

УДК 624.131

## РАСЧЁТ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДПОРНЫХ СТЕН ВДОЛЬ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА СКЛОНЕ ГОРЫ, ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММЫ PLAXIS

<sup>1</sup>Пермяков М.Б., <sup>2</sup>Жамбакина З.М., <sup>2</sup>Кусбекова М.Б., <sup>1</sup>Краснова Т.В.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
Магнитогорск, e-mail: permyakov.1965@mail.ru, toma.krasnova.70@mail.ru;

<sup>2</sup>Казахский национальный технический исследовательский университет им. К.И. Сатпаева,  
Алматы, e-mail: maruan\_56@mail.ru

Настоящая статья посвящена проблеме развития максимальных горизонтальных перемещений подпорных стен автомобильных дорог, обусловленных сдвиговыми деформациями грунтов. Рассматриваемый участок для изучения влияния склона на подпорных стенах расположен в Алматинской области у подножия гор Алатау. В результате инструментального осмотра склонов и измерений защитных удерживающих стенок из монолитных железобетонных и дренажных систем во время проектирования и строительства были выявлены многочисленные дефекты и повреждения, которые угрожают безопасной эксплуатации дороги и подпорной конструкции. В статье представлены расчеты устойчивости подпорных стенок вдоль автомобильных дорог, расположенных на склоне, выполненных в программе PLAXIS. Авторы приходят к выводу, что на устойчивость удерживающих конструкций существенно влияют изменения физических и механических свойств почвы, когда она полностью насыщена водой. Представленные авторами расчеты показали, что в водонасыщенном состоянии склон является оползнем. Наиболее опасными являются зоны развития максимальных горизонтальных деформаций у подпорных стенок, вызванные сдвиговыми деформациями наклона склона. Проблема строительства автомагистралей в горной местности связана с наличием сложных рельефов, чередующихся горных хребтов и массивов с межгорными впадинами и долинами, а также резкими колебаниями высот и наличием горных склонов различной крутизны. Использование современных технологий в строительстве автомагистралей может позволить найти оптимальные решения для проектирования сложных объектов.

**Ключевые слова:** подпорная стена, деформация, сдвиг, сцепление, прочность, угол внутреннего трения, программная система PLAXIS

## CALCULATION OF THE STABILITY OF SUPPORTED WALLS ALONG THE ROAD VEHICLE LOCATED ON THE SLIP OF THE MOUNTAIN WITH THE PLAXIS PROGRAM

<sup>1</sup>Permyakov M.B., <sup>2</sup>Zhambakina Z.M., <sup>2</sup>Kusbekova M.B., <sup>1</sup>Krasnova T.V.

<sup>1</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk,  
e-mail: permyakov.1965@mail.ru, toma.krasnova.70@mail.ru;

<sup>2</sup>Kazakh National Technical Research University K.I. Satpaev, Almaty, e-mail: maruan\_56@mail.ru

This article is devoted to the problem of the development of maximum horizontal movements of retaining walls of highways, caused by shear deformations of soils. The considered site for studying the influence of the slope on the retaining walls is located in the Almaty region at the foot of the Alatau mountains. As a result of instrumental inspection of slopes and measurements of protective retaining walls from monolithic reinforced concrete and drainage systems, numerous defects and damages were discovered during the design and construction that threaten the safe operation of the road and the structure. The article presents calculations of the stability of the retaining walls along the motor roads located at the slope of the slope, carried out in the PLAXIS program. Calculations showed that in the water-saturated state, the slope is a landslide. The stability of the retaining walls is significantly influenced by changes in the physical and mechanical properties of the soil when it is fully water-saturated. The most dangerous are the zones of development of maximum horizontal deformations at the retaining walls, caused by shear deformations of the slope of the slope. The problem of construction of highways in the mountainous terrain is associated with the presence of complex reliefs, alternating mountain ranges and massifs with intermountain depressions and valleys, as well as sharp variations in heights and the presence of mountain slopes of varying steepness. The use of modern technologies in the construction of highways can help find optimal solutions for the design of complex objects.

**Keywords:** supporting wall, deformation, shear, cohesion, strength, internal friction angle, software system PLAXIS

Проблема строительства автомагистралей в горной местности связана с наличием сложных рельефов, чередующихся горных хребтов и массивов с межгорными впадинами и долинами, а также резкими колебаниями высот и наличием горных склонов различной крутизны. Использование современных технологий в строительстве

автомагистралей может позволить найти оптимальные решения для проектирования сложных объектов. В европейских странах при строительстве автодорог специалисты идут по пути сокращения стоимости, а также трудовых затрат и, наряду с традиционными способами укрепления склонов и горных склонов, используют удерживаю-

щие структуры из усиленной почвы, то есть слоистой уплотненной почвы, усиленной металлическими сетками или геотекстилем.

