

На правах рукописи

ЧАН Куок Дат

ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЛАБЫХ ОСНОВАНИЙ
ДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ СВЯЯМИ-ДРЕНАМИ

(05.23.11— Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2010

Работа выполнена в Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете на кафедре «Инженерная геология и геотехника».

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Добров Эдуард
Михайлович

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук,
профессор Казарновский
Владимир Давидович

кандидат технических наук,
доцент Кириллова Наталия
Юрьевна

Ведущая организация: РОСДОРНИИ, ФГУП

Защита диссертации состоится 18 ноября 2010 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.126.02 ВАК в Московском автомобильно - дорожном государственном техническом университете (МАДИ) по адресу:

125319, Москва, А - 319, Ленинградский проспект, 64, ауд. 42.

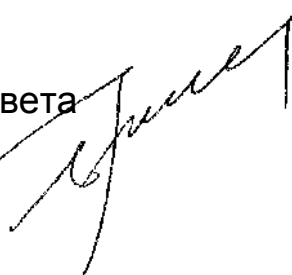
Просьба высылать отзывы в количестве двух экземпляров, заверенные печатью, по указанному адресу. Копию отзыва просим прислать по

E-mail: uchsovet@madi.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАДИ.

Автореферат разослан " " октября 2010 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
Кандидат технических наук, профессор



Борисюк Н.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

При строительстве автомобильных в ряде случаев возникает необходимость увеличения несущей способности слабых оснований дорожных насыпей. Для этих целей весьма эффективной оказалась использование конструкции из вертикальных песчаных свай-дрен, которые не только ускоряют процессы консолидации слабых грунтов основания, но изменяя условия работы грунта в слабом основании инженерных сооружений, способствуют уменьшению величины их конечных осадок.

Это явление в настоящее время объясняется проявлением «свайного» эффекта, возникающего в слабом основании при наличии песчаных дрен и позволяющему рассматривать эту конструкцию как обладающей дополнительной несущей способностью, а сами вертикальные дрены уже как грунтовые сваи-дрены.

Проблема увеличения несущей способности слабых оснований с помощью грунтовых свай-дрен приобретает самостоятельное звучание и особую актуальность в случаях реконструкции участков автомобильных дорог, расположенных на слабых основаниях, когда требуется повысить капитальность дорожных одежд и жесткость дорожной конструкции в целом.

Цель и задачи диссертации.

Целью диссертационной работы является разработка теоретических и методических основ прогноза степени увеличения общей несущей способности слабых оснований дорожных насыпей за счет устройства вертикальных грунтовых свай-дрен.

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи исследований.

- Используя метод конечных элементов (МКЭ), изучить особенности формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) элемента грунтовой толщи слабого основания с учётом различных параметров его вертикальной неоднородности по прочностным и деформационным характеристикам, моделирующих условия совместной работы слабого грунта и песчаной сваи-дрены.

- Методами математического моделирования выявить основные особенности НДС слабых оснований при устройстве свай-

дрен и оценить степень влияния их диаметра, длины, сближения, мощности слабого слоя и его прочностных и деформационных характеристик.

- Результаты математического моделирования сравнить с имеющимися результатами аналитического, физического и оптического моделирования.

- Разработать рекомендации по методам повышения несущей способности дорожных насыпей, сооружаемых на слабых основаниях в том числе и применительно к условиям Вьетнама.

Методика исследований.

Для решения поставленных задач была использована программа «Плакис», реализующая метод конечных элементов (МКЭ). Аналитически и на ее основе изучены особенности формирования напряженно–деформированного состояния (НДС) слоя насыпного грунта и элемента грунтовой толщи слабого основания с учётом различных параметров его вертикальной неоднородности по прочностным и деформационным характеристикам, моделирующих условия работы слабого грунта и грунтовой свай-дрены.

Научная новизна:

- установлены основные закономерности и особенности формирования компонентов напряженно-деформированного состояния (НДС) слабых оснований дорожных насыпей при наличии грунтовых свай-дрен;

- выявлены закономерности, особенности и условия формирования зон предельного состояния толщи насыпных грунтов, перекрывающих свайное основание, и их взаимосвязь с геометрическими параметрами грунтовых свай;

- установлена степень влияния на равномерность накопления осадок дорожной насыпи ее высоты, диаметра грунтовых свай-дрен и расстояний между их осями; количественно определены минимальные высоты дорожных насыпей (или толщины слоя насыпных грунтов), при которых деформации их осадок носит равномерный характер;

- установлено, что эффективность использования грунтовых свай в качестве мероприятия по повышению несущей способности слабых оснований зависит от соотношения прочностных

параметров грунта, используемого для устройства свай, а также слабого грунта оснований и степени его насыщения грунтовыми сваями.

