, профессор
E-mail: mirzahanovna@mail.ru

**Особенности напряженно-деформированного
состояния систем «выемка – геосреда» и «насыпь –
геосреда» в процессе моделирования их возведения
(часть II)**

Аннотация. Выемки и насыпи являются наиболее распространёнными грунтовыми транспортными сооружениями, эксплуатационная надежность и долговечность которых определяется устойчивостью их бортов и откосов. В первой статье рассматриваются особенности напряженно-деформированного состояния и изменения в устойчивости грунтовых транспортных сооружений (выемок) на основе моделирования по сертифицированной программе метода конечных элементов GenIDE32. При моделировании выполнялась послойная экскавация однородного грунта из выемок с конечными геометрическими размерами. В

массиве борта выемки, в поле вектора смещений u_i , возникают слабоизученные явления в виде «кругов вращения» или кратко вихрей. Эти, недавно обнаруженные в модельных опытах явления (Ю.И. Соловьев, 1956), требуют в перспективе детального исследования. Графические результаты выполненных расчетов позволяют увидеть возникновение и развитие зон «пластичности» или предельного состояния в виде зон «сдвига-сжатия», «сжатия-сдвига» и «растяжения». Зоны «сдвига-сжатия» и наоборот показываются в виде заштрихованных под углом крестообразно конечных элементов, зоны «растяжения» показываются в виде заштрихованных вертикально, горизонтально и вертикально, и горизонтально конечных элементов. Эти зоны, в процессе моделирования, вырисовывают в бортах выемок призму оползания с вертикальными и горизонтальными трещинами. Контуры призм оползания хорошо проявляют себя при выводе на экран уровней значений средней относительной объемной деформации ε . Вывод на экран расчетной схемы в двух цветах значений этой величины фиксирует на этом рисунке контуры оползня. Линии скольжения с минимальным значением коэффициента запаса устойчивости $k_{st \min}$ проходят вблизи границ, где значения этой величины равны нулю. На таком рисунке, в верхней части массива, видны места образования вертикальных трещин. В анализе также используются графики траекторий изменения напряженно-деформированного состояния в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ε_{ij} в значимых узлах и конечных элементах, расположенных, в том числе, в местах линий скольжения с $k_{st \min}$. Они дают возможность по графикам деформаций объема и формы увидеть, где находится система с расчетным условием, например, от условия, при котором образовалось тело оползня.

Ключевые слова: выемка; насыпь; грунт; геосреда; напряженно-деформированное состояние (НДС); устойчивость; поверхность скольжения; метод конечного элемента (МКЭ)

Цели и средства решения задач исследования

В конечном итоге, целью этой статьи является продолжение анализа особенностей НДС и устойчивости систем «насыпь – геосреда» в сравнении с системами «выемка – геосреда». В качестве задач исследования остаются те же задачи по изучению явлений и процессов, что решались в **исследовательской задаче №1** [1], но возникающих при последовательном моделировании возведения насыпи из однородного грунта, включая эффект вращения и движения грунта вокруг каких-то точек грунтового массива [2], визуализации образования оползневых тел, трещин и пр.

Средство решения задачи – численное моделирование, выполнялось на основе сертифицированной программы GenIDE32¹, в которой реализованы алгоритмы метода конечных элементов (МКЭ). В расчетах НДС использовалась нелинейная модель грунта на основе ассоциированного закона пластического течения с условием текучести по Кулону-Мору.

В **исследовательских задачах** для систем «насыпь – геосреда» выполнялось моделирование возведения насыпей слоями мощностью 1,10 м. Все геометрические размеры этой системы, а также значения физико-механических параметров грунта были одинаковыми с аналогичными данными системы «выемка – геосреда» **исследовательской задачи №1** (вариант значений параметров грунтов №3). Граничные условия по вектору смещений (условия закреплений) в процессе решения задачи при $h > d_u$ корректировались (d_u – предельное

¹ Программа GenIDE32 для решения прикладных задач геомеханики в строительстве / Горшков Н.И., Краснов М.А. СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ № RA.RU.AB86.H01026, срок действия с 28.06.2017 по 27.06.2020. (www.femsoft.ru).

значение глубины сравниваемой выемки). Коррекция выполнялась для условий b/B и $h/H = \text{const}$, где b – ширина насыпи поверху, B – ширина основания, h – текущая высота сравниваемой насыпи, H – высота основания.

При высоте насыпи $h = d_u = 15,40$ м, а это предельная по устойчивости глубина выемки из исследовательской задачи №1, грунт её откосов также перешел в предельное состояние по устойчивости: $k_{st \min} = 0,99 < [k_{st}] = 1,00$. В отличие от массива грунта бортов выемки, в процессе моделирования насыпи в её массиве и основании не было глубинных квазивихрей, а видны были только их нижние части вблизи поверхностей откосов и основания, рис. 1а.

