



Источник фото: Pixabay.com
The photo source: Pixabay.com

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ НАСЫПЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ

ФЕДОРЕНКО Е.В.

Научный консультант компании «НИП-Информатика», к. г.-м. н., г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Специфика любого протяженного линейного сооружения состоит в том, что по длине его трассы типы проектных решений различны и в ряде случаев индивидуальны. В том числе проектирование автомобильных и железных дорог часто встречается с пересечением трассой участков, сложенных слабыми грунтами. Принятие индивидуальных или групповых проектных решений должно основываться на геотехнических расчетах. Выбор оптимального варианта усиления и стабилизации основания или ускорения консолидации необходимо проводить на основе сопоставления результатов совместных расчетов деформаций, времени их развития, стабильности и устойчивости основания численными методами (на основе метода конечных элементов) с использованием математических моделей. Решению этих проблем и посвящена предлагаемая статья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

линейные сооружения; автомобильные дороги; железные дороги; насыпь; грунтовое основание; слабые грунты; усиление; стабилизация; индивидуальное геотехническое проектирование; проектные решения; геотехнические расчеты.

INDIVIDUAL GEOTECHNICAL DESIGN OF EMBANKMENTS OF TRANSPORT STRUCTURES ON SOFT SOILS

FEDORENKO E.V.

Science adviser of the NIP-Informatics company, PhD (Geology and Mineralogy), St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

The specificity of any extended linear structure is that along the length of its route the types of design solutions are different and, in some cases, individual. Among other things, the designers of autoroads and railways often deal with that the routes of linear structures cross areas composed of soft soils. Individual or group design solutions should be based on geotechnical calculations. The choice of the optimal option for strengthening and stabilizing the ground base or for accelerating the consolidation period must be carried out on the basis of comparing the results of joint calculations of the deformations and their development time, stability and steadiness of the ground base with the use of numerical methods based on the finite element method and mathematical models. The proposed article is devoted to solving these problems.

KEYWORDS:

linear structures; autoroads; railways; embankment; ground base; soft soils; strengthening; stabilizing; individual geotechnical design; design solutions; geotechnical calculations.

Введение

Специфика протяженных линейных сооружений заключается в том, что по длине трассы типы проектных решений различны и в ряде случаев индивидуальны. Термин «индивидуальное проектирование» используется в транспортном строительстве для случаев выхода за рамки типового проектирования.

При строительстве на слабых основаниях теоретической основой для индивидуального проектирования является механика грунтов. Расчеты позволяют проектировщику оценить эффективность рассматриваемых вариантов и сравнить их между собой. То есть такое проектирование основано на геотехническом расчетном обосновании выбора конструктивно-технологического решения. Его можно назвать геотехническим проектированием.

Индивидуальные проектные решения должны приниматься для условий, разделенных на группы в зависимости от:

- высоты насыпей и откосов выемок;
- состава грунтов насыпи и бортов выемок;
- грунтового основания (слабого, многолетнемерзлого, болотистого и т. д.);
- условий увлажнения и подтопления (близости расположения ключей, подходов к мостам и т. д.);
- условий рельефа (косогорности и т. д.);
- специфических особенностей грунтов выемок и насыпей (выветриваемых,

Таблица. Конструктивно-технологические решения для строительства насыпей на слабых основаниях

| Изменение воздействия на основание | | Дополнительные конструктивные элементы | | Изменение свойств основания | |
|------------------------------------|---|--|--|-----------------------------|---|
| А | снижение высоты насыпи | А | железобетонные сваи | Б | консолидация основания временной пригрузкой |
| Б | | Б | | | |
| А | снижение веса насыпи (облегченные насыпи из легких материалов) | А | геосинтетические армирующие прослойки | А | частичная/полная замена слабых грунтов |
| Б | | Б | | | |
| А | пригрузочные бермы (контрбанкеты) для улучшения напряженного состояния слабой толщи | А | шпунтовое или свайное ограждение | А | предварительная консолидация основания за счет перерывов в отсыпке насыпи |
| | | Б | | Б | |
| А | уположение откосов | А | распределяющие плиты (настилы в основании насыпи); лежневый настил | А | консолидация и упрочнение за счет геосинтетических ленточных дренажей |
| | | Б | | Б | |
| А | уположение откосов | А | частичное или полное замещение слабых грунтов методами виброфлотации, струйной цементации (jet grouting) или глубинного перемешивания с созданием щебеночных, песчаных, текстильно-песчаных, илоцементных свай и т. п., а также дренажных прорезей | | |
| | | | | | |

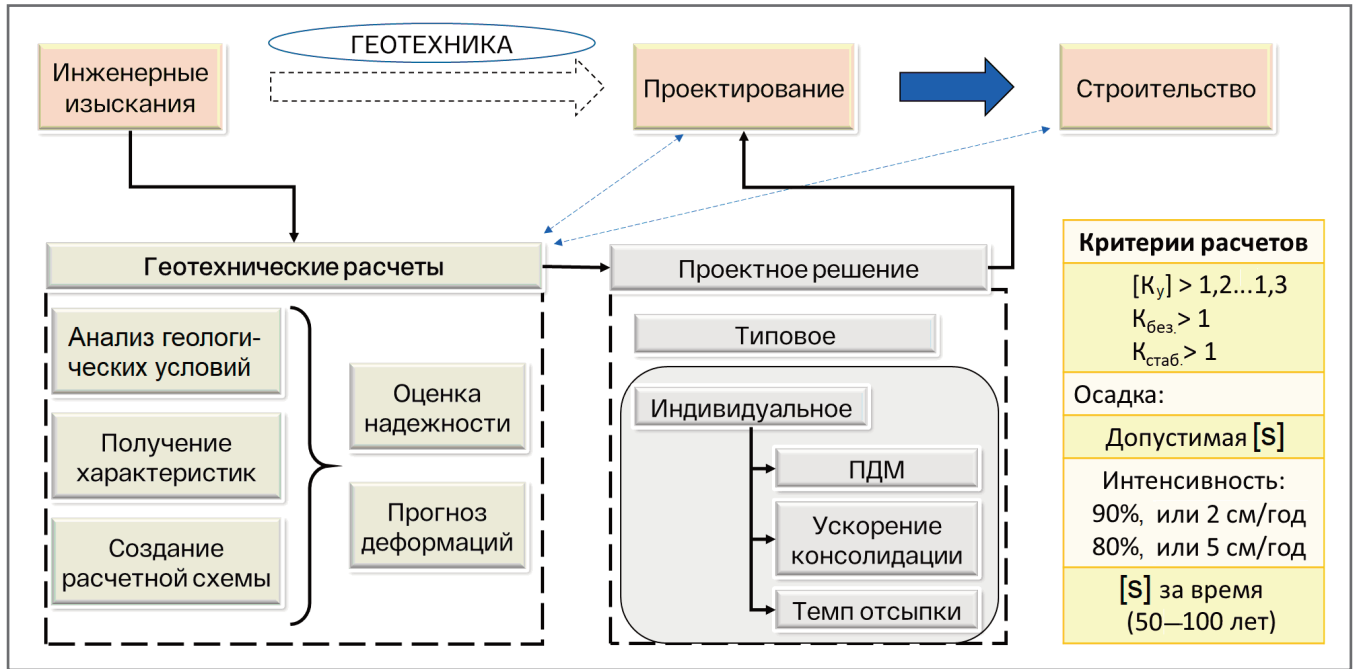


Рис. 1. Процесс перехода от инженерных изысканий к проектированию по результатам геотехнических расчетов (ПДМ – погрузочно-доставочные машины; K_y – коэффициент устойчивости; $K_{без}$ – коэффициент безопасности; $K_{стаб}$ – коэффициент стабильности)

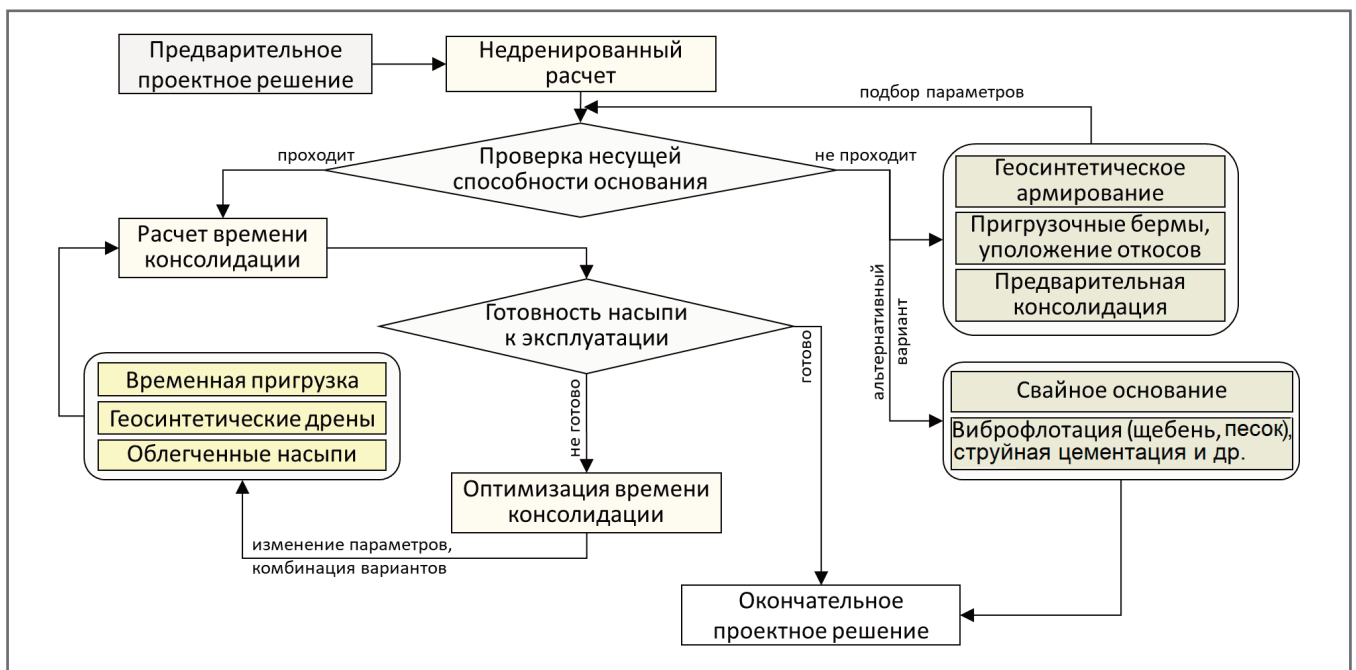


Рис. 2. Блок-схема этапов работ для назначения противодеформационных мер при строительстве на слабом грунтовом основании

засоленных, набухающих, просадочных и т. д.);

- проявлений опасных геологических процессов (оползней, карста, обвалов и т. д.);
- переходности типов участков (концевых участков скальных выемок; насыпей, переходящих в выемки на косогорах; сопряжений с искусственными сооружениями и т. д.).

Сегодня существует множество разнообразных конструктивно-технологических решений, основанных на раз-

личных инновационных материалах и технологиях для принятия противодеформационных мер. Рациональный выбор наиболее эффективного варианта должен быть основан на обеспечении надежности с одной стороны и экономической целесообразности с другой. Очевидно, что найти их оптимальное соотношение можно путем сравнения стоимости реализации двух и более вариантов проектных решений, каждое из которых основано на геотехнических расчетах для получения оценок надеж-

ности и конструктивно-технологических параметров для составления смет.

Основные варианты противодеформационных мер (см. таблицу) должны быть направлены на обеспечение устойчивости и надежности, на предотвращение недопустимых осадков и на оптимизацию времени консолидации насыпи на слабом основании.