Это позволяет значительно снизить затраты на строительство, сроки и трудоемкость работы при укреплении склонов автомобильных дорог в сложных геологических условиях на сильно пересеченной и горной местности. Кроме того, в качестве армирующего материала в последнее время широко применяются стеклохолсты, стекловолоконные и полимерные нити. Если говорить о российском опыте создания таких объектов, то чаще всего используются традиционные подходы, такие как возведение удерживающих и подпорных конструкций (стен).

Применение подпорных стен в автомобильном строительстве нашло широкое применение в горных районах не только России, но и других стран [1]. Функционально подпорные стены выполняют задачи удерживания грунта в откосах и предохранения дорог в процессе эксплуатации от схода селей, оползней, падения камней и размывания основания дождевыми и тальными водами. По конструкции подпорные стены подразделяются на массивные и тонкостенные, сборные и монолитные. По применяемым материалам подпорные сооружения бывают бетонные, железобетонные, каменные, грунтовые. По технологии устройства подпорные стены возводятся из шпунта, забивных и буронабивных свай, методом «стена в грунте», с применением методов монолитного бетонирования, путем каменной кладки из естественных и искусственных каменных материалов [2]. Основная проблема, сопряженная с эксплуатацией подпорных стен, заключается в обеспечении устойчивости их в вертикальном и горизонтальном направлениях. Поскольку конструкции одновременно работают и на сжатие и на изгиб, то под действием давления грунта возможно появление повреждений не только в виде отдельных трещин или деформаций, но и полная потеря устойчивости подпорных стенок.

Рассматриваемый участок для изучения влияния склона на подпорные стенки расположен в Алматинской области у подножия гор Алатау. Доступная абсолютная амплитуда маркировки колеблется от 915 до 985 м, что составляет разницу в 70 м. Геологическое строение включало нижнечетвертичные золотые отложения, представленные суглинками с просадочными свойствами, а также четвертичные аллювиальные и пролювиальные отложения, представленные галечником. В верхнем слое расположены суглинки и почвенно-

растительный слой [3]. Суглинки имеют буровато-серый цвет, до глубины 21 метр просадочные, ниже непросадочные. Суглинки в результате изысканий обнаружены до глубины 40 метров. Галечные грунты с песком разведаны на северном склоне и содержат в основном гальку (50–55%), а также гравий (10–15%) и примеси (15–20%). В просадочных лессовых почвах возникают проблемы с оползневыми явлениями при полной или частичной водонасыщенности почвы из-за значительного ухудшения расчетных параметров (адгезии, внутреннего угла трения, модуля деформации, сцепления частиц грунта).

Целью исследования являлся анализ напряженно-деформированного состояния склона откоса сложенными просадочными грунтами и оценка устойчивости и прочности конструкции удерживающих стен для обеспечения безопасности при эксплуатации дороги. Одним из методов определения состояния просадочных грунтов является способ инструментального обследования [4].

В результате инструментального обследования склонов и удерживающих стенок из монолитных железобетонных и дренажных систем, обнаружены многочисленные дефекты в процессе проектирования, которые повлекли за собой угрозу безопасности эксплуатации дороги и объектов. Наклон склона в течение года подвергается воздействию атмосферных и паводковых вод. Монолитные железобетонные подпорные стенки с облицовкой из натурального камня высотой 4,0–20,0 м и шириной 0,6 м поддерживаются на плитах с размерами 1,2×2,40 м. Они имеют жесткое закрепление со свайным основанием. Обнаруженные дефекты указывают на недопустимые трещины и наклон удерживающих стенок вдоль дороги (рис. 1).



Рис. 1. Дефекты подпорной стенки

Для более детальной оценки состояния грунтовых массивов нам необходимо было провести не только инструментальный кон-

троль, но и осуществить проверочные расчеты. Существуют различные модели расчетов почвенных оснований: локальные упругие деформации Винклера, модель Г.К. Клейна, остаточные деформации Н.И. Фусса, комбинированные модели П.Л. Пастернака и В.З. Власова, универсальная расчетная модель грунта Е.Ю. Воробьева, И.И. Черкасова и др. Математические расчеты, выполненные с помощью компьютера, позволяют определить возможные риски при достижении неблагоприятных рабочих условий. Широко распространено применение численных расчетов оснований с использованием программного оснащения и компьютерных пакетов, таких как ЛИРА, SCAD Office, PLAXIS и других. В этих программных комплексах было реализовано большое количество различных методов расчета почвенного основания грунтов [5]. «PLAXIS – программная система конечных элементов, используемая для решения задач инженерной геотехники и проектирования, представляет собой пакет вычислительных программ для расчета методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния конструкций, оснований и фундаментов» [5]. Именно в этой программе производились расчеты.

