

УСТОЙЧИВОСТЬ АРМИРОВАННЫХ НАСЫПЕЙ

Одним из вариантов современных решений, направленных на повышение устойчивости насыпей автомобильных дорог, расположенных на основаниях из слабых грунтов, является армирование их тела геоматериалами (георешетками, геосетками, геотканями и т.п.).

Н.И. Горшков, М.А. Краснов,
к.т.н., доцент, инженер кафедры
«Мосты, основания и фундаменты»
(Тихоокеанский государственный
университет, г. Хабаровск)

Для проектирования тела армированных насыпей транспортных сооружений разработаны специальные методики, которые включают в себя расчеты по оценке:

- несущей способности грунтов основания и армирующих элементов;
- устойчивости системы насыпь – основание.

Действующие методики расчета используют результаты решения задач теории упругости (определение напряжений), предельного состояния (оценка несущей способности и устойчивости), а также результаты численных методов расчета на основе доступных программных продуктов. В каждой методике в принимаемых расчетных схемах системы введены свои допущения и упрощения.

Некоторые из этих методик положены в основу пособия [1], другие приводятся в монографиях [2, 3] и авторских статьях научно-технических журналов, например [4, 5].

Ниже рассматриваются особенности проектирования тела автомобильных дорог на слабых основаниях с использованием программного средства GenIDE32, которое разработано на основе метода конечных элементов (МКЭ) и предназначено для решения прикладных задач геомеханики [6].

ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ, АНАЛИЗА И ОЦЕНОК НДС СИСТЕМЫ НАСЫПЬ – ОСНОВАНИЕ

Схема решения задачи по определению напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов системы сооружение – геосреда выглядит следующим образом:

– определение начального НДС природного или геотехногенного массива грунтов;

– последовательное моделирование устройства элементов конструкции автомобильной или железной дороги в насыпи, выемке или их производных;

– моделирование приложения нагрузки от транспортных средств.

На каждом этапе моделирования средствами развитого интерфейса программы выполняются анализ и оценка НДС элементов системы согласно указаниям и требованиям действующих нормативных документов.

Для учета арматуры в программе используются приведенные одномерные конечные элементы (КЭ) сжатия-растяжения.

В расчетах НДС используется нелинейная модель грунта на основе ассоциированного закона пластического течения с условием текучести по Кулону – Мору [7]. В этой модели, широко применяемой в расчетах грунтовых оснований и массивов грунтов с середины 70-х годов XX века, используются всего четыре параметра грунта: E – модуль упругости (деформации), ν – коэффициент Пуассона, c – удельное сцепление, φ – угол внутреннего трения. Они определяются при испытаниях грунтов в стандартных геотехнических приборах.

Эта модель удовлетворительно предсказывает несущую способность оснований инженерных сооружений, а также их устойчивость.

Анализ НДС элементов системы выполняется на основе развитых средств интерфейса GenIDE32: фактов возникновения и развития зон «пластичности» или предель-

ного состояния; изолиний, уровней и эпюр значений вычисляемых величин; а также результатов мониторинга таких величин в виде пользовательских графиков зависимостей, например « σ_{ij} – u_i », в значимых для анализа и оценки НДС конечных элементах и узлах.

Оценка элементов системы по прочности, несущей способности и устойчивости по произвольным поверхностям скольжения производится по следующему стандартному условию [8]:

$$F \leq \gamma_c F_u / \gamma_n, \quad (1)$$

Где F – расчетная нагрузка на основание; F_u – сила предельного сопротивления основания; γ_c – коэффициент условий работы; γ_n – коэффициент надежности по назначению сооружения.

Численными значениями величин F или F_u могут быть компоненты тензора напряжений, их инварианты, условия прочности, усилия (компоненты вектора сил, моментов), расчетные сопротивления (давления), отражающие прочность, несущую способность и устойчивость отдельных конструктивных элементов, конструкции в целом или ее основания, и др.

Оценка устойчивости модели системы, кроме как по условию (1), может быть выполнена и на основе другого стандартного условия, например [9]:

$$k_{st} \geq [k_{st}], \quad (2)$$

где k_{st} – расчетное значение коэффициента запаса устойчивости, $[k_{st}]$ – его нормированное (требуемое) значение.

В программе используются семь методов оценки устойчивости, выбор которых определяется специ-

фическими условиями проектирования инженерных сооружений в разных отраслях строительства.