Выбор противодеформационных мер должен базироваться на геотехнических расчетах, основанных на данных инженерных изысканий. Следует отметить,

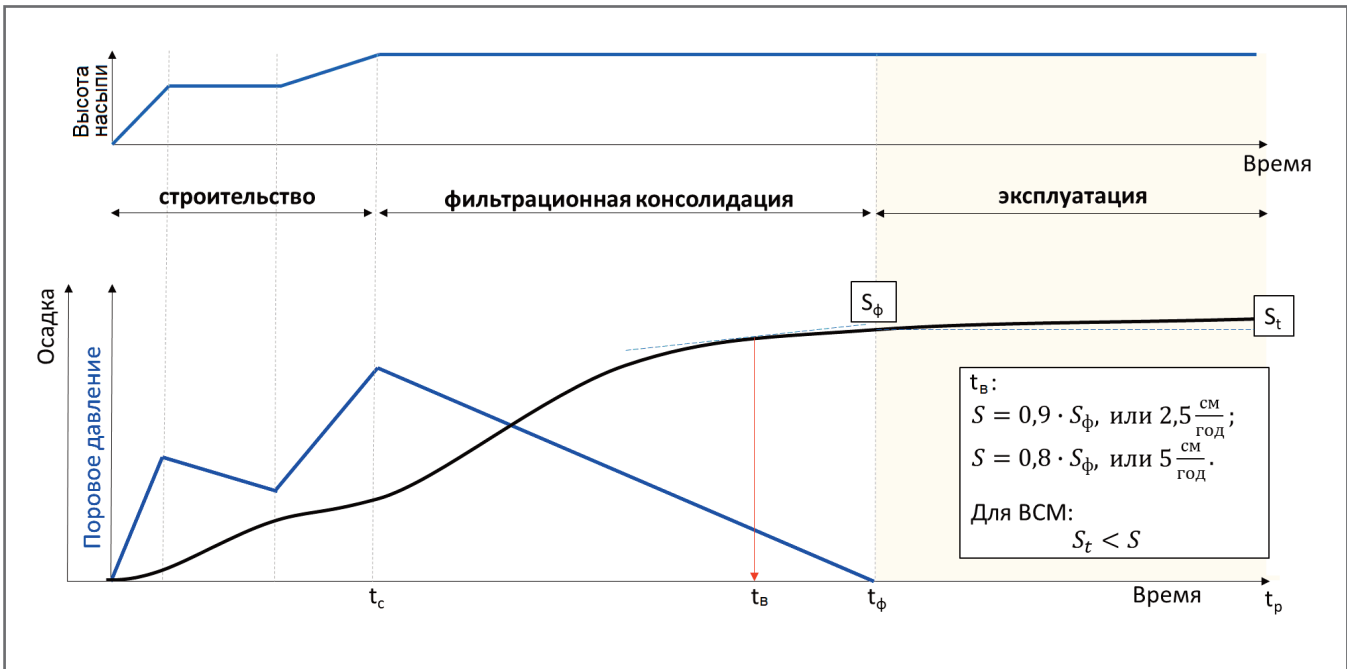


Рис. 3. Характерные показатели работы насыпи во времени. Аббревиатуры и буквенные обозначения: ВСМ – высокоскоростные железнодорожные магистрали; t_c – время строительства; t_b – время выдержки до начала эксплуатации; t_ϕ – время завершения фильтрации; t_p – расчетное время эксплуатации; S_ϕ – осадка насыпи к моменту завершения фильтрации; S_t – осадка насыпи к расчетному моменту времени t_p

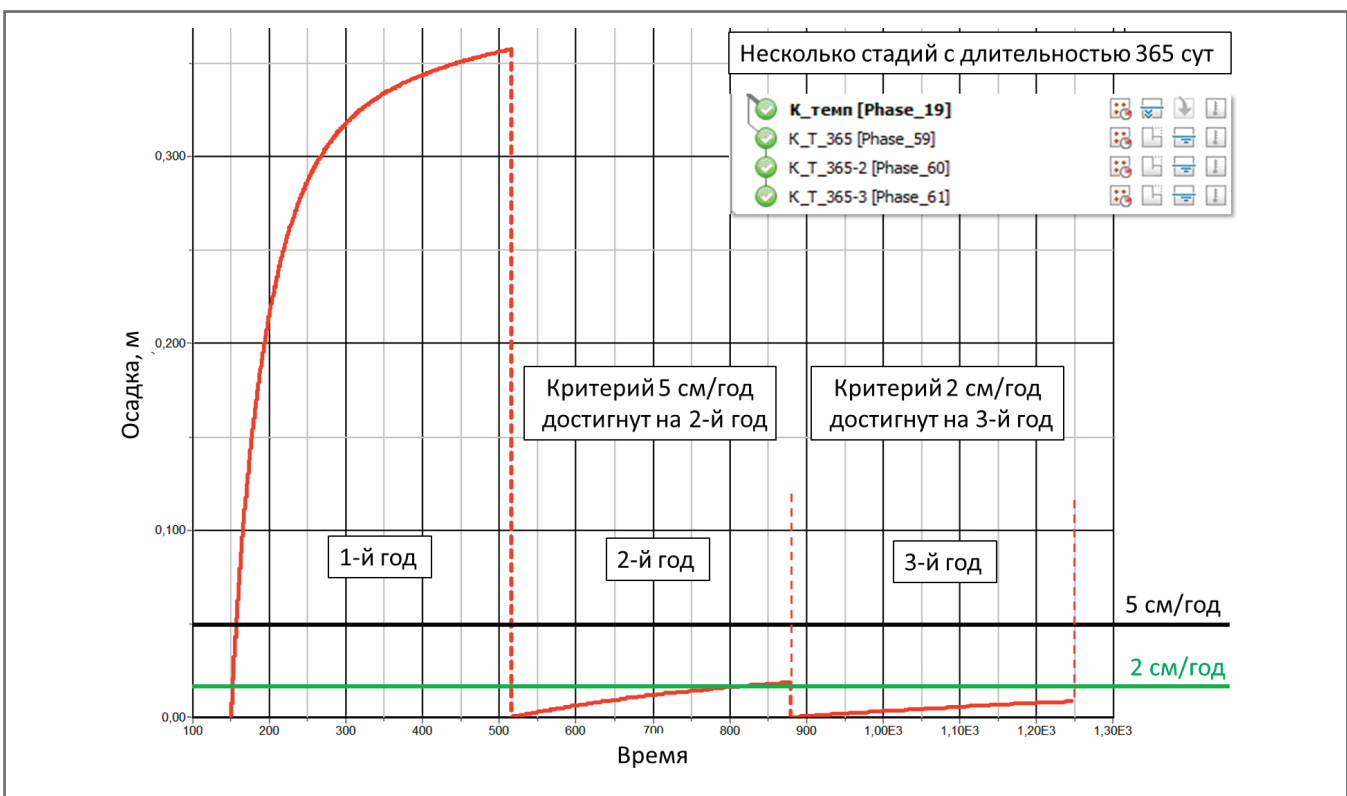


Рис. 4. Пример результатов расчета консолидации

что программа изысканий, лабораторные и полевые исследования грунтов и интерпретация их результатов обязательно должны быть связаны с проектированием и строительством (на практике нередки случаи, когда часть инженерно-геологических изысканий была сделана впустую, поскольку их резуль-

таты не требовались для расчетного обоснования проектного решения, а часть, наоборот, была сделана недостаточно полно для получения данных, необходимых для проектирования). На рисунке 1 показано взаимодействие составляющих строительной отрасли на примере решения проблемы слабых

грунтов. На рисунке 2 в общем виде приведена блок-схема этапов работ для принятия проектного решения.

Предварительно выбирается первоначальное проектное решение. Это может быть конструкция с выбранными вариантами стабилизации или без них. Расчетная проверка начинается с

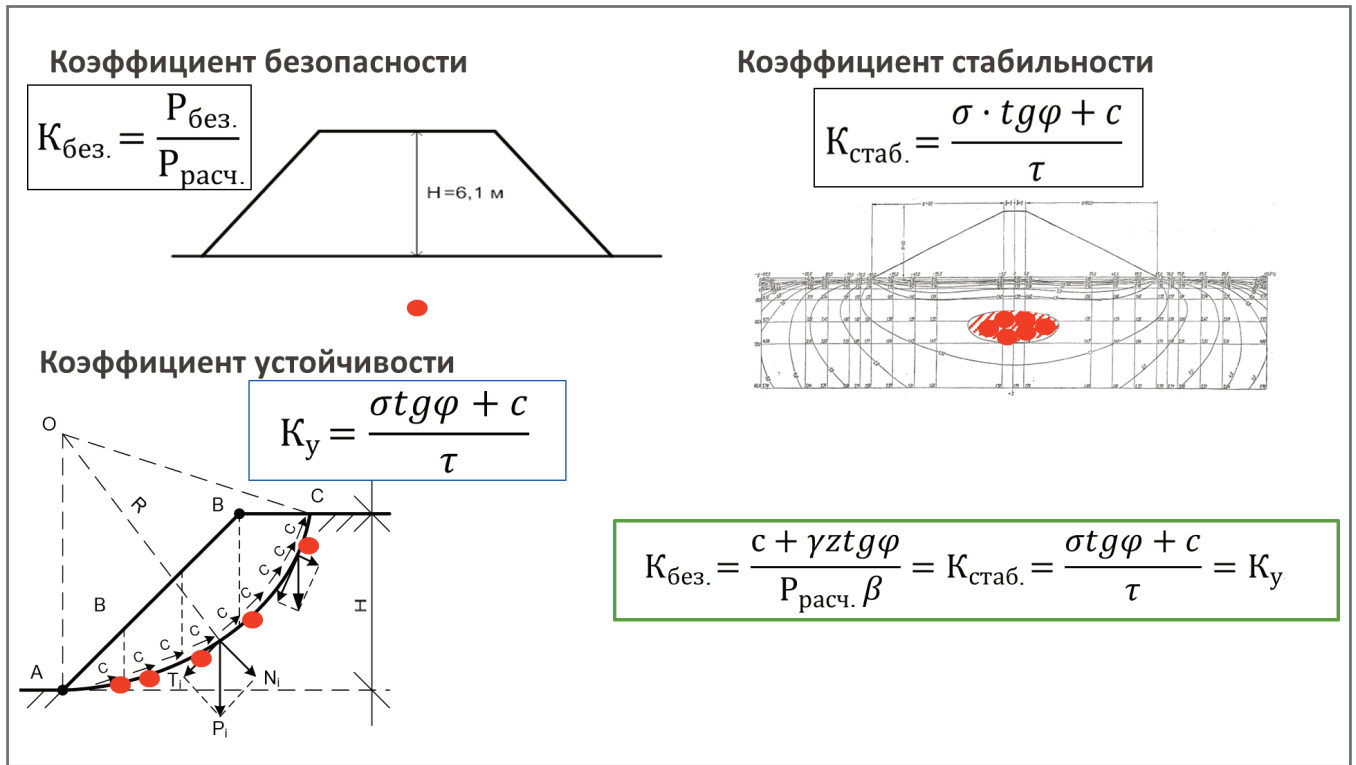


Рис. 5. Основные критерии надежности. Буквенные обозначения: $K_{\text{без.}}$ – коэффициент безопасности; $P_{\text{без.}}$ – безопасная нагрузка на основание; $P_{\text{расч.}}$ – расчетная нагрузка на основание; H – высота насыпи; $K_{\text{стаб.}}$ – коэффициент стабильности; σ – нормальное напряжение; φ – угол внутреннего трения; c – удельное сцепление; τ – напряжение сдвига; K_y – коэффициент устойчивости; γ – средневзвешенный объемный вес грунта слабой толщи, расположенной выше горизонта Z ; z – глубина рассматриваемого горизонта Z от поверхности земли; β – коэффициент, устанавливаемый по графикам для трапецидальной формы эпюры нагрузки

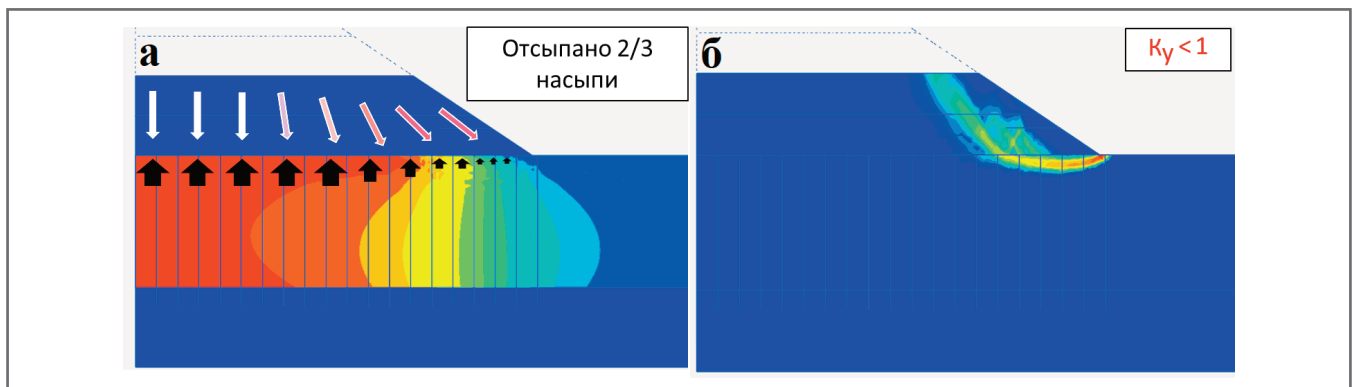


Рис. 6. Недренированное нагружение: а – максимальное поровое давление; б – сдвиговые деформации

оценки нестабилизированного состояния насыпи при отсутствии консолидации и минимальной прочности грунтового основания. По результатам расчета для недренированных условий выполняется анализ несущей способности. Если получается достаточный запас надежности по сравнению со значением коэффициента устойчивости K_y , требуемым в строительный период, то следует оценить время консолидации по соответствующим нормативным критериям. Если же запас недостаточен, то требуется предусмотреть меры по обеспечению стабильности. Тогда выбираются их варианты (в соответствии с таблицей). Приве-

дем примеры часто встречающихся (традиционных) вариантов.