Проблема взаимодействия грунтового массива с сооружением эффективно решается в программном комплексе PLAXIS. Данный программный комплекс решает задачи в плоскостном, симметрично осевом и трехмерном пространстве. Данная программа позволяет выполнять точные расчеты, гарантирующие высокоэффективный результат. Основа программной системы построена на математических уравнениях, определяющих взаимосвязь между напряжением и деформацией. Все модели материалов в программе PLAXIS представлены зависимостью между скоростью изменений эффективных напряжений и скоростью деформаций (соответственно между  $\dot{\sigma}'$  и  $\dot{\epsilon}$ ). Наибольшее распространение получили способы расчета с применением модели Мора – Кулона и модели упрочняющегося грунта. В первом случае (модель Мора – Кулона) целесообразно применять при первичном расчете поставленной задачи. Здесь послойно, для каждого слоя, рассчитывается постоянная средняя жесткость. Модель применяется для определения поведения грунта или скальной породы, где жесткость постоянна, а следовательно, расчеты производятся достаточно быстро.

Несомненным достоинством программного комплекса PLAXIS является «Модель упрочняющегося грунта», позволяющая моделировать поведение песчаных и глинистых грунтов при сложных нагрузках, но данная

модель требует дополнительного оборудования, помимо стандартного пакета PLAXIS.

Оценка напряженно-деформированного состояния склона под действием подпорных стенок проводилась нами с учетом поведения просадочных грунтов. Почва склона характеризуется изменчивостью физических и механических свойств (пониженной пористостью, модулем деформации, адгезией, углом внутреннего трения), изменением напряженного состояния из-за их перераспределения после замачивания и изменения тензора деформаций, связанными с развитием упругопластических и вязкопластических деформаций [3, 6].

При насыщении водой просадочных грунтов возникает желаемое напряженное состояние, которое значительно отличается от исходного состояния. Плоская задача рассматривается в упругопластической композиции с использованием модели Кулона – Прандтля, которая предполагает упругое поведение среды при напряжениях ниже предела текучести и пластического течения равного объема (с нулевой дилатансией) при напряжениях в пределе текучести. Напряжения в пределе текучести описываются уравнением [3]

$$\sigma_{\max} = S + \lambda \sigma_{\min}, \quad (1)$$

где  $\lambda = \text{ctg}2(\pi/4 - \varphi/2)$  – коэффициент пассивного давления грунта;

$S = 2 C \text{ctg}(\pi/4 - \varphi/2)$  – предел прочности при одноосном сжатии;

$\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  – максимальное и минимальное главные напряжения.

В области растяжения критерий текучести (разрыва) имеет вид

$$\sigma_{\min} = -T, \quad (2)$$

где  $T$  – прочность на растяжение, принимаемая равной  $C/5$ .

После разрыва при напряжении  $\tau = -C/5$ , в дальнейшем анализе прочность на растяжение элемента считается равной нулю ( $T = 0$ ). Модель упругопластического решения реализуется методом конечных элементов и достигается известным методом «начальных напряжений» с использованием итерационной модели Ньютона – Рафсона [7, 8] с инвариантной матрицей жесткости, но с вектором переменной нагрузки, пополняемым во время итерационного процесса «начальными силами» в пластических элементах.

Ошибка в результате вычисления FEM складывается из погрешности несоответствия из-за «замены тела, обладающего бесконечным числом степеней свободы, модель с конечным количеством степеней свободы и ошибок в округлении чисел при выполнении вычислительных операций на компью-

тере» [8, 9]. В результате численного анализа проблемы (а) и механизма деформации (б), получены искажения конечно-элементарной сетки (в), горизонтальные и общие деформации склона при изменении расчетных характеристик грунтового основания (г, д), а также изолинии максимального горизонтального (сдвигового) напряжения (е) (рис. 2) и траектории частиц просадочных грунтовых оснований (рис. 3) с изменением напряженно-деформированного состояния грунта на подпорной стенке.