Коэффициент запаса устойчивости k_{st} модели системы при предположении потери ее устойчивости по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения вычисляется по стандартной формуле, записанной в общем виде:

$$k_{st} = M_u / M, \quad (3)$$

где, M_u и M – моменты предельных реактивных и активных сил, вид которых определяется на основе авторских методик оценки устойчивости, например, К. Терцаги, Г.М. Шахунянца, Г. Крея, А. Бишопа и др.

Коэффициент запаса устойчивости k_{st} модели системы с арматурой в виде геотекстилей, георешеток и т.п. вычисляется по следующей формуле:

$$k_{st} = (M_u + \sum N_i y_i) / M, \quad (4)$$

где, $\sum N_i y_i$ – суммарный момент от нормальных сил N_i , действующих в геоматериалах (георешетках, геотекстилях и др.), в месте их пересечения с поверхностью скольжения (y_i – расстояния от места приложения сил до центра вращения или плечи сил с учетом деформации арматуры; для методов КЦПС $y_i = R$).

Силы, возникающие в арматуре, являются удерживающими, и поэтому в уравнении (4), в отличие от методики литературы [1], они учитываются в числителе.

Оценка несущей способности арматуры и устойчивости армированной системы на действие предельных усилий в арматуре производится на основе следующих неравенств:

$$N \leq N^* \quad (5)$$

и

$$k_{st}^* = (M_u + \sum N_i^* y_i) / M \geq [k_{st}], \quad (6)$$

где, k_{st}^* – предельно возможный расчетный минимальный коэффициент запаса устойчивости, найденный поиском; N и N_i^* – расчетное и предельное значения усилия в материалах арматуры.

Нарушение первого условия (5) при выполнении второго (6), как и одновременное нарушение двух условий, может привести к потере устойчивости системы.

На экран компьютера выводятся как значения k_{st} (в скобках значение k_{st}^*), так и значения числителя (сумма моментов, включая момент от сил, действующих в арматуре) и знаменателя формул (4 и 6). Там же выводится и дефицит (профицит) усилий, а по величине дефицита в первом приближении выбирается номенклатура арматуры.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ НАСЫПЬ – ОСНОВАНИЕ

Ниже рассматриваются результаты расчетов по оценке несущей способности и устойчивости автомобильной дороги в насыпи (участок длиной 10 км).

Проектируемый участок автомобильной дороги с максимальной высотой насыпи $h=20$ м проходил по территории, верхняя часть которой до глубин 6...20 м сложена слабыми грунтами: илами суглинистыми текучепластичными и текучими, суглинками текучепластичными.

Тело земляного полотна возводилось из местного щебенисто-дресвяного грунта с супесчаным заполнителем. Обломки представлены в основном алевритами.

По первоначальному проекту (1990-е годы) участки неармированной насыпи разной высоты были запроектированы с контрбанкетами шириной от 5 до 10 м. По просьбе заказчика строительства дороги в 2001 году была выполнена оценка устойчивости запроектированной системы по GenIDE32. Анализ результатов оценки показал, что устойчивость насыпи этой конструкции может быть обеспечена только устройством контрбанкетов шириной от 15 до 60 м.

В 2005 году начал реализовываться проект, согласованный проек-

тым институтом с заказчиком, в котором насыпи были запроектированы с шириной контрбанкетов от 5 до 15 м.

В августе 2005 года на одном из участков строившейся дороги произошла потеря устойчивости системы. Процесс потери несущей способности грунта основания сопровождался возникновением валов выпирания, образованием широких продольных трещин (0,5...1 м) и односторонним ступенчатым разрушением тела насыпи. Строительство дороги было остановлено. На этом участке были выполнены дополнительные инженерно-геологические изыскания.

По GenIDE32 было выполнено моделирование возведения насыпи на этом участке с новыми данными по параметрам грунтов и инженерно-геологическому строению. Результаты моделирования, как и в 2001 году, были однозначными: система должна была потерять устойчивость.

К 2006 году был разработан проект реконструкции этого участка дороги. В основу проекта были положены следующие соображения:

- учесть то, что уже сделано и природой, и строителями;
- армировать тело насыпи высокопрочной тканью;
- для участков насыпи высотой более 6 м устраивать контрбанкеты шириной 10...20 м.

Как отмечалось выше, половина тела насыпи в результате ступенчатого разрушения состояла из нескольких погруженных в слабое основание структур, разделенных широкими трещинами.