Здесь необходимо добавить, что квазивихри в системе «насыпь – геосреда» тоже бывают. Они возникают тогда, когда за подошвой насыпи, по разным причинам, например, насыпь на более деформируемом основании, происходит выпор поверхности основания.

Образование оползневоего тела на основе зон «пластичности» в откосах насыпи, рис. 1а, как и в бортах выемки, начиналось с возникновения в верхних частях тела зон «пластичности» «растяжения», рис. 1б.

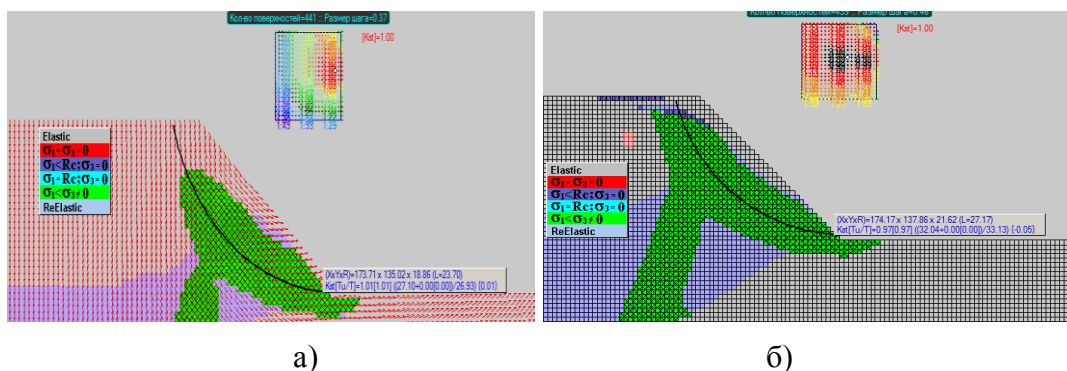


Рисунок 1. Результаты авторских расчетов для систем «насыпь – геосреда» ($h = d_u = 15,40$ м, $1:m = 1:1$, $k_{st \min} = 0,99 < [k_{st}] = 1,00$): а) поле вектора смещений (между последними этапами возведения); б) начало выхода зон «пластичности» (растяжение) на поверхность массива грунтов ($h = 18,70$ м, $1:m = 1:1$, $k_{st \min} = 0,95 < [k_{st}] = 1,00$)

При сравнении видов рис. 6 [1] с рис. 2б можно заметить подобие в расположении и форме зон «пластичности», как «сдвига-сжатия», так и «растяжения». В процессе моделирования выемки и насыпи наблюдались и отличия в образовании зон «пластичности» растяжения, рис. 2. В верхней части откосов насыпи и бортов выемки, над зонами «пластичности» (сдвиг-сжатие: $\sigma_1 < \sigma_3 \neq 0$), образуются зоны «пластичности» растяжения с соотношениями главных напряжений: $\sigma_1 < R_c$; $\sigma_3 = 0$. В то же время в зонах «пластичности» насыпи, нет мест, с условиями растяжения по двум осям: $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$, что наблюдается в бортах выемок. Результаты последовательного образования оползневоего тела на основе возникновения и развития зон «пластичности» в откосе насыпи показаны на рис. 1 и 2. Выход зон «растяжения» на поверхность насыпи произошел при её предельной высоте возведения по устойчивости $h_u = 19,8$ м ($k_{st \min} = 0,97$). Отличием также являются разные по значениям предельные глубины выемки d_u и предельные высоты насыпи h_u .

Вообще, предельные глубины выемок и высот насыпей, определяются несколько позже достижения условия по оценке устойчивости [2]: $k_{st \min} = 1,00 \pm 0,02 \approx [k_{st}] = 1,00$. Предельное состояние соответствующих массивов грунтов по устойчивости определяется после образования и выхода на их поверхности вертикальных трещин, рис. 1г [1] и рис. 2а.