Практическая ценность работы:

состоит в дальнейшем совершенствовании методических основ проектирования дорожных конструкций, сооружаемых в сложных инженерно-геологических условиях, позволяющих более обосновано использовать грунтовые сваи-дрены в качестве конструктивно-технологического мероприятия, направленного на увеличение несущей способности земляного полотна на слабых основаниях.

Достоверность полученных результатов обоснована:

- строгостью исходных предпосылок и применяемых методов исследований;
- сравнением результатов тестовых расчетов и известных экспериментальных данных;
- сопоставлением результатов с известными положениями механики грунтов, строительной механики, теории упругости;
- квалифицированным использованием известной лицензионной программы Плакис (software Plaxis version 8.2).

На защиту выносятся:

- результаты теоретического анализа влияния на повышение несущей способности слабого основания грунтовых свай-дрен;
- результаты аналитических и численных исследований на математических моделях особенностей НДС слоя насыпного грунта и элемента слабого основания с учетом присутствия свай-дрен
- результаты сравнения полученных результатов с результатами физического и оптического моделирования;
- рекомендации по практическому учету полученных результатов при проектировании и строительстве автомобильных дорог на слабых основаниях.

Апробация работы и публикации.

Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались автором на научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ (ГТУ) в 2010г. По материалам диссертации опубликованы 3 печатные работы.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и общих выводов. Основной текст диссертации содержит 170 стр. печатного текста, 106 рисунков и 22 таблиц. Библиография состоит из 39 наименований использованных литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертации, сформулирована ее цель, научная новизна и практическая значимость.

Первая глава диссертации посвящена рассмотрению основных проблем, связанных со строительством дорожных насыпей на слабых грунтах в России и в других странах. Отмечается, что проблема строительства дорог в сложных условиях, в местах распространения специфичных видов грунтов (торфяные и органоминеральные отложения, илы различного происхождения, иольдиевые глины, мокрые солончаки и т.п.), не потеряла своей актуальности и в настоящее время, особенно в России и во Вьетнаме. Избыточное увлажнение, низкая несущая способность, высокая сжимаемость и другие неблагоприятные свойства таких грунтов существенно осложняют и удорожают строительство дорог.

Первые плодотворные шаги в решении этой проблемы были сделаны еще в тридцатые годы XX века когда лишь начиналось строительство современных автомобильных дорог в России.

Выполненные в эти годы под руководством Н.Н.Иванова работы Н.П.Кузнецовой, Л.А.Братцева, А.А.Арсеньева, В.Ф.Бабкова обеспечили решение многих вопросов, возникших в то время в практике дорожного строительства. В железнодорожном строительстве близкие задачи решали К.С.Ордуянц, Н.Н.Сидоров, Г.М.Шахунянц, а позднее И.И.Викторов, А.А.Ткаченко и И.И.Канатов.

Проблема строительства дорог на слабых грунтах приобрела особую остроту в начале 60-х годов прошлого века в связи с созданием транспортной сети для освоения богатых природных ресурсов Севера Европейской части бывшего СССР и Западной Сибири. Успешному ее решению в значительной степени

способствовали успехи в теории механики грунтов, инженерной геологии, грунтоведении и реологии.

Существенный вклад в развитие этих областей знаний внесли советские ученые Н.М.Герсеванов, Н.Н.Маслов, М.Н.Гольдштейн, В.А.Флорин, Н.А.Цытович, Б.В.Дерягин, П.А.Ребиндер, Е.М.Сергеев, С.С.Вялов, Ю.К.Зарецкий. А также зарубежные исследователи К.Терцаги, Л.Лемб, А.Бишоп, Р.Пек, А.Скемптон и др.

Важное значение имело развитие исследований в области использования слабых грунтов в основаниях строительных сооружений, выполненных в гидротехническом и мелиоративном строительстве (К.П.Лундин, И.И.Вихдяев, П.А.Дрозд, А.М.Силкин и другие), промышленном и гражданском строительстве (Б.И.Далматов, М.Ю.Абелев, Н.Н.Морарескул, А.С.Строганов и другие), а также по изучению свойств различных слабых грунтов (Л.С.Амарян, И.М.Горькова, С.С.Корчунов, Н.Я. Денисов, И.И.Лиштван, Г.В.Сорокина, А.К.Ларионов и др.).

Применительно к задачам дорожного строительства в составе нового направления исследований широкий круг вопросов, связанных с устройством переходов через торфяные болота, рассмотрен в работах И.Е.Евгеньева, В.Д. Казарновского, Э.М. Доброва, В.Н. Яромко, Э. К. Кузахметовой и др.