Геосинтетическое армирование в виде полубойм обеспечивает стягивание насыпи в нижней части и повышение ее общей устойчивости. Однако в случае низкой прочности слабых грунтов, особенно жирных глин или илов, повышение прочности армирующих элементов не приводит к ожидаемому росту величины K_y . Это связано с потерей несущей способности основания, на которое не влияет повышение жесткости насыпи за счет армирования. В таких случаях рекомендуется выполнить пригрузку бермами для областей потенциального выпора грунта, что в комби-

нации с армированием позволит снизить ширину берм, которая требовалась бы без него.

Метод предварительной консолидации позволяет достичь упрочнения грунта при строительстве за счет использования временноГо ресурса. При этом вариант с армированием дает сокращение срока отсыпки насыпи при условии обеспечения ее устойчивости.

В зависимости от обстоятельств проектировщик может принять альтернативное решение, направленное на *исключение влияния слабого основания*. Это могут быть, например, свайное основание с гибким ростверком, стабилизация с применением щебеночных, песчаных, текстиль-

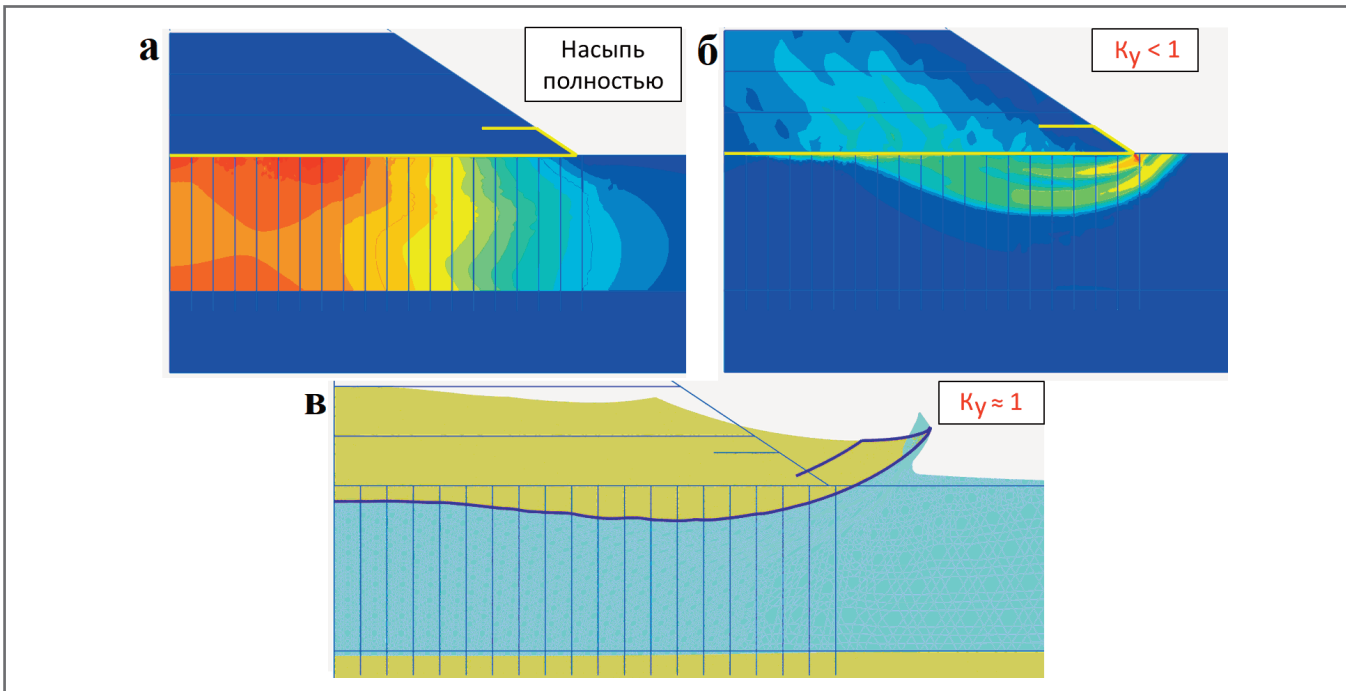


Рис. 7. Вариант расчета нестабилизированного состояния с армированием: а – поровое давление; б – области сдвиговых деформаций; в – деформированная схема

но-песчаных, илоцементных свай, струйной цементации (jet grouting), глубинного перемешивания или же другие варианты, которые обеспечивают передачу давления на коренные грунты минуя слабую толщу. Как правило, в таких случаях расчеты консолидации не проводятся.

После того как стабильность основания обеспечена, необходимо выполнить расчет времени консолидации для проверки соответствия критериям готовности насыпи к эксплуатации. Если по полученным результатам требуется ускорение консолидации, то следует выбрать меры, влияющие на величину избыточного порового давления. Обычно используются геосинтетические ленточные дренажи, которые уменьшают путь фильтрации, или облегченные насыпи (из пенополистирольных блоков, шлака или других материалов) для снижения давления на основание и соответствующего уменьшения порового давления. Нормативные документы рекомендуют использовать вариант с временной пригрузкой. Следует отметить, что комбинирование мер позволяет достичь большего эффекта.

Критерии расчетов ►

Целью индивидуального геотехнического проектирования является выполнение двух основных условий: время строительства и последующей выдержки насыпи до начала эксплуатации должно быть оптимальным; сооружение в периоды строительства и эксплуатации должно быть надежным.

Для насыпей принято выделять три характерных этапа (рис. 3):

1) *строительство* – нагружение слабого основания весом насыпи, вызывающее рост порового давления;

2) *фильтрационная консолидация* – время выдержки насыпи до начала эксплуатации, пока не будет достигнут один из критериев соответствия нормативным документам;

3) *эксплуатация* – период длительной работы сооружения с учетом динамического воздействия транспорта, во время которого продолжается медленный прирост осадок за счет ползучести (критерий длительных осадок регламентируется для высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ)).

В качестве примера приведем результаты расчета времени консолидации в программе PLAXIS. Стадии расчета после завершения строительства были для наглядности разделены на годовые отрезки со сбросом перемещений на каждой (рис. 4). Такой способ позволяет увидеть достижение того или иного критерия консолидации.

В транспортном строительстве принято использовать три варианта критерия прочности Кулона – Мора. Это коэффициенты безопасности, стабильности и устойчивости.

Коэффициент безопасности ($K_{без.}$) определяет условие возникновения предельного состояния по критерию прочности Кулона – Мора только в одной точке. *Коэффициент стабильности* ($K_{стаб.}$)

уже позволяет оконтурить области скопления таких точек, то есть области предельного состояния, которые в конечном счете определяют устойчивость. *Коэффициент устойчивости* (K_y) определяет такое количество точек предельного состояния, которое приводит всю систему к разрушению. Кроме того, можно показать, что все перечисленные коэффициенты связаны друг с другом. В общем виде их объединяет условие прочности Кулона – Мора, поэтому между используемыми формулами можно поставить знак равенства (только для учета применимости формул для оценки равновесия в точке или массиве) (рис. 5).

Применительно к проблеме слабых оснований следует отметить, что наряду с традиционным подходом к оценке сопротивления сдвигу в зависимости от метода плотности-влажности Н.Н. Маслова есть и другой подход – оценка в терминах эффективных напряжений и порового давления. В таком случае сопротивление сдвигу можно представить в следующем виде:

$$\tau' = (\sigma' - U) \cdot \operatorname{tg} \varphi' + c', \quad (1)$$

где τ' – эффективное напряжение сдвига; σ' – эффективное нормальное напряжение; U – поровое давление; φ' – эффективный угол внутреннего трения; c' – эффективное удельное сцепление.

При постоянных значениях эффективного угла внутреннего трения и эффективного сцепления изменение со-

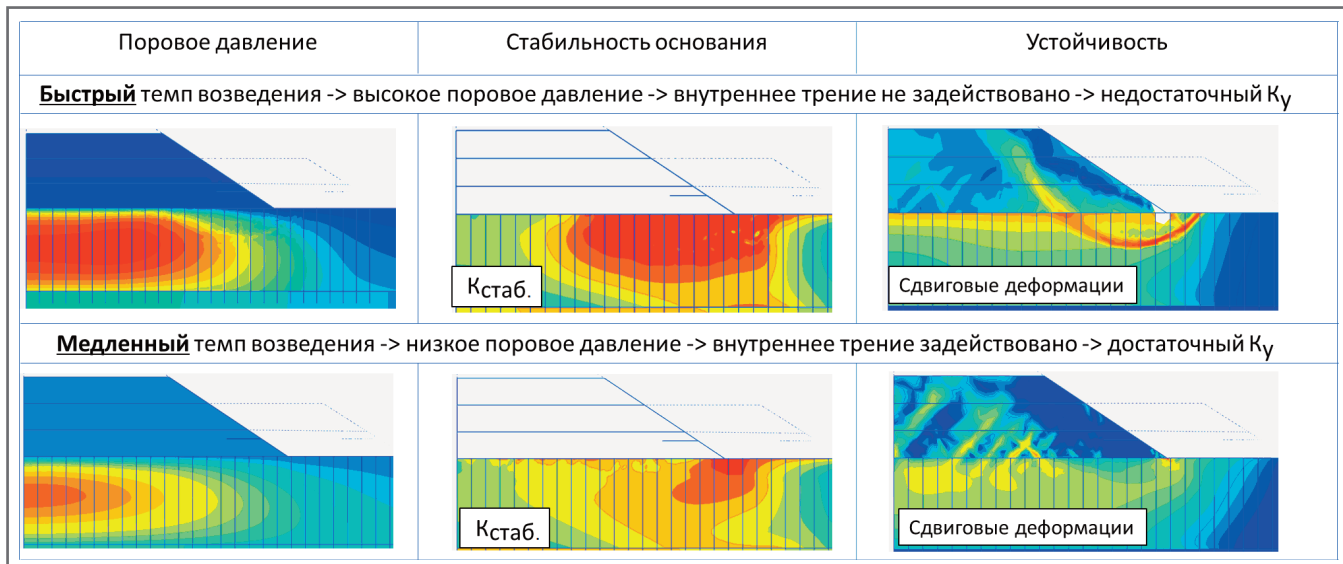


Рис. 8. Варианты строительства насыпи – быстрый и медленный темп

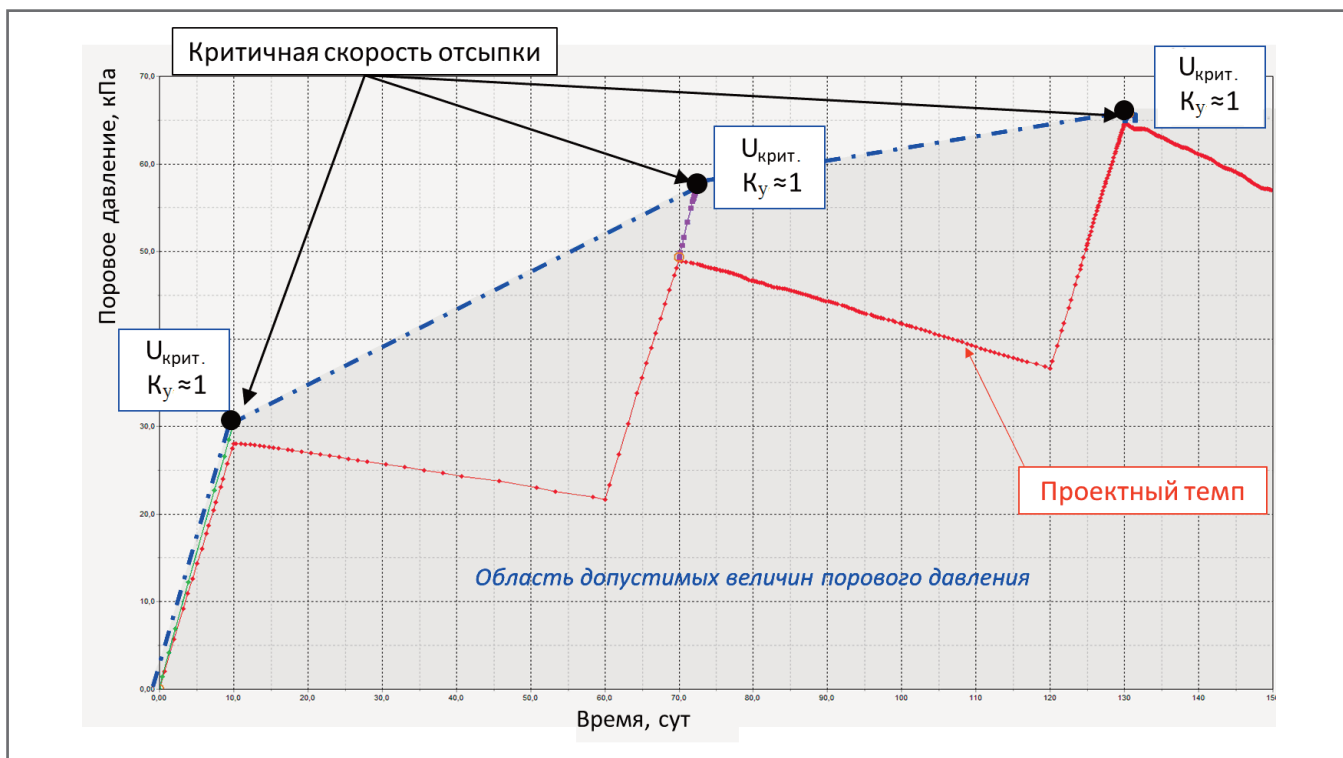


Рис. 9. Результаты расчетов изменений порового давления во времени для отсыпки и предельных (критических) значений порового давления $U_{крит.}$

противления сдвигу возможно за счет изменения порового давления.