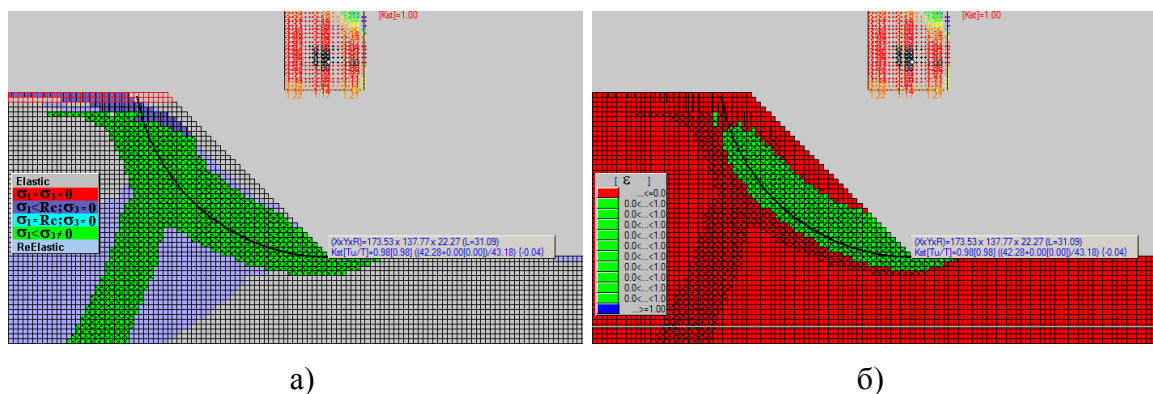


Рисунок 2. Результаты авторских расчетов (насыпь – геосреда, $1:m = 1:1$): а) зоны «пластичности» в поле вектора смещений u_i (от НДС), окончание выхода зон «растяжения» на поверхность насыпи при $h_u = 19,8$ м; б) уровни значений шарового инварианта тензора относительных деформаций ε : ($h_u = 19,8$ м, $1:m = 1:1$, $k_{st\ min} = 0,97$)

В оценке устойчивости всегда была проблема трещины «отрыва» или «закола», глубину которой обозначают [3], как h_{90} или h_{cr} . По выражению проф. Н.Н. Маслова [4]: «Начальная стадия нарушения устойчивости характеризуется появлением на плато за бровкой откоса трещин растяжения («закола»)», рис. 3.

По представлению автора статьи [5], на потенциально оползневом склоне в какой-то момент времени t_1 появляется трещина отрыва (оползневое явление I). В следующий момент времени t_2 на склоне появляются трещины сдвига, ограничивающие в плане будущее оползневое тело (оползневое явление II). В дальнейшем в момент времени t_3 возникает поверхность смещения, отсекающая будущее оползневое тело от массива (оползневое явление III) и наконец, в момент времени t_4 , происходит смещение горных пород с образованием стенки срыва и собственно оползня (оползневое явление IV).



Рисунок 3. Вертикальные трещины за бровкой в грунтовых телах:
а) выемки; б) насыпи с асфальтобетонным покрытием на 451–452 км федеральной автодороги «Лена» (фото С.М. Ждановой)

Авторы статьи [6], выполняя модельные опыты по нагружению основания полосовым штампом, также отметили, что «полностью зона среза грунта визуализируется несколько позже момента достижения предельного состояния».

Также, фактически, зона среза визуализируется при численном решении задачи по нагружению основания полосовыми штампами [7], где отсутствует необходимость

определения или задания формы поверхности скольжения (ПС) и вычисления на ней значения k_{st} , рис. 4.

На графиках зависимости практически любых величин от номера этапа нагружения основания, на последних этапах нагружения штампами, четко наблюдаются изгибы (пики, бухты [8]) при выходе зон «пластичности» на поверхность основания в подножие призмы выпора, рис. 4.

Графики траекторий нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ε_{ij} для КЭ, расположенных на линии скольжения с $k_{st\ min}$ в откосе насыпи имеют более простой вид, чем аналогичные графики, тех же мест, в грунтах борта выемки. В пространстве величин $\sigma_I - \sigma$ это траектории «раздавливания» (рис. 5). До поверхности текучести линии траекторий имеют один наклон, вблизи и вдоль неё другой. Здесь в итерационном процессе конкретный КЭ входит в зону предельного состояния или «пластичности» и наклон траекторий меняется.