Разработка инженерных конструкций и методов расчета оснований на слабых грунтах в этот период интенсивно проводилась в США (L.Casagrande, W.Weber и др.), в Канаде (K.Anderson, I.Mac Farlane, R.Redforth), в Швейцарии (A.Moos, F.Jaeklin и др.), во Франции (F.Bourges, G.Pilot и др.), в ФРГ (R.Floss, A.Ducker и др.), Нидерландах, Японии и других странах.

Опыт показывает, что возникают три основные задачи, с которыми неизбежно приходится сталкиваться при использовании слабых грунтов в основании насыпи: **первая задача** - обеспечение устойчивости основания, т.е. исключение или ограничение возможности выдавливания грунта основания за пределы контура подошвы насыпи; **вторая задача** - оценка и учет возможной конечной величины и хода во времени осадки насыпи, вызванной консолидацией, т.е. уплотнением грунта ее основания под воздействием нагрузки от веса насыпи; **третья задача** - учет своеобразного эффекта от воздействия транспортной нагрузки,

связаного с возникновением в определенных условиях чрезмерно интенсивных колебаний насыпи, приводящих покрытие к преждевременному разрушению.

Далее в этой главе изложена краткая инженерно-геологическая характеристика основных представителей слабых грунтов на Севере Вьетнаме и их частные классификации.

Рассмотрены наиболее распространенные конструкции земляного полотна на переходах через болота и отложения слабых грунтов. Отмечается, что одной из наиболее эффективных является конструкция из вертикальных песчаных свай, которые, сокращая путь фильтрации, уменьшают время накопления осадки насыпи. Изменяя расстояние между дренами, можно добиться теоретически любой скорости уплотнения слабого грунта под насыпью.

Более того, исследования И.Лейка и Фрэзера (1959-1969), а также Свен Хансбо (1960) позволили установить, что песчаные дренажи могут значительно повысить устойчивость слабого основания при мгновенном нагружении, проявляя так называемый эффект сваи, или эффект колонны («pile effect», «column effect»).

Применительно к условиям проектирования и строительства дорожных насыпей на иольдиевых глинах А.Г. Полуновским (1970) были выполнены экспериментальные и теоретические исследования, позволивших дать в первом приближении методику его учета при прогнозе величины и длительности деформаций консолидации слабых оснований.

Позднее А.С. Мохаммедом (2003) были выполнены экспериментальные и теоретические исследования, подтвердивших вывод, что увеличение несущей способности основания дорожных насыпей, по мере насыщения его грунтовыми сваями, наблюдается лишь в том случае, если прочностные характеристики грунта свай оказываются выше прочностных параметров грунтов основания, а на каждые 5% прироста насыщенности основания грунтовыми сваями приходится от 10 до 15% снижения его деформируемости и возрастание модуля деформации от 2-х до 3-х раз.

Подводя итоги изложенному, делается вывод, что в настоящее время остаются до конца не выясненными особенности формирования напряженно-деформированного состояния оснований дорожных насыпей при наличии в них грунтовых свай-

дрен и влияние этого фактора на эффективность конструкции, особенно в части учета ее особенностей не как дренирующей системы, а как свайной конструкции. Эта проблема для условий Вьетнама приобретает особую актуальность, учитывая широкую распространенность слабых покровных отложений, которые часто оказываются в основании дорожных насыпей.

Учитывая изложенное, основной целью настоящей диссертационной работы является дальнейшее совершенствование и разработка теоретическо-методических основ прогноза степени увеличения общей несущей способности слабых оснований дорожных насыпей за счет устройства вертикальных грунтовых свай-дрен и разработка рекомендаций по их применению в сложных инженерно-геологических условиях России и Вьетнама.

Вторая глава посвящена краткому изложению теоретических основ метода конечных элементов (МКЭ) и особенностям использования программы Плакисис ("Plaxis") для изучения НДС оснований сооружений.