Существующий опыт проектирования новых насыпей на слабых основаниях изначально предполагает размещение арматуры в их нижних частях.

Для увеличения жесткости образовавшихся структур, являвшихся основой будущей насыпи, предлагалось понизить их высоту, перемещая материал насыпи за пре-

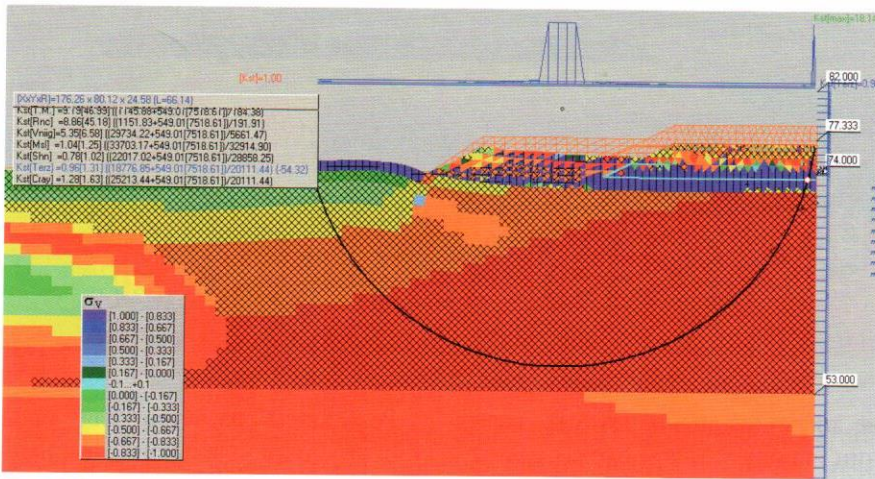


Рис. 1. Результаты расчета после седьмого этапа возведения насыпи; уровни параметра вида НДС на деформированной сетке разбивки $k_{st}[Terz]_{min}=0,96(1,31)>[k_{st}]=1,30$

делу существовавших подножий – создавая контрбанкеты. Высота насыпи в ее центральной части понижается до 1... 2 м.

После выполнения планировочных работ на поверхность грунта укладывается геоткань с анкерующими частями. Далее производится послойное возведение насыпи с контрбанкетами до проектных отметок.

Геомеханическая модель системы с геометрическими размерами ее основных элементов представлена на рис. 1. Вертикальные отметки бровок, подножий насыпи и контрбанкетов завышены на величину предполагаемого вертикального смещения этих точек (около 2,00 м).

Расчет НДС элементов системы производился в следующей последовательности:

- 1) определение начального НДС;
- 2) моделирование возведения насыпи в пять слоев (на момент потери несущей способности);
- 3) моделирование перемещения грунта верхней части насыпи (операция «экскавация» и понижение ее высоты до 2 м);
- 4) моделирование увеличения ширины контрбанкетов (операция «насыпь» за счет перемещенного грунта);
- 5) моделирование устройства геоткани в основании тела насыпи и в контрбанкетах;

б) моделирование возведения насыпи и контрбанкетов до проектной отметки.

В расчетах был принят нормированный (требуемый) коэффициент запаса устойчивости, равный $[k_{st}]=1,30$.

Все оценки устойчивости выполнялись на деформированной сетке разбивки. В этом случае для проектной высоты насыпи автоматически учитываются как собственный вес грунта погруженной в основание нижней части насыпи, так и увеличение длины дуги поверхности скольжения за счет этого погружения.

В 2006 году начал реализовываться новый проект, и снова в августе 2006 года на том же участке строительства произошла потеря устойчивости насыпи.

Запроектированный в качестве усиления нижней части насыпи материал Stabilenka 300 испытал разрыв, что привело к потере устойчивости – образованию трещины по центральной оси насыпи, повороту половины насыпи, а также к выпору поверхности ила за ее подножием.

В отличие от 2005 года, при разрушении насыпи образовались всего две структуры, одна из них с поворотом, что говорит о жесткости армированной насыпи. Кроме этого, поверхность повернувшейся части осталась ровной.

Создавшаяся ситуация была серьезно проанализирована.

Необходимо было ответить на один вопрос: какая причина вызвала потерю несущей способности высокопрочной геоткани?

Для выяснения причин разрушения необходимо было рассмотреть историю и особенности возведения насыпи в проектом и реконструируемом вариантах.