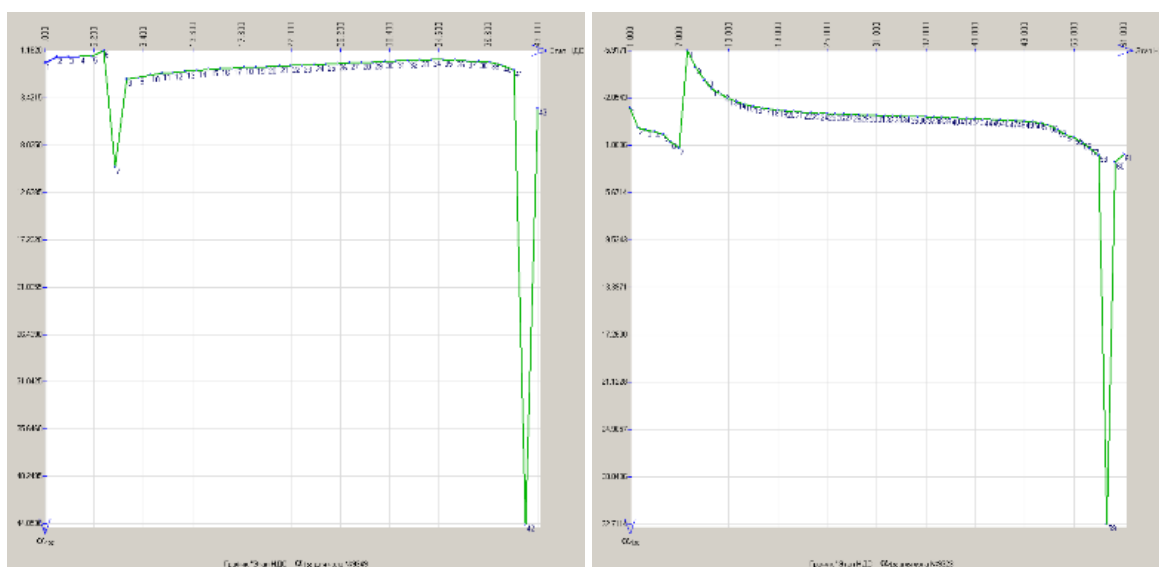


Рисунок 4. Результаты расчетов (насыпь – геосреда) – графики зависимости « α - n » для места выхода ПС на поверхность основания при действии гибкого (слева) и жесткого (справа) штампов ($2\alpha = \arctg(2\tau_{xy} / (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}))$) и n – этапы нагружения)

В пределах длины линии скольжения с $k_{st\ min}$ для систем «насыпь – геосреда» существует два варианта вида графиков траекторий нагружения: первые для зон «пластичности» сдвиг-сжатие (рис. 5а–б), вторые для зон «пластичности» растяжения (рис. 5в,г). Последние два графика, несмотря на малое количество узлов на линиях (этапов возведения), являются сложными, что можно объяснить образованием зон растяжения на последних этапах моделирования возведения насыпи. Как показано в статье [1], для систем «выемка – геосреда» существует три варианта графика траектории нагружения, см. рис. 3 а–б) и рис. 4а и рис. 4б. Для систем «насыпь – геосреда» отсутствуют графики с язычковыми изгибами, см. рис. 4б, отражающие влияние движения квазивихрей₁ и квазивихрей₂, которых нет в этих конкретных системах.

По аналогии с исследованиями, выполненными для статьи [1], см. рис. 9, в других исследовательских задачах №2 и №3, результаты которых представлены в настоящей статье, также рассматривались особенности НДС и устойчивости грунта насыпи для разных значений заложения откосов: $1:m = 1:2$ и $1:m = 1:0,5$, рис. 6.