В третьей главе диссертации учитывая, что при решении практических задач проектирования земляного полотна на слабых основаниях весьма часто возникает потребность в предварительной оценке эффективности применения грунтовых свай-дрен, была рассмотрена задача прогноза повышения несущей способности слабого основания за счет роста обобщенного модуля его деформации и степени снижения возможной его осадки. Для ее упрощения полагалось, что слабый слой основания ограничен по мощности $h_{сл}$ (рис.1) и залегает на недеформируемом основании; внешняя нагрузка $P_o = \gamma h_{нас}$ – равномерно распределённая, $h_{нас}$ – высота слоя

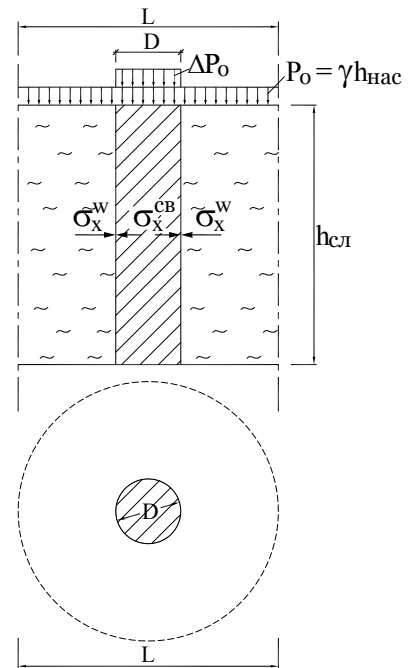


Рис.1. Расчётная схема.

насыпного грунта, вертикальные сжимающие напряжения - σ_z постоянны по всей высоте слоя слабого грунта и грунтовой сваи. Принималось также, что диаметр L элемента слабого грунта равен

расстоянию между осями грунтовых свай-дрен диаметром D . Длина сваи $h_{св}$ равна мощности слоя слабого грунта $h_{сл}$, который подстилается недеформируемом основанием. Прочностные и деформационные характеристики слабого грунта принимаются на момент приложения внешней нагрузки P_0 без учета процессов консолидации.

В этих условиях оказывается, что для достижения равновесного состояния на границе свая – слабый грунт равенства величины горизонтальных напряжений σ_x^W и $\sigma_x^{св}$ со стороны слабого грунта и грунта сваи-дрены соответственно, необходимо дополнительно увеличить на ΔP_0 внешнюю нагрузку, воспринимаемой грунтовой свай-дреной (рис.1). Прирост внешней нагрузки трактовалось нами как некоторое эквивалентное увеличение модуля деформации слабого основания. Тогда, относительную величину модуля деформации укрепленного основания определить по формуле

$$E_{укр} / E_0 = 1 + \frac{D^2}{L^2} \left(\frac{\xi_{св}^W}{\xi_{св}} - 1 \right), \text{ где} \quad (1)$$

E_0 - начальный модуль деформации слабого основания.

На рис.2 дан характер изменения относительного модуля деформации $E_{укр}/E_0$ слабого основания, усиленного сваями, в зависимости от параметров свайного поля D/L для различных значениях коэффициента бокового давления слабого грунта ξ_w при $\xi_{св} = \text{const}$.

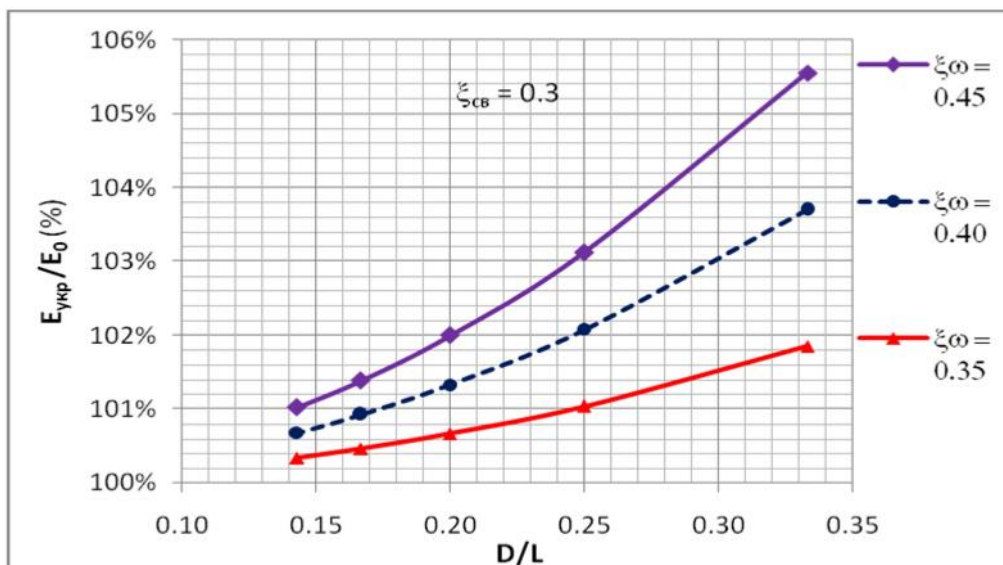


Рис.2. Изменение относительного модуля деформации слабого основания в зависимости от сближения свай-дрен $m = D/L$ при различных коэффициентах бокового давления ξ_w .