Далее покажем влияние порового давления на все основные результаты расчетов и принятие решения. В качестве примера рассмотрим насыпь высотой 4,5 м на слабом основании, для которой рассмотрим несколько вариантов стабилизации.

Первая оценка (расчет для недренированных условий) ►

Для предварительной оценки надежности и назначения противодефор-

мационных мер выполняют расчет недренированных условий, характеризующий нестабилизированное состояние. В результате получают максимальную величину порового давления и минимальный коэффициент устойчивости. Этот расчет подразумевает консервативную оценку, поскольку нагружение происходит мгновенно по полностью закрытой (недренированной) схеме. Это не является реалистичным, особенно для высоких насыпей, когда послойная отсыпка предполагает частичное дренирование и консолида-

цию. На рисунке 6 показан пример возникновения порового давления и то, как оно влияет на картину потери устойчивости. Максимальные величины порового давления по оси насыпи представляют собой отпор грунтового основания в противодействие весу насыпи. В то же время откосная часть за счет меньшего веса создает меньшее поровое давление – соответственно, и отпор будет меньше. Однако касательные силы в откосной части максимальны, что и приводит к потере устойчивости именно в этой области.

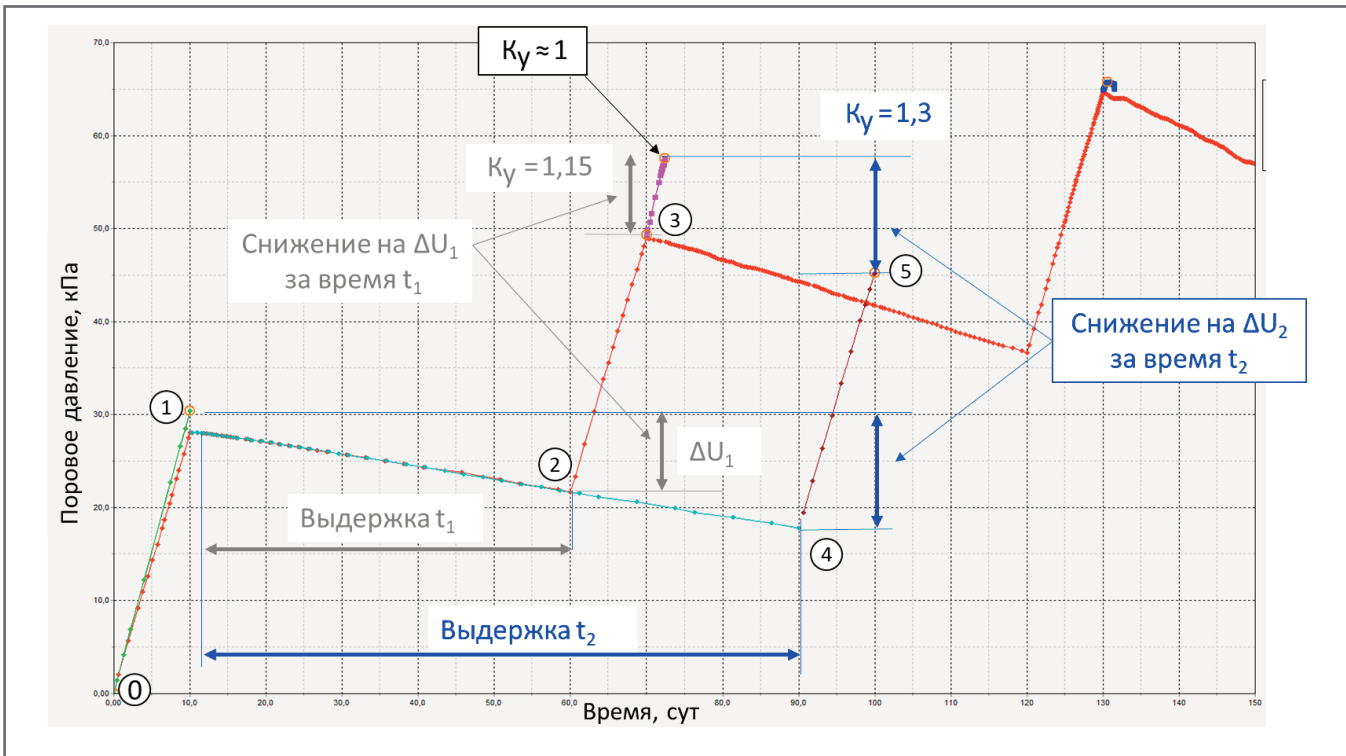


Рис. 10. Пример влияния времени выдержки на поровое давление перед каждой очередной отсыпкой

Отчасти компенсировать слабую сопротивляемость основания сдвигу можно за счет использования силовых геосинтетических материалов, например в виде полубоймы.

На рисунке 7 показан вариант усиления за счет армирования. Последнее не влияет на поровое давление, однако может обеспечить устойчивость насыпи за счет восприятия растягивающих напряжений. Но в ряде случаев, какой бы прочной ни была армирующая прослойка, она не может повысить устойчивость сооружения, что связано с потерей устойчивости основания. Тогда не играет роли то, из чего сделана насыпь и насколько она прочна, поскольку грунт выдавливается из-под нее. На рисунке 7, в прочность армирования больше, чем на рисунке 7, б. Однако видно, что коэффициенты устойчивости для этих двух случаев практически одинаковы. Здесь следует отметить, что даже при многослойном армировании всей насыпи будет происходить потеря устойчивости грунтового основания – выпор грунта из-под подошвы сооружения.

Метод предварительной консолидации (темп отсыпки) ►

По сравнению с расчетом для недренированных условий более реалистичным будет расчет, учитывающий время нагружения и условия дренирования. В соответствии с нормативными доку-

ментами использование метода предварительной консолидации предполагает оценку темпа возведения сооружения и учет процесса строительства.

Поскольку в таком расчете поровое давление зависит от скорости нагружения, а сопротивление сдвигу (устойчивость) – от порового давления, то в качестве необходимых исходных данных потребуются закон сжимаемости грунта и общие зависимости:

$$\tau = f(U); \quad (2)$$

$$k_\phi = f(\sigma), \quad (3)$$

где τ – напряжение сдвига; U – поровое давление; k_ϕ – коэффициент фильтрации; σ – нормальное напряжение.

Наглядно оценить влияние порового давления на стабильность основания и устойчивость насыпи можно с помощью коэффициента стабильности.

На рисунке 8 показано, что устойчивость сооружения зависит от того, насколько задействованы в грунте силы трения. В свою очередь, силы трения зависят от того, насколько велико поровое давление, величина которого определяется скоростью нагружения (темпом отсыпки).

Обобщая приведенную выше информацию, можно констатировать, что, имея результаты расчетов для каждой из частей насыпи в недренированных условиях и расчета темпа строитель-

ства, можно сформировать критерии для мониторинга порового давления.

Критерии мониторинга порового давления ►

На рисунке 9 показан определенный расчетом проектный темп отсыпки, обеспечивающий стабильность основания и устойчивость насыпи. Дополнительно для каждой стадии отсыпки просчитаны варианты недренированного нагружения, позволяющего определить максимальное поровое давление и соответствующий ему коэффициент устойчивости.

На основании такого графика можно очертить области допустимых значений порового давления и таким образом получить критерии, позволяющие оценивать надежность строительства при измерении порового давления. Если наблюдаемые значения будут отклоняться от проектного, то потребуются остановка строительства и ожидание снижения порового давления до допустимых величин.

Анализ вариантов темпа отсыпки ►

Продолжительность выдержки после ступени отсыпки оказывает прямое влияние на поровое давление на следующей ступени и на запас устойчивости.

На рисунке 10 показаны изменения порового давления при недолгой (1–2) и долгой (1–4) выдержке после первой ступени отсыпки (0–1). В первом случае

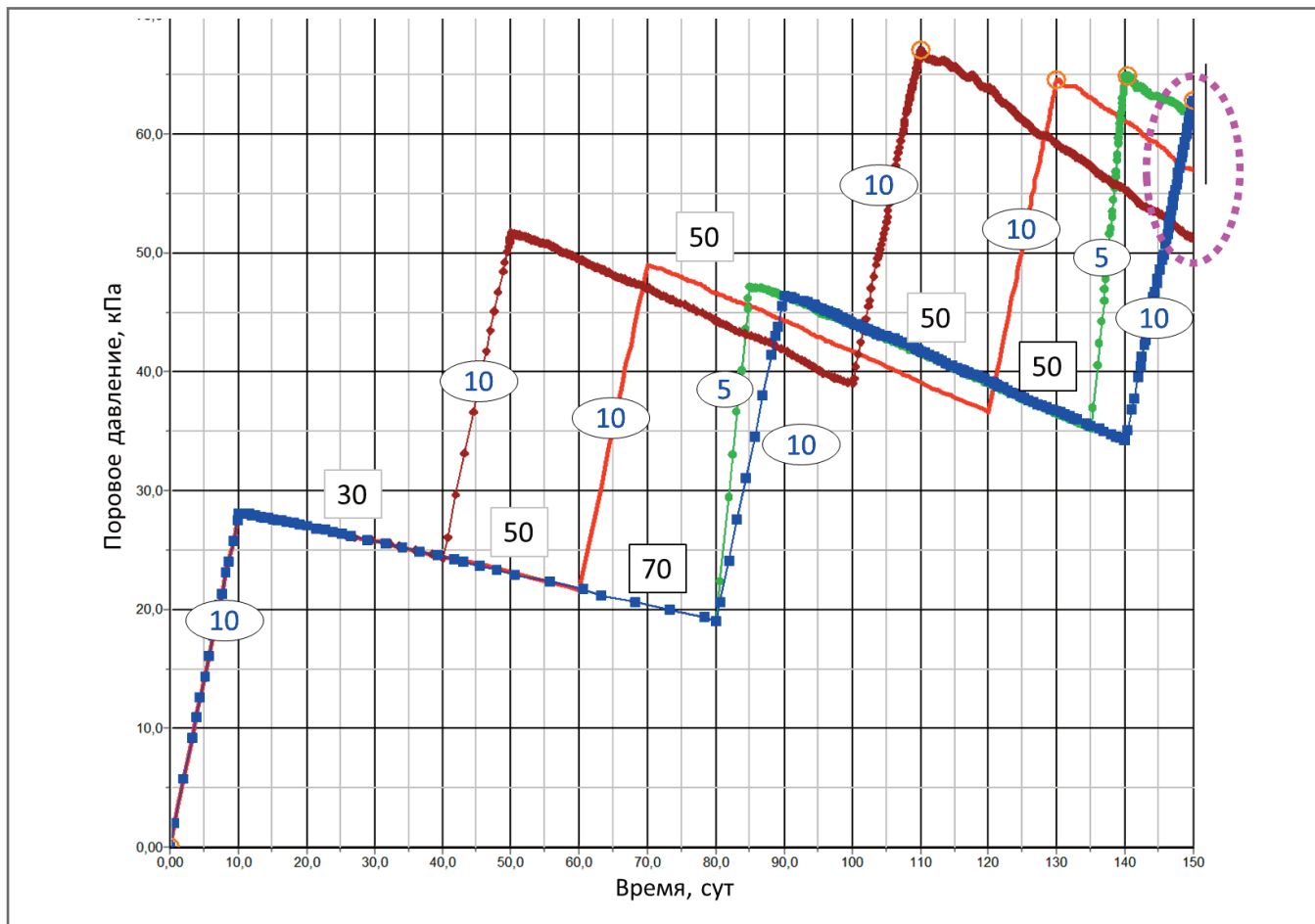


Рис. 11. Изменения порового давления во времени для вариантов возведения насыпи в пределах заданного срока

за время t_1 удается снизить порковое давление на величину ΔU_1 , что позволяет при следующей отсыпке (2–3) получить запас устойчивости около 15% ($K_y=1,15$). Если выдержка будет дольше, то есть за время t_2 (1–4), то порковое давление снизится на величину ΔU_2 и это позволит на этапе следующей отсыпки (1–5) получить больший запас устойчивости – до 30% ($K_y=1,3$).