Результаты численного решения взаимодействия склона и удерживающей стенки показывают, что наиболее опасными являются зоны развития максимальных горизонтальных деформаций на подпорных стенках, вызванные деформациями сдвига. Зона

распространения деформаций сдвига охватывает большой объем наклонного грунта. Осаждение почвы, которая, проседая от собственного веса на склоне с водонасыщенностью, ухудшает начальное значение монолитности грунта, угол внутреннего трения, модуль деформации, изменение напряженно-деформированного состояния [10]. Траектории движения оседающих почв, когда напряженно-деформированное состояние склона изменяется на удерживающей стенке, показывают, что движение частиц почвы происходит на границе просадочных и непросадочных грунтов. Численные расчеты показывают, что удерживающая стенка на склоне, образованном просадочным суглинком, нестабильна, а скольжение происходит только в просадочных слоях склона.

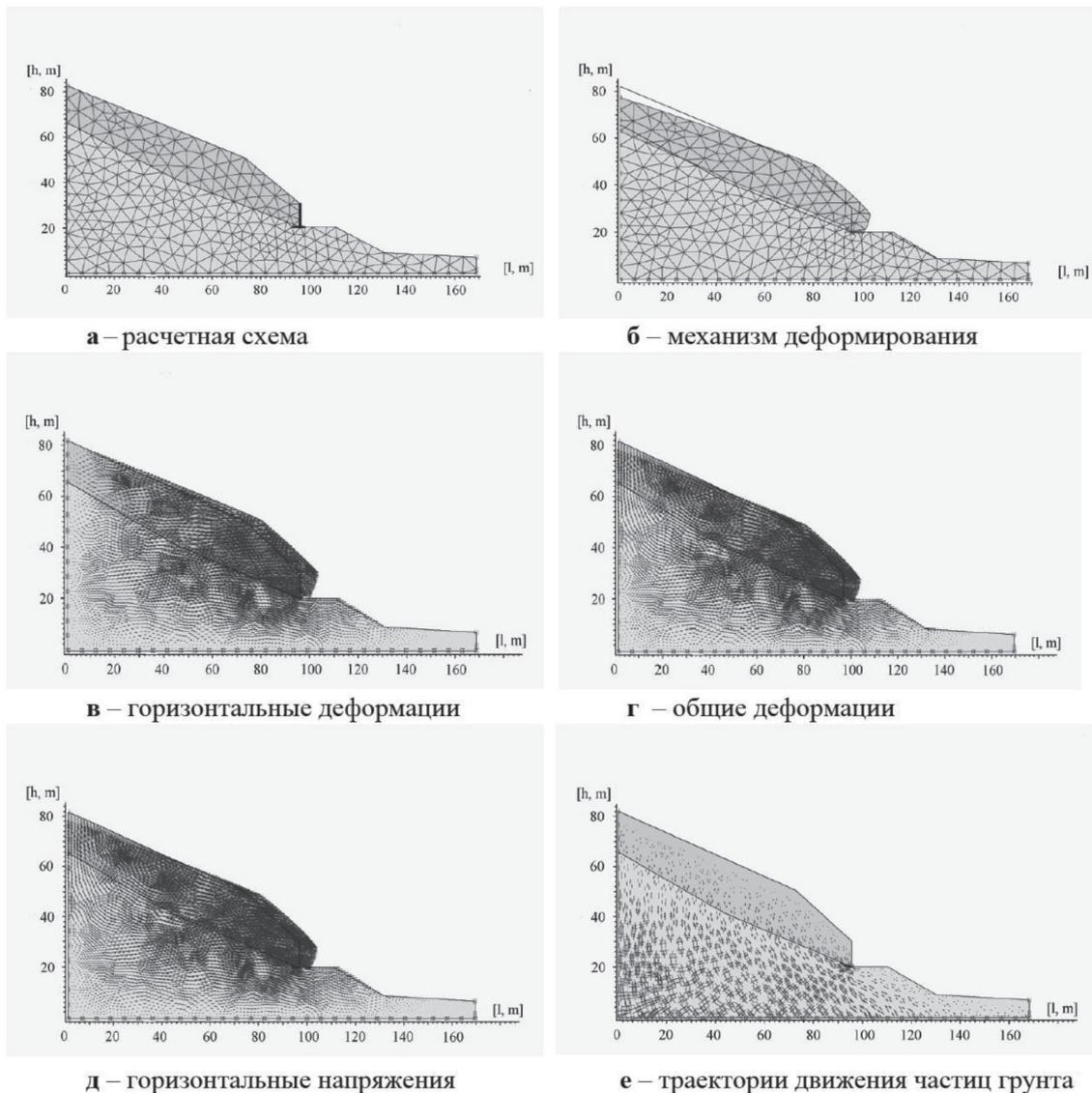


Рис. 2. Результаты численного анализа деформирования склона горы

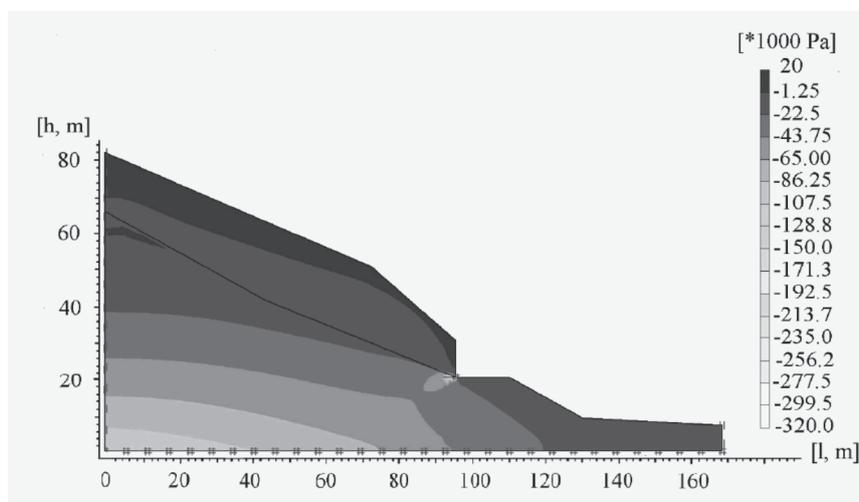


Рис. 3. Максимальные сдвиговые напряжения

### Выводы

По результатам инструментального и визуального исследования склонов и обследования подпорных стенок из монолитного железобетона с отделкой каменными материалами, а также водоотводных систем, выявлены дефекты и повреждения, допущенные при проектировании и строительстве автомобильной дороги, которые могут создать угрозу безопасной эксплуатации транспортного сооружения в целом.

Согласно результатам лабораторных и компрессионных испытаний грунта основания, лежащие на глубине 21,0 м, с замачиванием обладают свойствами проседания. Начальное давление проседания изменяется в широких пределах от 0,02 до 0,36 МПа.

Расчеты устойчивости подпорных стенок вдоль шоссе, расположенного на склоне, проведенные численными методами с использованием программных комплексов PLAXIS, показали, что в водонасыщенном состоянии основание и склон являются неустойчивыми.