Степень влияния свайного основания на сокращение осредненной величины его осадки (рис.3) можно оценить по характеру изменения отношения $\lambda_{укр}/\lambda_0$ в зависимости от параметра сближения свай D/L , по формуле

$$\frac{\lambda_{укр}}{\lambda_0} = \left[1 + \left(\frac{D}{L}\right)^2 \frac{\xi_w - \xi_{св}}{\xi_{св}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

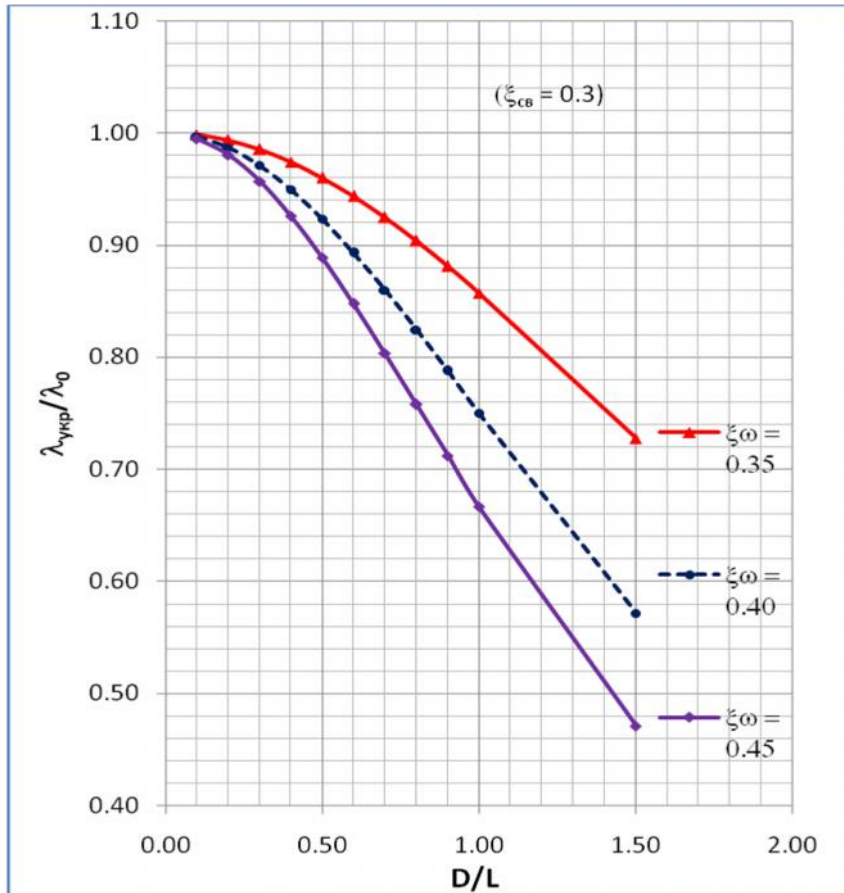


Рис.3. Влияние сближения свай-дрен $m=D/L$ на относительную осадку слабого основания при различных величинах коэффициента бокового давления ξ_w .

Используя далее методы математического моделирования (МКЭ) в условиях плоской задачи (рис.4а), было выявлено, что для получения равномерной деформации поверхности грунтового элемента при выбранном соотношении модулей упругости слабого грунта и сваи-дрены, на слабый грунт требуется удельная нагрузка на 5% меньше, чем на песчаную сваю, что подтверждает правомочность исходных положений, заложенных в основу формул (1) и (2).

В случае, если внешняя нагрузка остается постоянной $P_0 = \text{const}$, то поверхность элемента деформируется неравномерно.