Таким образом, чем больше выдержка отсыпанной части, тем больше запас устойчивости и надежнее строительство. Это означает, что при очень медленном темпе возведения насыпи можно обеспечить ее устойчивость без дополнительных дорогостоящих мер, однако затратив на это временной ресурс.

Однако, если задан директивный срок строительства, то необходимо выполнить отсыпку без его превышения. Для этого случая рассмотрим следующий пример. Срок строительства ограничен 150 днями. В пределах заданного срока рассмотрено разное время отсыпки-выдержки, чтобы достичь оптимального варианта (рис. 11).

Анализ результатов показывает, что нет существенно выигрышных вариантов среди рассмотренных. Но все же оп-

тимальным можно считать вариант, имеющий достаточную надежность и минимальное значение порового давления после завершения отсыпки, поскольку далее к критерию оценки надежности добавится критерий времени консолидации. В целом можно констатировать, что чем быстрее производится отсыпка, тем больше вероятность потери несущей способности и выше порковое давление к моменту завершения строительства, что повлечет за собой большую длительность консолидации. Медленная же отсыпка позволяет обеспечить только надежность, но не дает существенного снижения порового давления после завершения возведения насыпи.

Таким образом, в случае заданного срока строительства метод предварительной консолидации не дает преимуществ и требуются другие меры. Можно предположить, что армирование насыпи может обеспечить устойчивость и ускорить строительство.

Армирование силовыми геосинтетическими материалами ▶

Усиление насыпи армирующими прослойками действительно позволяет

ускорить строительство. Для примера на рисунке 12 показаны: отсыпка насыпи, усиленной армированием, и два рассмотренных ранее варианта обычной отсыпки методом предварительной консолидации. Цифрами обозначены сроки отсыпки и консолидации. Существенное ускорение как отсыпки, так и выдержки позволяет получить выигрыш во времени и при этом иметь достаточный запас надежности по результатам оценки устойчивости (в приведенном примере предполагается допустимое значение коэффициента устойчивости $[K_y]$ в строительный период, равное 1,03). Увеличение темпа отсыпки приводит к росту порового давления и снижению коэффициента устойчивости: для варианта обычной отсыпки $K_y=1,05$; для варианта с армированием, где порковое давление выше, $K_y=1,03$.

Однако у такого способа есть недостаток: большой темп приводит к тому, что порковое давление не успевает рассеиваться и накапливается. И если влияние порового давления на критерий надежности (K_y) можно компенсировать армирующими прослойками, то по критерию интенсивности осадки

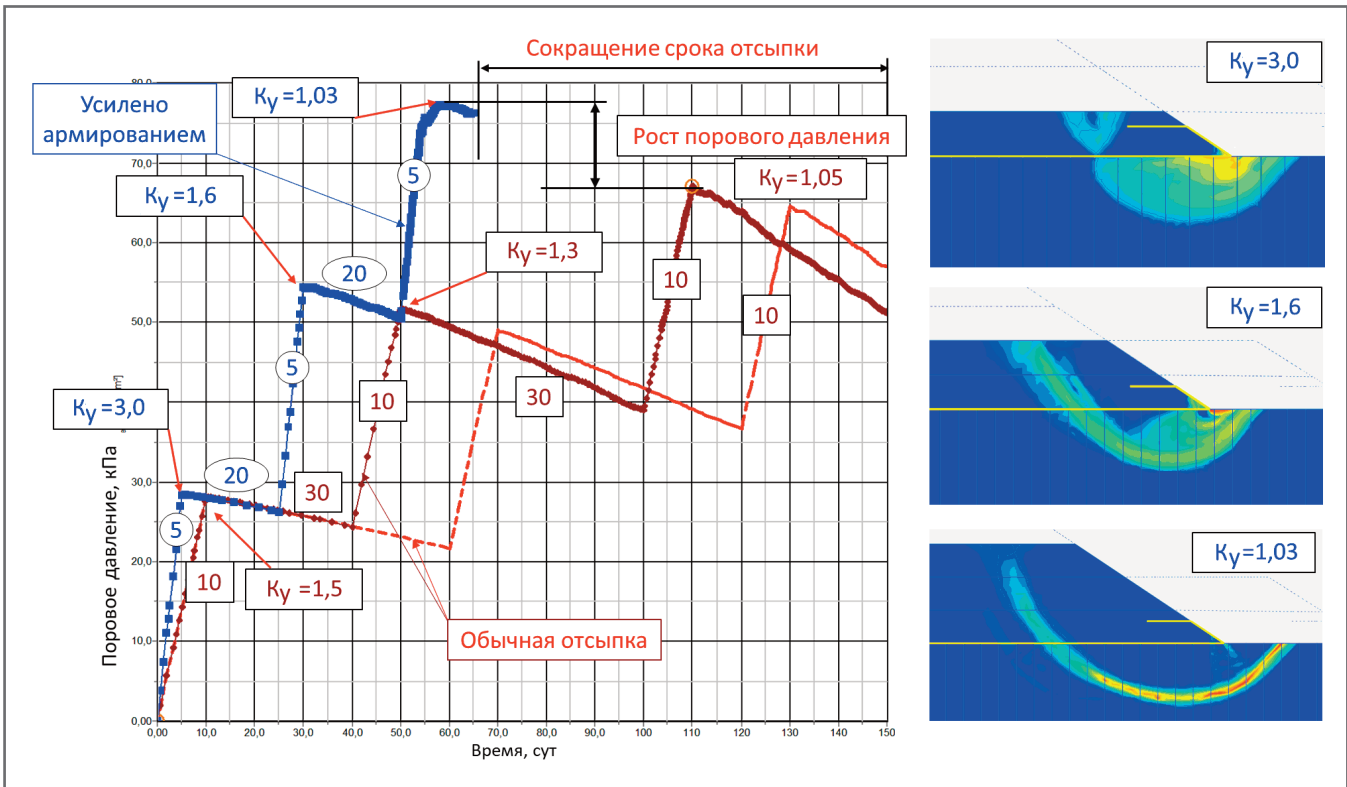


Рис. 12. Изменения порового давления во времени при строительстве армированной насыпи в сравнении с двумя обычными вариантами отсыпки

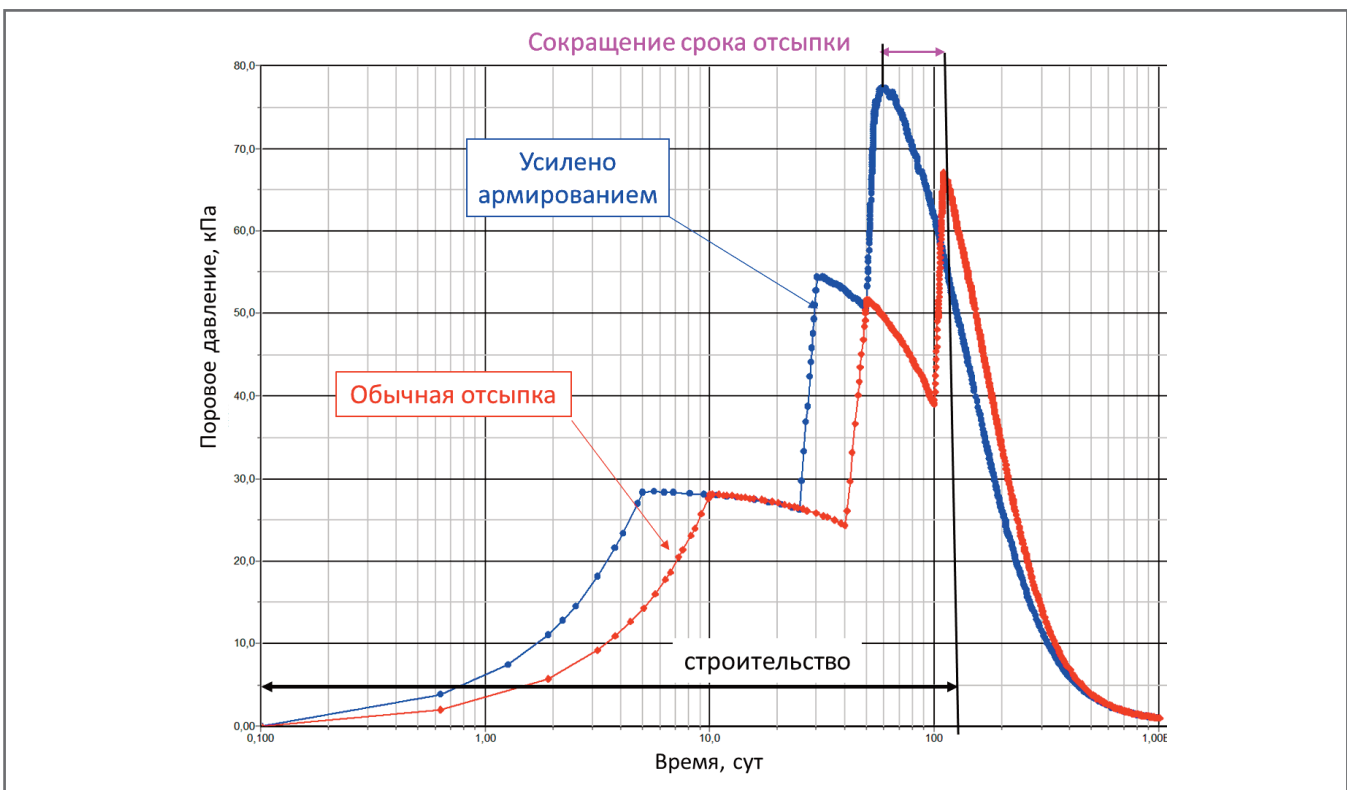


Рис. 13. Изменения порового давления во времени при строительстве насыпи методом предварительной консолидации (в обычном темпе) и при ее ускоренном возведении с армированием

этот вариант существенно проигрывает отсыпке с обычной скоростью.

На рисунке 13 сопоставлены два варианта – строительство насыпи методом предварительной консолидации (в обыч-

ном темпе) и ее ускоренное возведение с армированием. Кривые консолидации для обоих вариантов близки между собой и сокращение сроков отсыпки не влияет на время консолидации.

Временная пригрузка ►

Другим вариантом оптимизации длительности строительства может быть временная пригрузка (нагрузка от временной досыпки). Считается, что