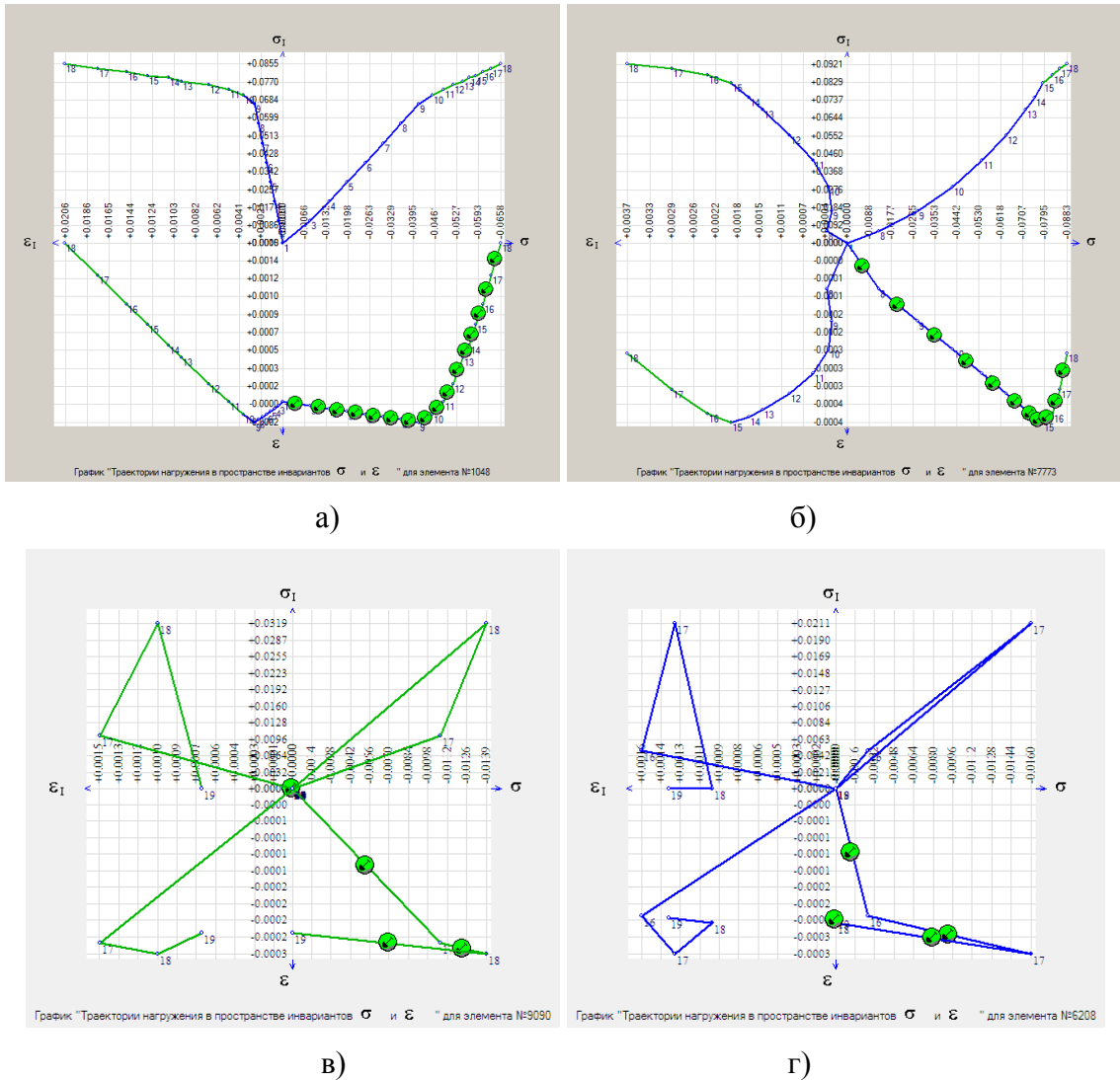


Рисунок 5. Результаты авторских расчетов системы «насыпь – геосреда» – графики траекторий нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} (МПа) и относительных деформаций ϵ_{ij} : а) для КЭ в подножие борта; б) для КЭ, расположенных на линии скольжения в верхней части зон «пластичности» сдвиг – сжатие; в) для КЭ в вершине трещины; г) для КЭ вблизи поверхности насыпи (в начале линии скольжения)

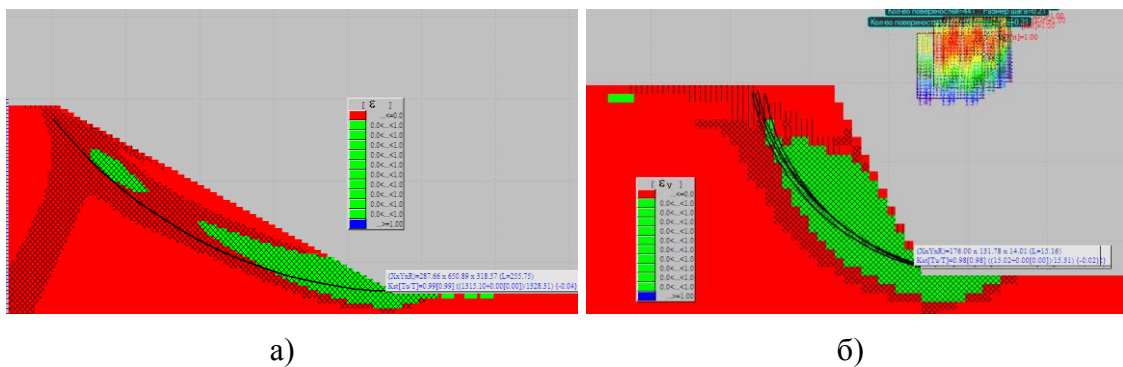


Рисунок 6. Результаты авторских расчетов для систем «насыпь – геосреда» – зоны «пластичности» и уровни значений шарового инварианта тензора относительных деформаций ϵ : $\epsilon \leq 0$. – красная или более темная окраска; $\epsilon > 0$. – зеленая или более светлая окраска: а) 1:m = 1:2, $k_{st \min} = 0,99$; б) 1:m = 1:0,5, $k_{st \min} = 0,98$

С помощью средств интерфейса по нескольким признакам можно определить местоположение основной вертикальной трещины, реально возникающей за бровками бортов выемок и откосов насыпей, рис. 3. Вертикальная штриховка зон «пластичности» на рисунках указывает на их потенциальное местоположение, см. рис. 2а и рис. 6.

На рис. 7 показаны эпюры уровней значений горизонтальных ϵ_{xx} и вертикальных ϵ_{yy} относительных деформаций. Линия скольжения с $k_{st\ min}$ начинается в окрестности мест, где значения выводимых в виде эпюр значений величин меняются с положительных на отрицательные и наоборот. Там же, очевидно, будет находиться и устье основной вертикальной трещины, см. рис. 3. Этот вид эпюр значений таких величин характерен и для систем «выемка – геосреда».