Как уже дважды отмечалось выше, процесс потери устойчивости насыпи в августе 2005 года сопровождался образованием нескольких продольных трещин в ее материале с раскрытием от 0,5 до 1 м (поверху). В нижней части насыпи, погруженной в слабые грунты на 1,5...2 м, эти трещины в процессе образования были заполнены водонасыщенными текучими илами, потерявшими структурную прочность.

Проект реконструкции 2006 года предполагал использование этой нижней части насыпи с возвышением на 1 м выше поверхности массива грунта в качестве основы для последующего возведения на ней новой, уже армированной насыпи с контрбанкетами.

Таким образом, нижняя часть насыпи не была однородной, а состояла из нескольких более или менее жестких структур, разделенных вертикальными и наклонными прослоями илистых текучих грунтов.

При возведении новой насыпи, армированной одним слоем геоткани Stabilenka 300, вершины вертикальных трещин-прослоев достигали нижней поверхности геоткани, и она прогибалась в ил под действием все возрастающей нагрузки от собственного веса строящейся насыпи. В местах ее резкого изгиба концентрировались напряжения. При превышении напряжениями значений предела прочности на одноосное растяжение материала геоткани происходил ее разрыв.

Здесь необходимо отметить, что в научно-технической литературе приводятся в основном

рекомендации по расчету армированных однородных насыпей, расположенных на однородных слабых основаниях. При таких условиях значения растягивающих усилий, возникающих в арматуре насыпей, плавно увеличиваются к оси насыпи и в целом являются прогнозируемыми величинами.

Для проверки причин потери устойчивости насыпи создавались геомеханические модели системы, учитывающие результаты ее разрушения с разных сторон.

Результаты расчетов для первой модели, в которой не учитывались жесткие структуры, разделенные трещинами-прослоями, представлены на рис. 1, 2.

Первая серия расчетов выполнялась для системы без трещины, для высоты насыпи, при которой произошел отказ системы в августе 2006 года. Оценка устойчивости системы выполнялась на деформированной сетке разбивки по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения (вариант К. Терцаги), при нормированном значении коэффициента запаса устойчивости $[k_{st}] = 1,30$ (рис. 1). Условие устойчивости на 7-м этапе устройства насыпи (слои $h = 0,80$ м) имело вид: $k_{st} = 0,91(1,31) > [k_{st}] = 1,30$; несущей способности арматуры: $N = 22,5 < N^* = 306$ кН/м (рис. 2).

Вид графика зависимости $\sigma_{yy} - \sigma_{zz}$ для узла, расположенного на центральной оси под подошвой насыпи, указывает на резкое возрастание осадки основания на 7-м этапе возведения насыпи. По существу, устойчивость системы обеспечивалась только прочностью геоткани.

Для этой же схемы после 7-го этапа возведения насыпи последовательно моделировалось развитие трещины по центральной оси насыпи.

По GenIDE32 моделирование трещин выполняется в процессе расчета на основе анализа текущего НДС элементов системы. В качес-

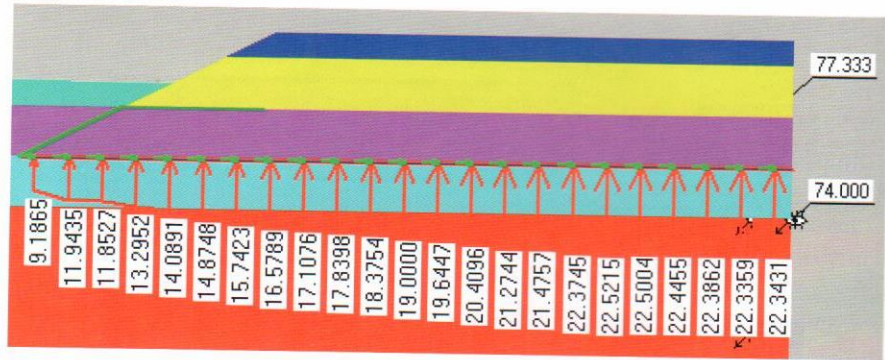


Рис. 2. Эпюра значений усилий в геоткани Stablenka 300: $N = 22,5 < N^* = 306$ кН/м

ве значений анализируемых величин используются: положительные компоненты нормальных составляющих тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ϵ_{ij} , параметр вида НДС $\sigma_v = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$: +1 – одноосное растяжение, 0 – чистый сдвиг, -1 – одноосное сжатие, коэффициент запаса прочности $k_{stR} = \tau_u / \tau$, шаровый инвариант тензора напряжений σ , пользовательские графики. За изменениями любой из этих величин можно проследить в ходе итерационного расчета. Средства интерфейса позволяют достаточно быстро моделировать развитие трещин на основе такого анализа.