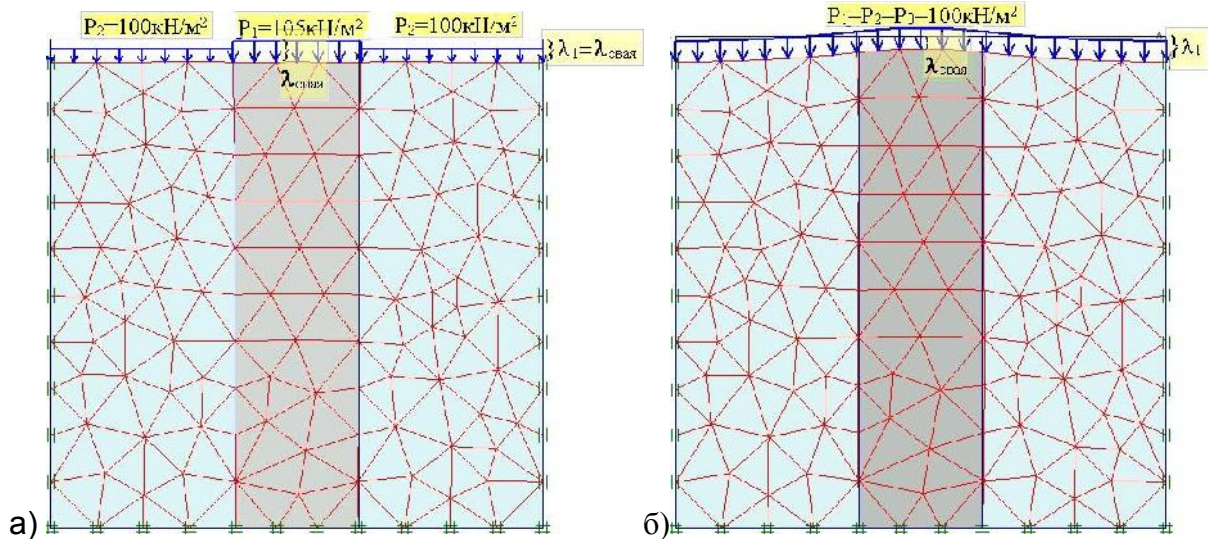


Рис.4. Осадка поверхности элемента слабого основания, при наличии сваи-дрены: а) равномерная ($\lambda_1 = \lambda_{\text{свая}}$), когда $P_1 > P_2$ ($P_1=105 \text{ кН/м}^2$; $P_2=100,0 \text{ кН/м}^2$); б) неравномерная ($\lambda_1 > \lambda_{\text{свая}}$), когда $P_0 = \text{const}$ ($P_1 = P_2 = P_0=100 \text{ кН/м}^2$).

В этом случае осадка над сваем меньше, а над слабым грунтом она постепенно возрастает по мере удаления от боковой поверхности сваи (рис.4б). Однако, и в этом случае осредненная осадка поверхности элемента оказывается меньше, нежели в случае отсутствия сваи-дрены, что также позволяет трактовать этот результат как некоторое возрастание модуля деформации слабого основания, в целом.

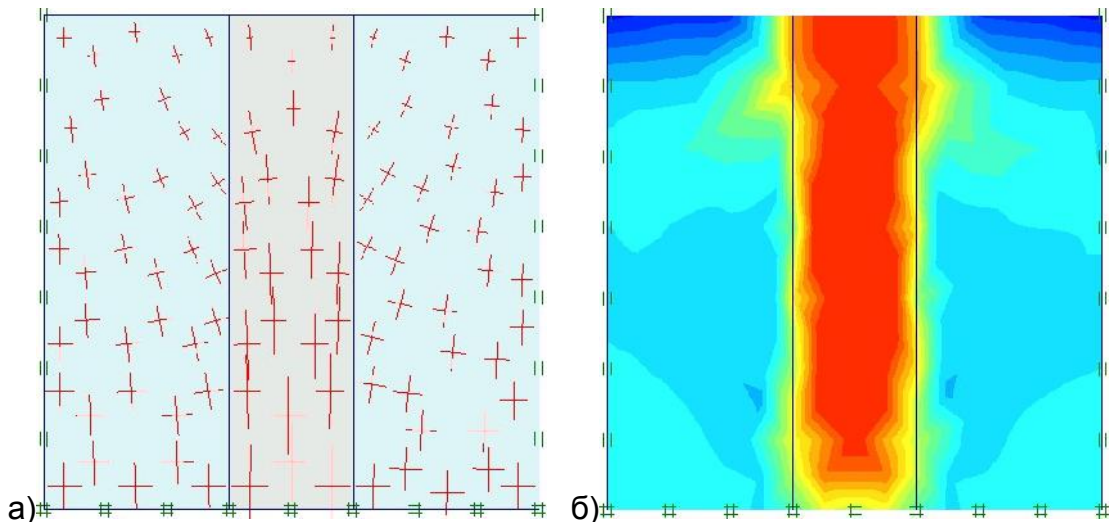


Рис.5. Элемент слабого основания с песчаной сваей-дреной:

- а) ориентация осей эллипсов главных напряжений;
- б) зоны развития максимальных касательных напряжений.

Оси эллипсов напряжений в слабом грунте испытывают значительное влияние песчаной сваи и отклоняются от своих начальных положений. Эти отклонения можно объяснить влиянием на них сил трения, возникающих между грунтом сваи и слабым

грунтом (рис.5а). При этом максимальный уровень относительных максимальных касательных напряжений приходится (рис.5б) на песчаную сваю-дрену (вся она окрашена в красный цвет), которая находится в предельном состоянии. Слабый грунт работает в этом смысле в более благоприятных условиях за счет его дополнительного горизонтального обжатия грунтом сваи-дрены.