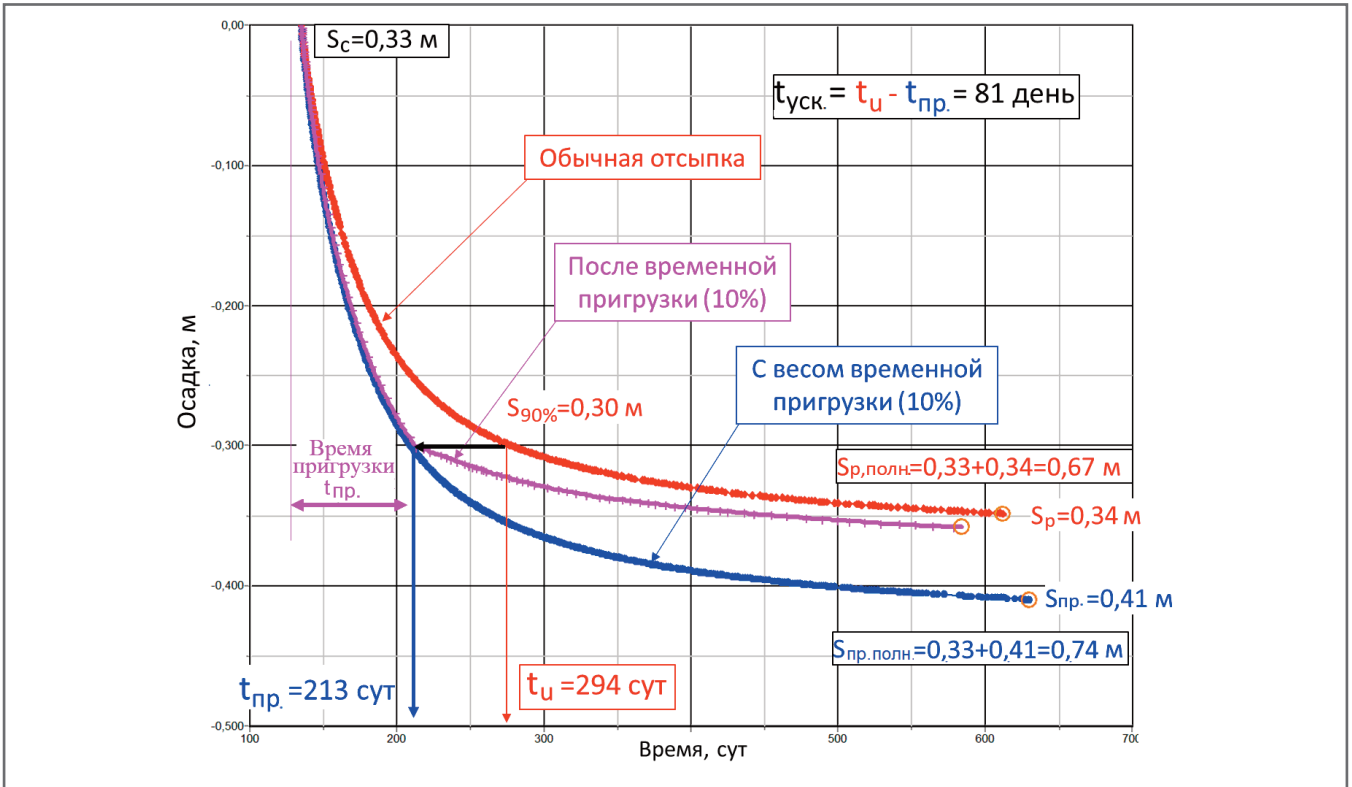


Рис. 14. Пример расчета времени, необходимого для выдерживания пригрузки

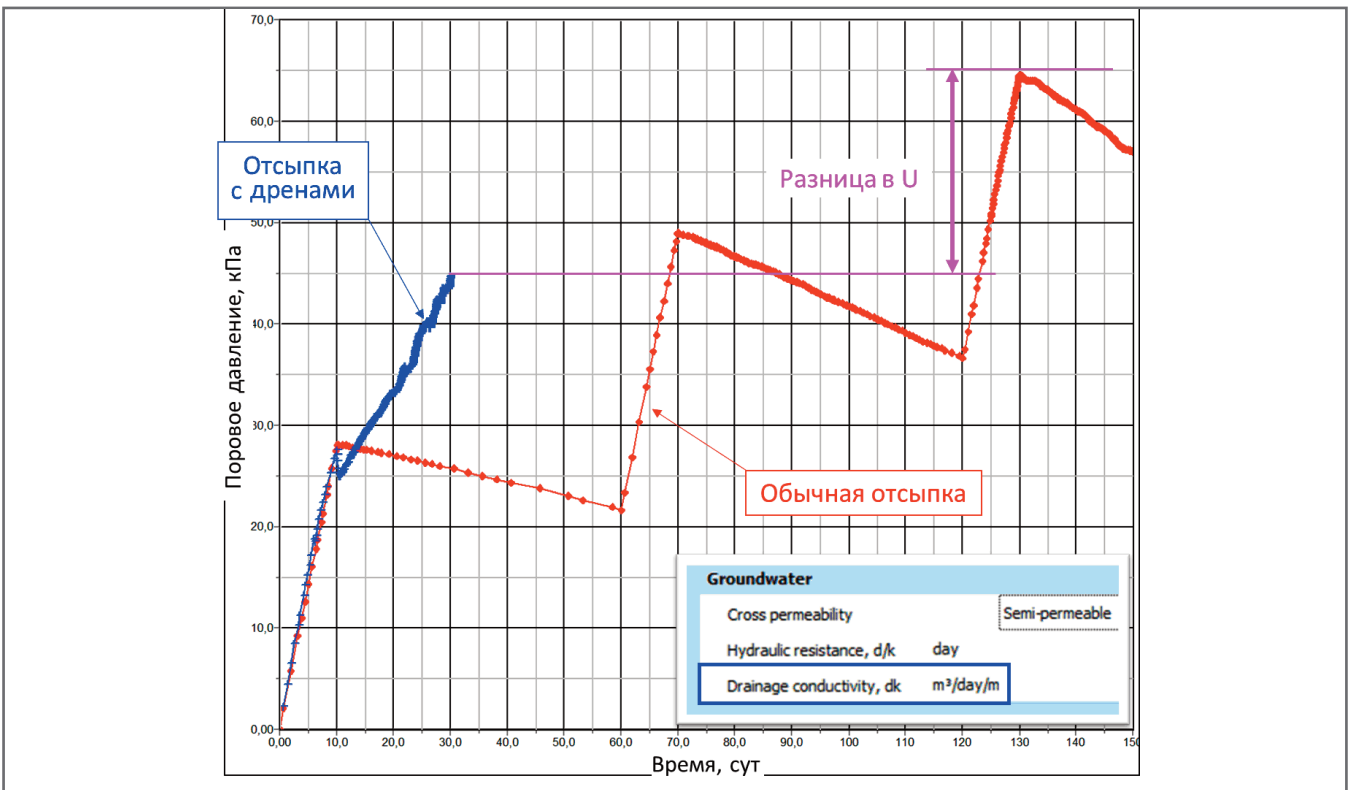


Рис. 15. Варианты отсыпки без дрен и с дренами, заданными в программе PLAXIS элементом interface с понижением проницаемости

при увеличении давления на основание его осадка может быть достигнута быстрее. Рекомендуется принимать толщину пригрузочного слоя, составляющую 0,2–1,0% от проектной высоты насыпи в зависимости от несущей способности основания, но не более 2 м.

Суть этого метода состоит в создании временной пригрузки, превышающей вес насыпи на ΔP , в результате чего расчетная осадка S_p с заданной степенью консолидации U завершается за время $t_{пр.}$, значительно меньшее, чем время t_u при обычной консолидации без

ускорения оседания. Об эффективности данного способа можно судить по времени ускорения осадки $t_{уск.}$.

Для примера рассмотрим насыпь высотой 4,5 м на слабом слое грунта, для которой устраивалась временная пригрузка высотой 10% от высоты са-

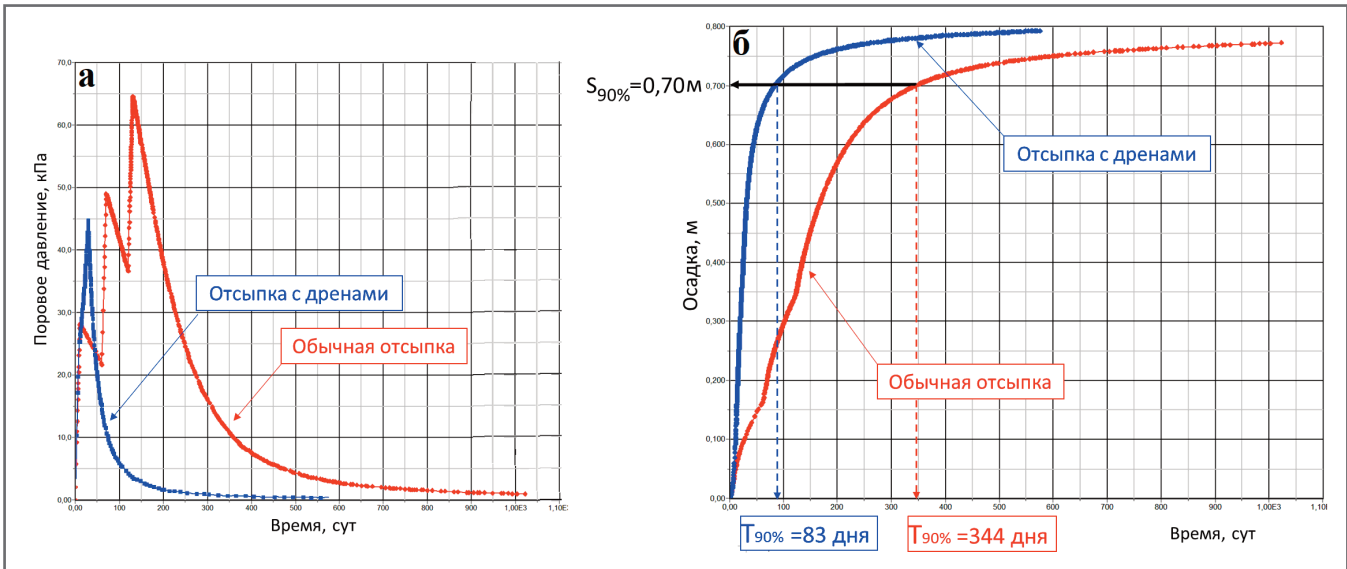


Рис. 16. Отсыпка и консолидация насыпи при использовании вертикальных дрен и без них: изменения порового давления (а) и развитие осадки (а) во времени

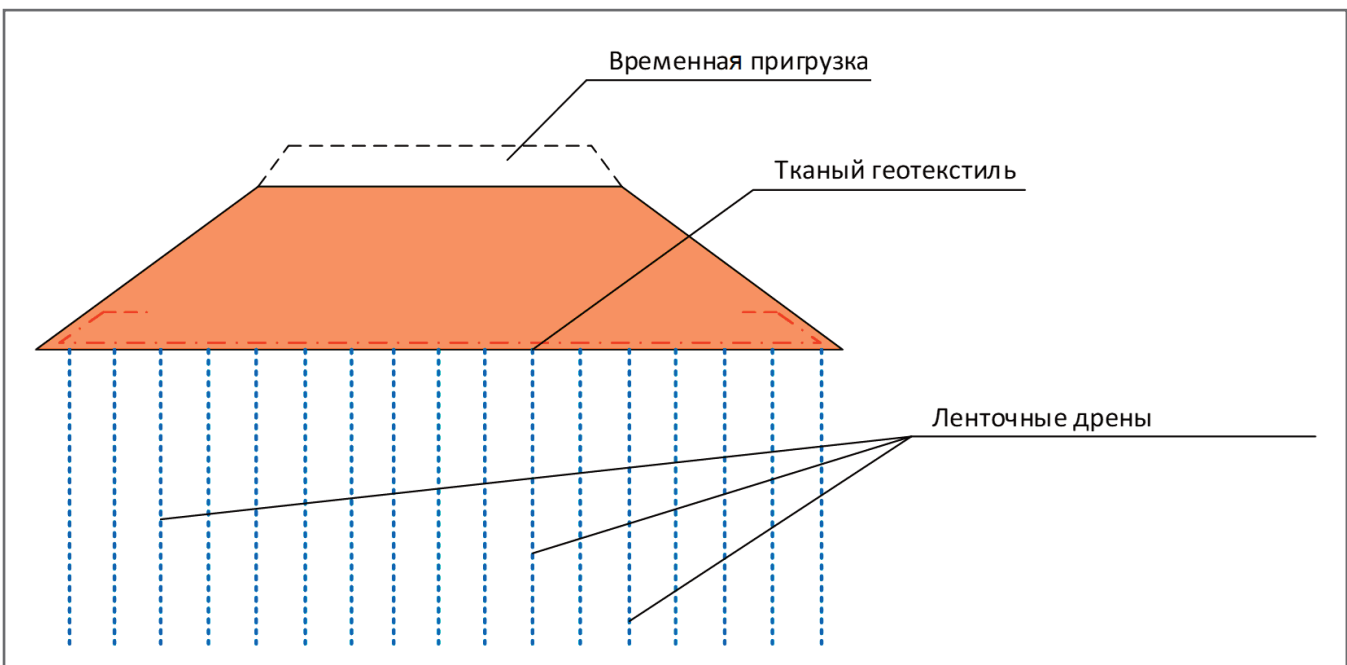


Рис. 17. Комбинированное решение. Схема армированной насыпи с ленточными дренами в основании и временной пригрузкой в поперечном разрезе

мой насыпи. На рисунке 14 приведены графики развития осадок в процессе консолидации после строительного периода. Строительная осадка S_c составила 33 см. Далее было рассмотрено два варианта развития консолидации – под действием веса насыпи (при обычной отсыпке) и под действием веса насыпи с пригрузкой. Вертикальная шкала была обнулена после завершения строительной осадки. Изменения показаны только для процесса фильтрационной консолидации. Расчетная осадка насыпи без пригрузки за время фильтрационной консолидации (S_p) была равна 34 см. Полная осадка $S_{p,полн.}$

составила 67 см. В качестве критерия фильтрационной консолидации было принято достижение 90% от полной осадки, в результате чего осадка $S_{90\%}$ получилась равной 30 см, а соответствующее время t_u – 294 сут. Осадка насыпи с пригрузкой высотой 10% от высоты насыпи до завершения консолидации ($S_{пр.}$) составила 41 см, полная осадка $S_{п.полн.}$ – 74 см. Время $t_{пр.}$, необходимое для достижения равенства осадок $S_{90\%}$ и $S_{пр.}$, получилось равным 213 сут. Это время, в течение которого необходимо выдержать пригрузку. Таким образом, время ускорения осадки $t_{уск.}$ составило 81 день.