Например, если в КЭ $\sigma_v \approx +1$ или ≈ 0 , а $k_{stR} \approx 1,0$ (предельное состояние), то в конечном элементе можно моделировать (неучет в расчетах на следующем этапе этого КЭ) трещину растяжения или сдвига.

Для модели системы с возможностью возникновения и развития трещины условие по несущей способности арматуры на предыдущем этапе момента выхода трещины в тело насыпи по центральной оси системы имело вид (без приложения транспортной нагрузки): $N = 237,4 < N^* = 306$ кН/м (рис. 3). Таким образом, образование трещины увеличивает усилия в арматуре на порядок.

Кроме этой серии расчетов, также были выполнены и другие, на более сложных расчетных схемах. Они подтвердили возможность концентрации усилий в геоткани, в местах возникновения и развития трещин.

Результаты расчетов для принятого окончательного варианта конструкции насыпи с тремя слоями геоткани Stablenka 300, включая разорванный слой, приведены на рис. 4. Условие устойчивости для насыпи с проектными размерами и с транспортной нагрузкой ($q = 30$ кН/м) имело вид: $k_{st} = 0,95(1,69) > [k_{st}] = 1,30$; несущей способности арматуры: $N_{max} = 155,5 < N^* = 306$ кН/м.

Анализируя результаты расчетов, можно обратить внимание на следующее: поверхность скольжения с $k_{st \min}$ практически всегда огибает зону максимальных значений горизонтальных смещений или вектора смещений, находящуюся в основании насыпи, вблизи подножия контрбанкета (см. рис. 4).

При проектировании автомобильных и железных дорог на основаниях из слабых грунтов необходимо знать величину осадки поверхности насыпи, чтобы по ее значению вычислить необходимый объем досыпки грунта. С достаточной для практики точностью ее можно вычислить с использованием простой расчетной схемы, выделив столбик грунтов основания и насыпи в месте ее центральной оси.

Для каждого ПК или ПК+ на основе простой расчетной схемы, фактически одномерной, последовательно (послойно) моделируется возведение насыпи до проектной отметки. Для просмотра результатов расчета периодически включается кнопка «деформированная сетка разбивки» (М 1:1), и по дости-

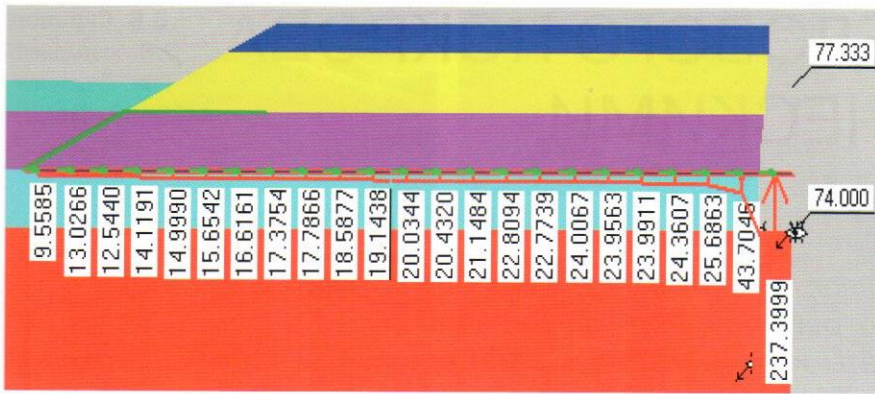


Рис. 3. Эпюра значений усилий в геоткани Stablenka 300: $N=237 < N^*=306$ кН/м

жении поверхности деформированной насыпи проектной отметки моделирование прекращается. По значению конечной осадки системы и по стандартным формулам вычисляется объем грунта досыпки. В этом расчете можно использовать разные модели грунтов, включая те, которые учитывают консолидацию и ползучесть грунтов основания.

В то же время оценка несущей способности грунта основания и устойчивости системы должна производиться для выделенных однородных или специфичных участков магистрали по принятым к расчету поперечникам.