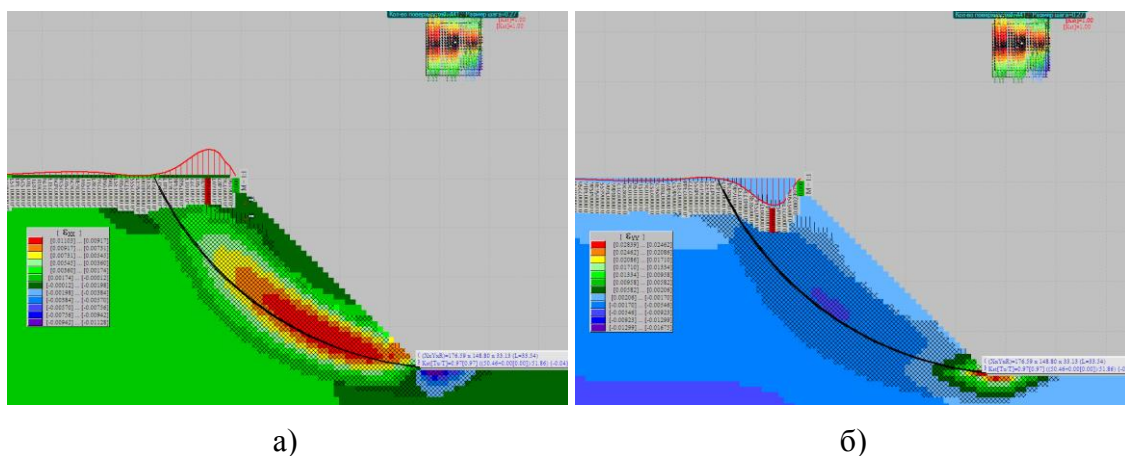


Рисунок 7. Результаты авторских расчетов НДС системы «насыпь – геосреда» – эпюры и уровни значений величин: а) горизонтальных относительных деформаций ϵ_{xx} ; б) вертикальных относительных деформаций ϵ_{yy}

На рис. 8 и 9 показаны поля вектора главных напряжений в виде двух его компонент σ_1 и σ_3 в массивах выемки и насыпи. Вывод рисунков для выемки произошел после 12-го этапа экскавации при выходе зон «растяжения» на поверхность её борта, для откоса насыпи это произошло после 16-го этапа возведения, также, при выходе зон «растяжения» на его поверхность (см. рис. 2б).

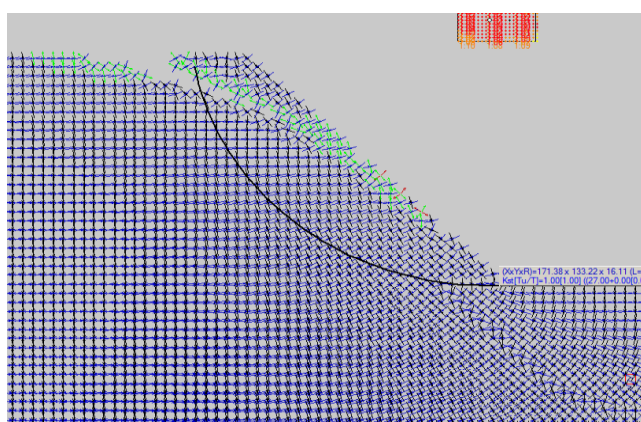


Рисунок 8. Результаты расчетов (автор Н.И. Горшков) – поле вектора главных напряжений σ_1 и σ_3 в выемке

Показанные на рисунках темным синим цветом вектора главных напряжений являются сжимающими напряжениями в узлах сетки разбивки. Другие цвета векторов, более светлые, красный и зеленый, указывают на действие в узлах растягивающих напряжений. Отсутствие в узлах верхних частей этих грунтовых сооружений векторов σ_1 и σ_3 , указывает на то, что их

значения в этом месте равны нулю. В реальной геологической среде, в таких местах, образуются вертикальные трещины, одна или несколько, рис. 10, 11.