Увеличение высоты временной пригрузки имеет следующие особенности:

- большой вес обеспечивает ускорение осадки, то есть дает возможность сократить время консолидации;
- при этом в случае отсутствия дополнительных мер потребуется увеличить общее время строительства, поскольку при большей высоте сооружения (насыпи и пригрузки) требуется обеспечение стабильности основания за счет более щадящей технологии строительства (увеличения длительности выдержек между отсыпками);
- более интенсивное развитие осадки приводит к большей суммарной осадке

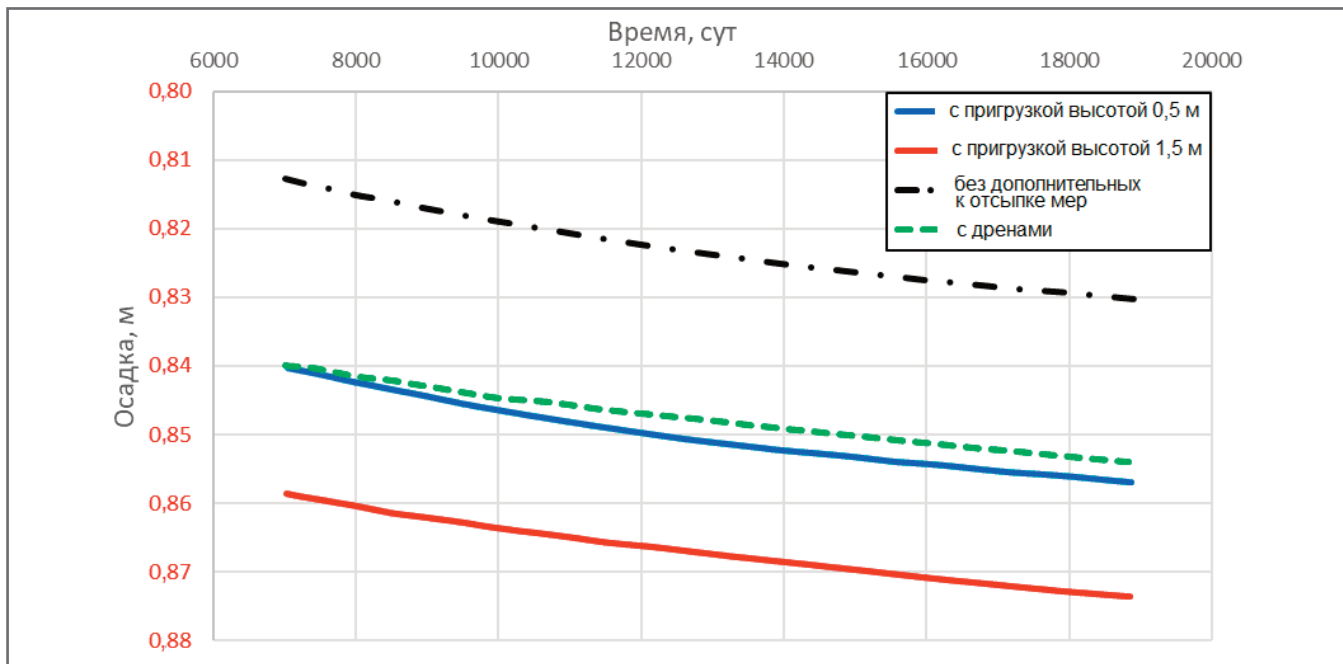


Рис. 18. Фрагменты графиков консолидации (вторичной)

к расчетному моменту времени по сравнению с результатом обычной отсыпки насыпи;

- последнее обстоятельство не позволяет говорить об эффективности пригрузки по отношению к длительной осадке.

Вертикальное дренирование ►

В транспортном строительстве традиционно применяется метод ускорения консолидации и обеспечения упрочнения грунта. Специфика погружения дрен приводит к образованию зоны затирания (*smear zone*) стенки скважины и снижению проницаемости прилегающей к дрене области, что необходимо учитывать в расчетах. Кроме того, на последних этапах фильтрационной стадии осадки дрена подвергается перегибам и изломам, особенно в области, близкой к подошве насыпи.

Однако в целом вариант вертикального дренирования с применением современных геосинтетических ленточных дрен имеет ряд преимуществ. И в тех случаях, когда на объекте соблюдаются необходимые условия применения дрен, их эффективность достаточно высока.

При численном моделировании дрен рекомендуется активировать их на том этапе отсыпки насыпи, когда ее высота достаточна для создания порового давления, градиент которого превышает начальный. Эта высота определяется по формуле, приведенной в нормативных документах по расчетам ленточных дрен. В программе PLAXIS моделиро-

вание дрен может быть выполнено в нестандартной форме – с применением вместо элемента *drain* элемента *interface*, при использовании которого регулируется поперечная и продольная пропускная способность.

Для примера на рисунке 15 отражено строительство насыпи для вариантов с дренами и без них. Дрены были активированы после первой стадии отсыпки, поэтому на первом участке графики практически одинаковы. Активированные дрена начинают оказывать влияние уже на этапе отсыпки насыпи. Эффективность их работы зависит от горизонтального коэффициента фильтрации грунтов, расстояния между дренами и других факторов. Таким образом, дрена позволяют получать экономию времени уже на этапе отсыпки.

Основной эффект от применения вертикального дренирования получается на стадии консолидации. На рисунке 16 показаны полные варианты графиков отсыпки с дренами и без них. На рисунке 16, а приведен график консолидации, на котором видна разница в интенсивности фильтрационной консолидации за счет вертикального дренирования. На рисунке 16, б показано развитие осадки во времени, где видно, что интенсивность оседания с дренами намного выше и время достижения 90%ной консолидации $T_{90\%}$ достигается существенно быстрее, чем в случае обычного варианта отсыпки методом предварительной консолидации. Применение ленточных дрен позволяет влиять на процессы ползучести скелета грунта

за пределами фильтрационной части зоны консолидации.

Комбинированный вариант стабилизации ►

У каждой из рассмотренных выше противодеформационных мер есть свои достоинства и свои недостатки.

Наиболее эффективным для стабилизации основания и ускорения консолидации является совмещение нескольких способов с компенсацией недостатков одного варианта преимуществами другого. Например, это может быть армированная насыпь с ленточными дренами в основании и временной пригрузкой.

Такая конструкция имеет следующие преимущества.

Во-первых, она обеспечивает *устойчивость насыпи при быстром темпе отсыпки*. Наличие армирующей прослойки обеспечивает устойчивость насыпи при отсыпке на нестабилизированное основание с любым требуемым темпом отсыпки, который определяется расчетом.

Во-вторых, происходит *ускорение консолидации*. Ленточные дрена в основании обеспечивают более быстрый «отток» порового давления, что позволяет существенно сократить время консолидации.

В-третьих, обеспечивается *упрочнение грунтов основания (повышение его несущей способности)*. Кроме уменьшения времени консолидации грунтов выбор такого варианта приводит к их естественному упрочнению, повыше-

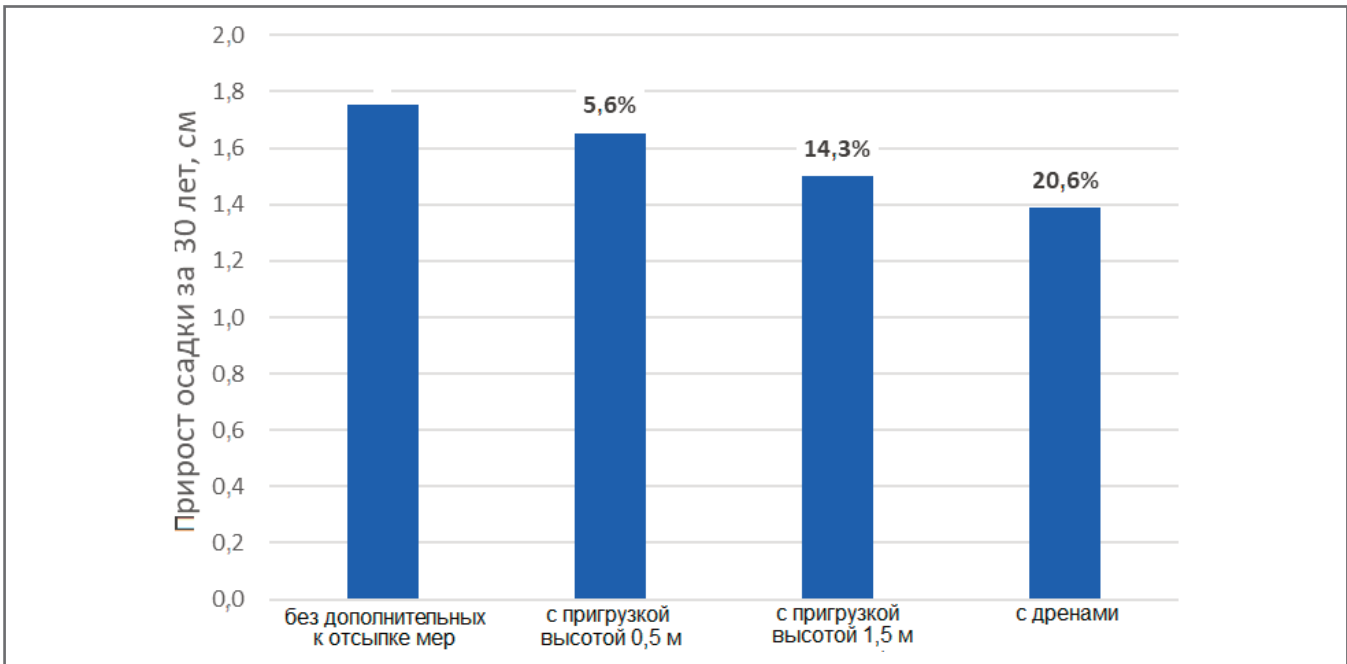


Рис. 19. Сравнение влияния на вторичную консолидацию для вариантов отсыпки с дополнительными мерами по сравнению с обычной отсыпкой без них. Наверху указаны процентные доли снижения приростов осадок

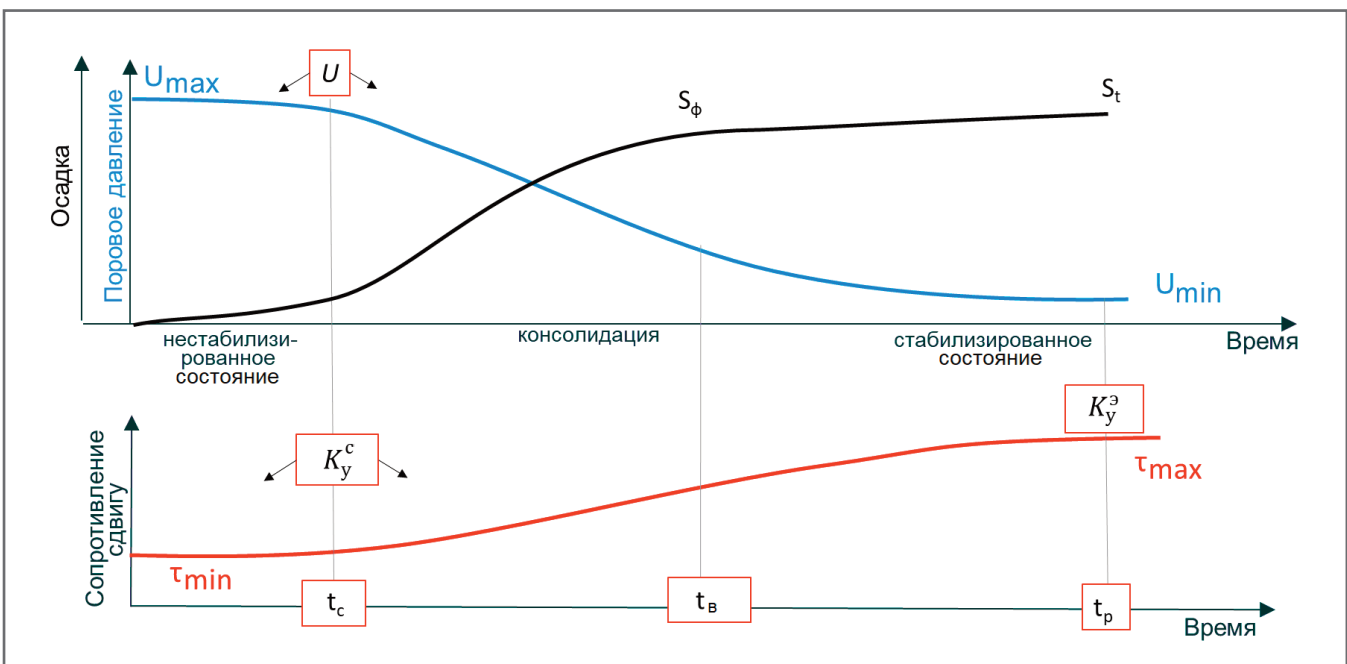


Рис. 20. Основные закономерности поведения насыпи на слабом основании во времени и его критерии

нию устойчивости насыпи и стабильности основания. Использование временной пригрузки уменьшает влияние ползучести (вторичной консолидации), что особенно важно для ВСМ, для которых нормируются осадки за срок службы.