Анализ показывает, что увеличение диаметра сваи не изменяет её напряжённого состояния, в том и другом случае она находится в предельном состоянии, но при постепенном повышении диаметра песчаной сваи постепенно уменьшается осадка элемента слабого грунта (рис.6).

В случае, если аналогичный элемент включает не одну, а две сваи-дрены, то на величину максимальных касательных напряжений в межсвайной зоне и на величину осадки поверхности слабого грунта определяющее влияние оказывает коэффициент сближения свай $m=D/L$ и соотношение площадей (или объемов), занятых грунтом сваи-дрены и слабым грунтом (рис.7).

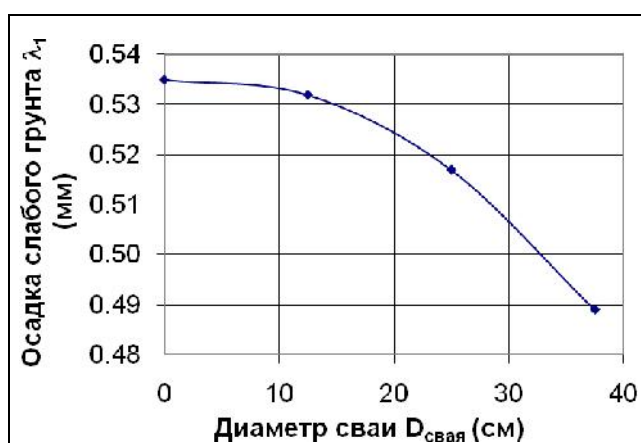


Рис.6. Зависимость осадки элемента слабого грунта от диаметра песчаной сваи-дрены.

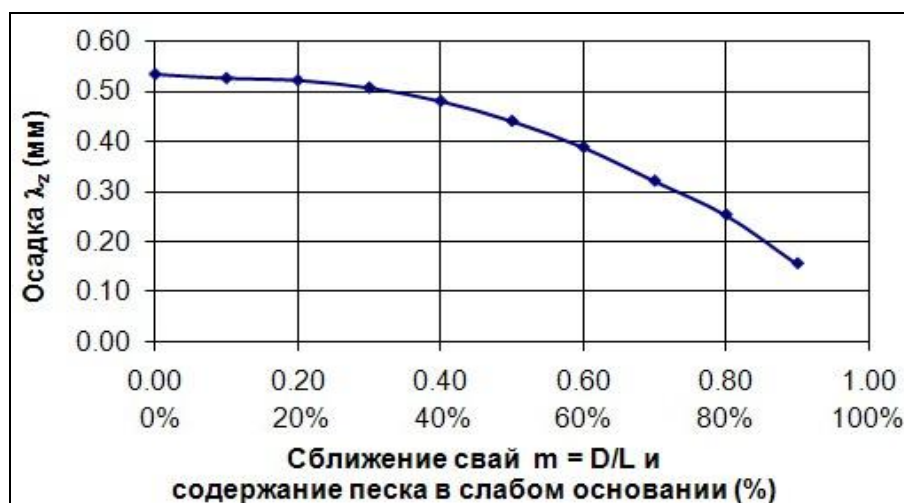


Рис.7. Зависимость осадок слабого основания со сваями λ_z от $m=D/L$ и содержания песка сваи-дрены в %.

На основании полученных результатов сделан вывод, что при малом коэффициенте сближения свай ($m < 0.30$), или незначительном содержании песка (*песка* $< 30\%$) влияние песчаных свай на слабое основание не велико. Однако, если величина $m > 0.30$ (и соответственно *песка* $> 30\%$), то это изменение идёт в гораздо более быстром темпе и песчаные сваи заметно влияют на уменьшение главных напряжений в слабом основании. Исследования также показали, что применение песчаной сваи с большим углом внутреннего трения песка и повышенным модулем деформации способствует повышению эффективности конструкции за счет возможности передачи на сваи большей части внешнего давления.