Расчеты проверки показывают, что общая просадка составляет амплитуду: 8,8–73,51 см. Результаты численного решения при моделировании взаимодействия наклона и удерживающей стенки демонстрируют, что наиболее опасными являются зоны вблизи удерживающих стенок (места развития максимальных горизонтальных деформаций), вызванные сдвиговыми деформациями грунтового основания.

### Список литературы

1. Научные исследования, инновации в строительстве и инженерных коммуникациях в третьем тысячелетии / К.М. Воронин [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2009. – № 2. – С. 49–50.
2. Исследование технологии погружения забивных свай различных конструкций / М.Б. Пермяков [и др.] // Архитектура. Строительство. Образование. – 2015. – № 1(5). – С. 12–17.
3. Кусбекова М.Б. Напряженно-деформированное состояние откоса / М.Б. Кусбекова, З.М. Жамбакина, М.Б. Пермяков // Научные исследования. – 2017. – № 5 (16). – С. 15–17.
4. Мухсинов Н. Устойчивость склона сложенными просадочными грунтами / Вклад молодежной науки в реализацию Стратегии «Казахстан-2050»: тезисы докладов Республиканской студенческой научной конференции (13–14 апреля 2017 г.) В 3 ч. Ч. 1 / Министерство образования и науки РК; Карагандинский государственный технический университет – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2017. – С. 341–343.
5. Модели грунтов, реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D / Е.С. Егорова [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 3 (42). – С. 32.
6. Ухов С.Б. Механика грунтов, основания и фундаменты / С.Б. Ухов. – М.: Наука, 2003. – 273 с.
7. Строкова Л.А. Определение параметров деформируемости грунтов для упругопластических моделей // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 367. – С. 190–194.
8. Парамонов В.Н. Метод конечных элементов при решении нелинейных задач геомеханики / В.Н. Парамонов. – СПб.: Группа компаний «Геоконструкция», 2012. – С. 231.
9. Das M. Braja. Principles Geotechnical Engineering // Third Edition. PWS Publishing Company, Boston. – 1993. – P. 672.
10. Вестник КазНУТУ. – 2017. – № 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vestnik.kazntu.kz/files/pomer/85.pdf> (дата обращения: 25.12.17).