Эффективность рассматриваемой конструкции определяется такими ее составляющими, как:

- *ленточные дренаи*, которые обеспечивают упрочнение грунта и ускорение консолидации (их наличие делает влияние временной пригрузки намного эффективнее);

- *армирование*, которое дает устойчивость до начала работы ленточных дрен, а также позволяет увеличить высоту пригрузки в соответствии с расчетами;
- *временная пригрузка*, которая вызывает принудительное деформирование слабого слоя (а после ее снятия, особенно если ее давление близко к давлению транспорта, остаточные деформации будут минимизированы или исключены).

Длительная осадка ►

С помощью полноценных геотехнических расчетов с использованием числен-

ных методов и комплексных геомеханических моделей грунтов можно оценить влияние рассмотренных мер на процессы вторичной консолидации. Это важно при проектировании ВСМ, для которых критерий осадки за время эксплуатации уже внедрен в нормативные документы. На рисунке 18 приведены фрагменты графиков консолидации за время от 20 до 50 лет, относящиеся к вторичной консолидации (ползучести), для приведенных выше вариантов строительства.

Кривые осадок на рисунке 18 не имеют «полки», то есть оседание про-

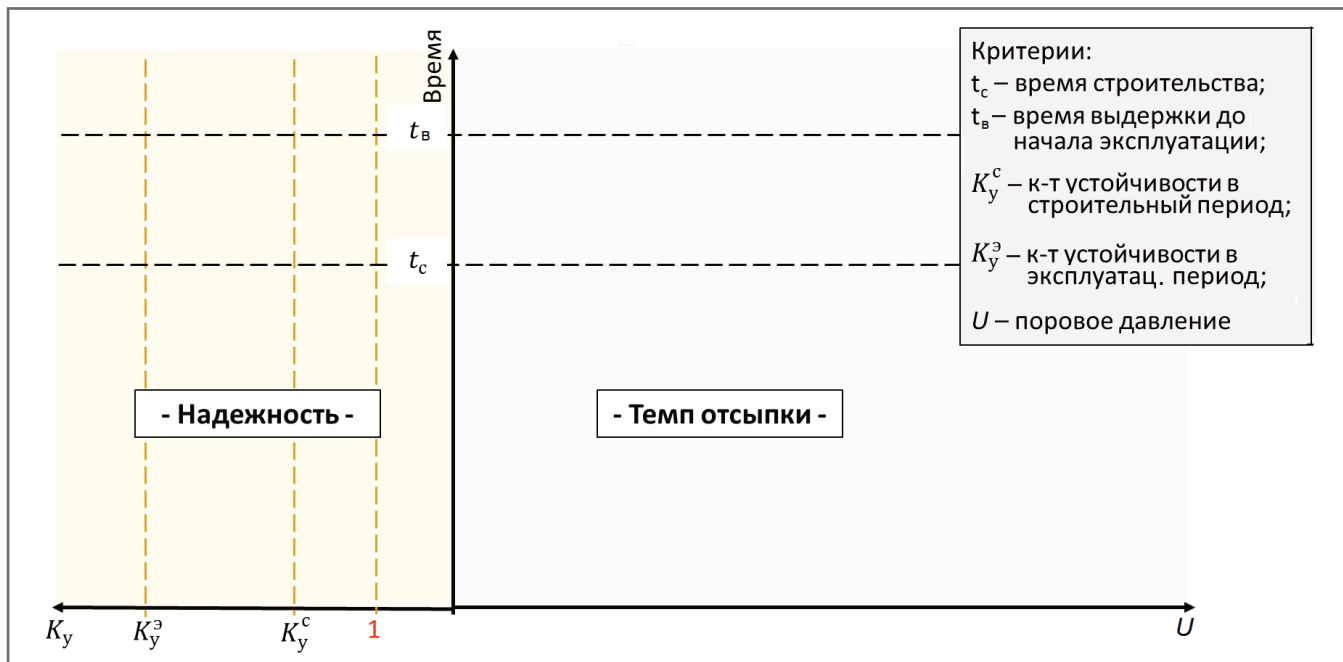


Рис. 21. Области оценки надежности (слева) и темпа отсыпки (справа) для разработки вариантов проектных решений

долгается бесконечно долго (это так называемые вековые осадки), только их интенсивность со временем снижается. Для сравнения вариантов были вычислены приросты осадок за 30-летний период, чтобы показать, насколько каждая мера оказывает влияние на ползучесть. На рисунке 19 продемонстрированы вычисленные приросты осадок за указанное время и проценты их снижения для разных вариантов с дополнительными мерами по сравнению с обычной отсыпкой насыпи.

Таким образом, анализ показал, что чем больше высота пригрузки и чем быстрее протекает фильтрационная часть консолидации, тем эффективнее подавляется проявление реологических свойств грунтов.

Принципы геотехнического проектирования

Из положений механики грунтов известно, что избыточное поровое давление, возникающее при нагружении слабопроницаемых и сильносжимаемых грунтов, оказывает влияние как на осадку и консолидацию, так и на сопротивление сдвигу и устойчивость. В общем виде взаимосвязь между этими параметрами можно представить в виде графиков изменений порового давления, сопротивления сдвигу и осадки во времени (рис. 20). Выделяют следующие основные критерии для расчетов и проектирования: время строительства t_c ; время выдержки до начала эксплуатации t_b ; расчетное время эксплуатации t_p ; коэффициент устойчивости в строи-

тельный период K_y^c ; коэффициент устойчивости в эксплуатационный период $K_y^э$; поровое давление U ; осадка насыпи S_t к расчетному моменту времени t_p ; осадка насыпи S_ϕ к моменту завершения фильтрации.

Возникающее при нагружении основания поровое давление снижает трение в грунте, способствуя переходу в предельное состояние. Величина порового давления зависит от темпа строительства, последовательности приложения нагрузок и фильтрационных характеристик грунтов. Учет указанных факторов позволяет обеспечить надежность сооружений с одной стороны и экономичность их возведения с другой.

На комбинированном рисунке 21 продемонстрированы взаимное влияние указанных факторов и учет нормативных критериев проектирования. Слева показана область оценки надежности, где по горизонтальной оси отложены значения коэффициента устойчивости (на этой оси отмечены основные критерии для строительного и эксплуатационного периодов – коэффициент устойчивости в строительный период K_y^c и коэффициент устойчивости в эксплуатационный период $K_y^э$). А с правой стороны рисунка показана область оценки темпа отсыпки, где по горизонтальной оси отложены значения порового давления. По общей вертикальной оси отложено время (на ней отмечены временные ограничения по продолжительности строительства и эксплуатации).

На рисунке 22 для примера сопоставлены два варианта проектных ре-

шений: с применением метода предварительной консолидации и с использованием системы вертикального дренирования в виде геосинтетических ленточных дрен. В правой части рисунка на графиках зависимости порового давления U от времени t нагружение 0–1 в быстром темпе приводит к достижению предельно допустимого значения порового давления U_1 и разрушению. В левой части на графиках зависимости коэффициента устойчивости K_y от времени t медленная отсыпка с выдержками 0, 2, 3, 4, 5, 6 обеспечивает безопасное строительство, однако на момент завершения отсыпки (в точке 6) коэффициент запаса меньше значения, требуемого по нормативным документам. Вариантом решения проблемы может стать увеличение длительности выдержки 4–5 перед отсыпкой последней части насыпи. Длительность выдержки 4–7 позволяет снизить поровое давление с U_2 до U_3 , что обеспечивает удовлетворение критерия устойчивости в строительный период (в точке 7). Надежность обеспечена также и для периода эксплуатации, но этот вариант строительства нарушает заданные сроки начала эксплуатации (в точке 8).

Альтернативный вариант строительства с использованием ленточных дрен удовлетворяет критериям как для стадии строительства, так и для стадии эксплуатации. На основании подобного анализа принимается решение о выборе того или иного варианта противодеформационных мер с учетом технологиче-

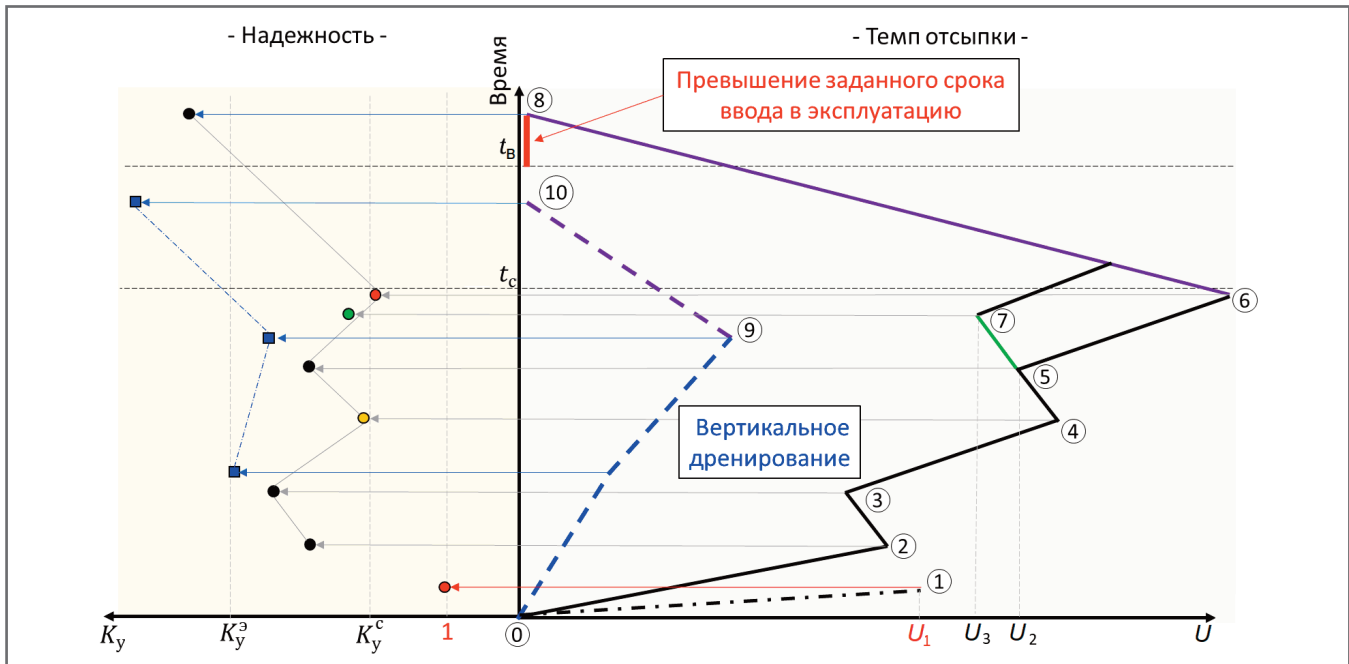


Рис. 22. Сопоставление двух вариантов проектных решений (с применением метода предварительной консолидации и с использованием системы вертикального дренирования в виде геосинтетических ленточных дрен) для демонстрации принципа индивидуального проектирования насыпей на слабом основании с учетом порового давления на конкретном примере

ских особенностей, оценки надежности и контроля сроков.

Заключение ►

Проектирование насыпей на слабых грунтах требует особого подхода. Принятие проектного решения полностью основано на геотехнических расчетах. Наиболее полноценными являются совместные расчеты деформаций, времени их реализации, стабильности и устойчивости. Совместность расчетов обеспечивается численными методами расчетов (методом конечных элемен-

тов) с использованием математических моделей.

Поровое давление зависит от скорости нагружения и проницаемости грунтовой толщи. Оно оказывает влияние на стабильность основания и на устойчивость сооружения. Его контроль необходим при возведении насыпей. Критерии для мониторинга порового давления должны быть получены на основании прогнозной расчетной схемы.

Выбор мер по усилению и стабилизации основания или по ускорению сроков консолидации осуществляется с по-

мощью вариантных расчетов. Эффективность одной меры или их комбинации определяется по критериям нормативных документов – прогнозной скорости осадки и оценке надежности.

Проектирование транспортных объектов неизбежно встречается с пересечением трассой участков, сложенных слабыми грунтами. Назначение индивидуального или группового проектного решения для строительства авто- и железных дорог не представляется возможным без расчетов с участием геотехников. **и**



Telegram-канал журнала

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>