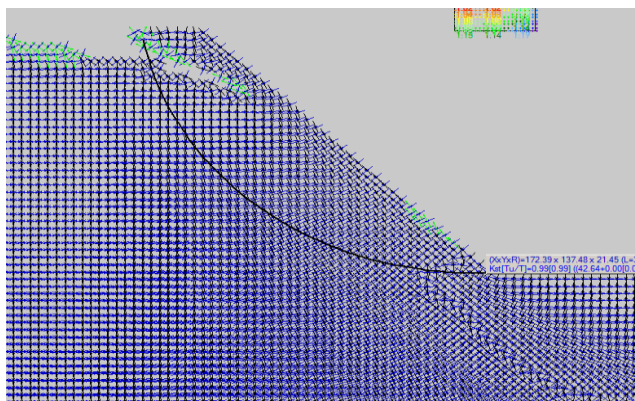


Рисунок 9. Результаты расчетов
(автор Н.И. Горшков) – поле вектора главных напряжений σ_1 и σ_3 в насыпи



Рисунок 10. Трещины на поверхности обездвиженной грунтовой дороги за бровкой глубокой выемки, расположенной на 451–452 км федеральной автодороги «Лена» (фото С.М. Ждановой)



Рисунок 11. Вид грунтового массива за левой бровкой глубокой выемки на 451–452 км федеральной автодороги «Лена» (фото С.М. Ждановой)

По результатам выполненных исследований для принятых расчетных схем и модели грунта можно сделать следующие краткие выводы:

1. Технологические особенности устройства грунтовой насыпи и схемы загрузки основания, определяют процесс формирования в них полей напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ε_{ij} .
2. В массиве насыпи и в основании характерно отсутствие, кроме некоторых исключений (см. текст статьи), кругов «вращения».
3. Оползневые тела в откосах насыпи образуются в зонах «пластичности», сначала это зоны «сдвига с сжатием» или наоборот, затем над этими зонами появляются зоны «растяжения», которые затем выходят на горизонтальную поверхность массива за её бровкой и завершают образование призмы оползания.
4. Призма оползания и вертикальные трещины в откосах насыпи хорошо выделяются при выводе на экран уровней значений шарового инварианта тензора относительных деформаций ε , см. рис. 2б и 6.
5. В крутых откосах насыпи, как и в бортах выемки, не образуется нижний отросток зон «пластичности», см. рис. 6б, а в более пологих образуется, см. рис. 2б и 6а; практическое знание местоположения и размеров отростков может быть полезно при изучении процессов выветривания грунтовых массивов и при назначении противооползневых мероприятий, например, анкеров [9].
6. В пределах длины линии скольжения с $k_{st\ min}$ для систем «насыпь – геосреда» существует два варианта вида графиков траекторий нагружения: первые для зон «пластичности» сдвиг-сжатие (рис. 5а–б), вторые для зон «пластичности» растяжения (рис. 5в,г).

Кроме этого, анализ значений конечных результатов расчетов показал, что напряженное состояние однородных и геометрически одинаковых откосов выемки и насыпи примерно одинаковое, а деформированное состояние разное [10], что очевидно и влияет на конечные результаты значений критических величин: $h_u \geq d_u$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горшков Н.И., Краснов М.А., Юань Ц., Жданова С.М. Особенности напряженно-деформированного состояния систем «выемка – геосреда» и «насыпь – геосреда» в процессе моделирования их возведения (часть I) // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №2, <https://t-s.today/PDF/10SATS220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/10SATS220.
2. Федоровский В.Г. О коэффициентах запаса / В.Г. Федоровский, С.Г. Ильин // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. №2. С. 2–7.
3. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов / Пер. с англ. В.С. Забавина; Под ред. В.Г. Мельника. М., Стройиздат, 1988. 240 с.
4. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними). Учеб. Пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1977. 313 с.
5. Хоситашвили Г.Р. Оползень – грозное явление природы / ГеоРиск. 2007. №12. С. 33–35.
6. Копейкин В.С. Разрушение песчаного грунта в основании при нагружении полосовым штампом / В.С. Копейкин, В.М. Демкин, А.С. Саенко, С.А. Елизаров / Исследование и расчеты оснований и фундаментов в нелинейной стадии работы. Межвузовский сборник г. Новочеркасск, изд. НПИ. 1986. С. 121–125.
7. Горшков Н.И. Способ оценки несущей способности основания и устойчивости системы «штамп-основание» на основе МКЭ / Н.И. Горшков, М.А. Краснов / Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. №3(18). С. 141–150.
8. Соболев Г.А. Физика землетрясений и их предвестники / Г.А. Соболев, А.В. Пономарев; Отв. Ред. В.Н. Страхов. М.: Наука, 2003. 270 с.
9. Гинзбург, Л.К. Противооползневые удерживающие конструкции. М., Стройиздат, 1979. 80 с.
10. Горшков Н.И. Сравнительная оценка напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений (выемки и насыпи) на основе МКЭ / Н.И. Горшков, М.А. Краснов // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. №5(238). С. 4–11.