Заключение

Современные программные средства, основанные на численных методах расчета, предоставляют

инженерам-проектировщикам возможность оценить, в какой степени разные модели материалов, расчетные схемы реальной системы сооружение – геосреда и количественные методы исследований способны обеспечить потребительские качества элементов системы. ◉

Литература

1. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. – М.: Министерство транспорта РФ, Федеральное дорожное агентство, 2004. – С. 251.
2. Джоунс К.Д. Сооружения из армированного грунта/пер. с англ. В.С. Забавина; под ред. В.Г. Мельника. – М.: Стройиздат, 1989. – 280 с.
3. Матвеев С.А. Армированные дорожные конструкции / С.А.

Матвеев, Ю.В. Немировский. – Новосибирск: Наука, 2006. – 348 с.

4. Семендяев Л.И. Особенности использования плоских геосеток и георешеток в качестве армоэлементов / Л.И. Семендяев, И.Ж. Хусаинов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2005. – №3. – С. 25–27.

5. Соколов А.Д. Армогрунтовые системы мостов и транспортных развязок / А.Д. Соколов, А.Н. Солонунин // Автомобильные дороги. – 2006. – №7 – С. 39–44.

6. Программа GenIDE32 для решения прикладных задач геомеханики / Горшков Н.И., Краснов М.А. (Система сертификации ГОСТ Р. Госстандарт России. Сертификат соответствия № РОСС RU. СП15. Н00431, 05.10.2011) (www.femsoft.ru).

7. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

8. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – М.: Министерство регионального развития РФ, 2011. – 166 с.

9. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Актуализированная редакция СНиП 22.02.2003. – М.: ОАО «ЦПП», 2012. – 30 с.

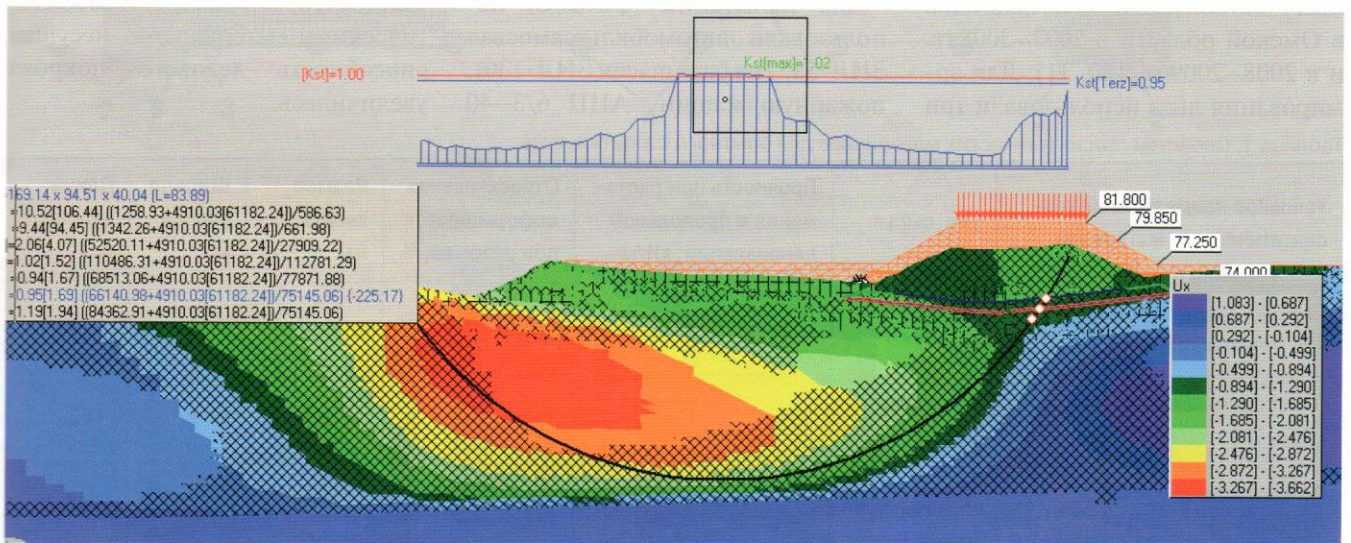


Рис. 4. Результаты расчета на момент окончания возведения насыпи и приложения транспортной нагрузки (ПК 12+00); уровни значения вектора горизонтальных смещений u_x , м; условие устойчивости $k_{str}=0,95(1,69) > [k_{str}]=1,30$