Krasnov Mikhail Aleksandrovich

Pacific national university, Khabarovsk, Russia
E-mail: Mike_mail@mail.ru

Gorshkov Nikolay Ivanovich

Pacific national university, Khabarovsk, Russia
E-mail: Fem_soft@mail.ru

Yuan Jingwen

Pacific national university, Khabarovsk, Russia
E-mail: 444703108@qq.com

Jdanova Svetlana Mirzaxanovna

Far-Eastern state transport university, Khabarovsk, Russia
E-mail: mirzahanovna@mail.ru

Peculiarities of the stress-strain state of the “excavation – geo-environment” and “embankment – geo-environment” systems in the process of erecting them (part II)

Abstract. Excavations and embankments are the most common ground transport structures, operational reliability and durability of which is determined by the stability of their sides and slopes. The first article deals with the features of stress-strain state and changes in stability of ground transport structures (excavations) based on modeling according to the certified program of finite element method GenIDE32. At modeling the layer-by-layer excavation of homogeneous soil from excavations with finite geometrical sizes was carried out. In the excavation edge array, in the field of displacement vector u_i , appeared are poorly studied phenomena in the form of "rotation circles" or short vortices. These phenomena, discovered in model experiments (Yu.I. Soloviev, 1956), require detailed research in the future. Graphic results of the calculations performed allow one to see the appearance and development of zones of "plasticity" or limit state in the form of zones of "shift-compression", "compression-shift" and "stretching". Shift-compression zones and vice versa are shown as shaded finite elements at an angle crosswise, while stretch zones are shown as shaded vertically, horizontally and vertically, and horizontally finite elements. These zones, in the process of modeling, are drawn in the edges of the projections of a slide with vertical and horizontal cracks. The contours of the landslide prisms show themselves well when the average relative volume deformation values of ε are displayed on the screen. The display of this value in two colors defines the landslide contours in this figure. Sliding lines with the minimum value of the stability coefficient $k_{st\ min}$ pass near the borders, where values of this parameter are equal to zero. In this figure, in the upper part of the array, you can see the places where vertical cracks are formed. The analysis also uses graphs of stress-strain state trajectories in the space of stress tensor invariants σ_{ij} and relative deformations ε_{ij} in significant nodes and finite elements, located, including, in places of sliding lines with $k_{st\ min}$. They make it possible to see from the volume and shape deformation graphs where the system with the calculated condition is located, for example, from the condition at which the body of the landslide was formed.

Keywords: excavation; embankment; ground; geo-environment; stress-strain state (SSS); stability; sliding surface; finite element method (FEM)

REFERENCES

1. Gorshkov N.I., Krasnov M.A., Yuan J., Jdanova S.M. (2020). Peculiarities of the stress-strain state of the “excavation – geo-environment” and “embankment – geo-environment” systems in the process of erecting them (part I). *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/10SATS220.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/10SATS220zю
2. Fedorovskiy V.G., Il'in S.G. (2015). About reserve factors. *Foundations, foundations and soil mechanics*, 2, pp. 2–7 (in Russian).
3. Khuan Ya.Kh. (1988). *Earth slope stability*. [Russ. ed.: Ustoychivost' zemlyanykh otkosov. Authorized transl. by V.S. Zabavin; Ed. by V.G. Mel'nik. Moscow: Stroyizdat, p. 240].
4. Maslov N.N. (1977) *Mekhanika gruntov v praktike stroitel'stva (opolzni i bor'ba s nimi)*. Uchebnoe Posobiye dlya vuzov. [Soil mechanics in construction practice (landslides and the fight against them). Textbook Manual for universities.] Moscow: Stroyizdat, p. 313.
5. Khositashvili G.R. (2007) A landslide is a formidable natural phenomenon. *GeoRisk*, 2007 No 12, pp. 33–35.
6. Kopeikin V.S., Demkin V.M., Saenko A.S., Elizarov S.A. (1986) Destruction of sandy soil in the base when loading with a strip stamp. *Issledovaniye i raschety osnovaniy i fundamentov v nelineynoy stadii raboty. Mezhvuzovskiy sbornik g. Novochoerkassk* [Research and calculations of foundations and foundations in the non-linear stage of work. Interuniversity collection Novochoerkassk] pp. 121–125.
7. Gorshkov N.I., Krasnov M.A. (2010) A method for assessing the bearing capacity of the base and the stability of the stamp-base system based on the FEM. *Bulletin of the Pacific State University*, 2010. No 3, pp. 141–150.
8. Sobolev G.A. Ponomarev A.V. (2003) *Fizika zemletryaseniy i ikh predvestniki*. [Physics of earthquakes and their precursors.] Moscow: Nauka, p. 270.
9. Ginzburg, L.K. *Protivoopolznevyye uderzhivayushchiye konstruktsii*. [Landslide holding structures.] Moscow: Stroyizdat, p. 80.
10. Gorshkov N.I., Krasnov M.A. (2011). Comparative evaluation of the stress-strain state of soil structures (excavations and embankments) based on the FEM. *Structural mechanics and calculation of structures*, 5(238), pp. 4–11 (in Russian).