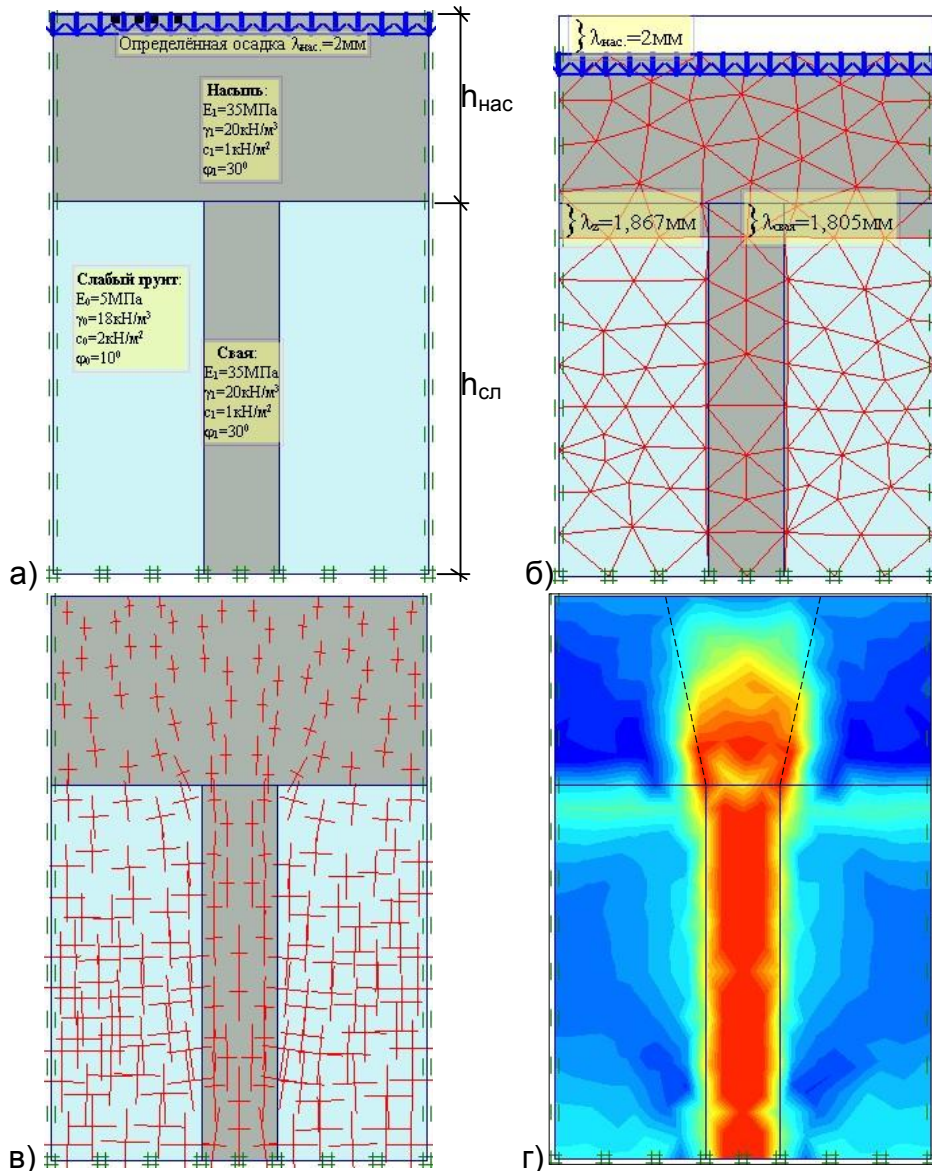


Рис.8. Элемент с песчаной свайей

- а) модель элемента с песчаной свайей; б) осадка слабого слоя $\lambda_2 = 1,867 \text{ мм}$;
 в) ориентация осей эллипсов главных напряжений; г) зоны развития макс. касательных напряжений.

При моделировании условий совместной работы элемента слабого основания, усиленного сваями-дренами, и слоя насыпного грунта h_n – рис.8 оказалось, что грунт песчаной сваи, а также грунт, расположенный непосредственно над песчаной сваей, находится в предельном (пластичном) состоянии (рис.8,г). При этом, состояние пластичности сыпучего грунта сваи (темно красная окраска) в свою очередь способствует процессу перераспределения напряжений в пределах зоны слабого грунта путём некоторого увеличения главных напряжений σ_1 и σ_2 и уменьшения за счёт этого величины максимальных касательных напряжений τ_{\max} .

Наличие пластичной зоны над песчаной сваей (рис.8,г) свидетельствуют о значительной концентрации локальных напряжений, обусловленных повышенной жёсткостью песчаной сваи и её меньшей деформативностью по сравнению с деформативностью слабого грунта.

Выполненный теоретический анализ условий формирования зоны концентрации напряжений с использованием критерия прочности грунта Н.П. Пузыревского показал, что условия ее формирования несколько отличаются от условий развития аналогичных зон в основаниях сооружений, а результаты математического моделирования с помощью МКЭ позволили выявить, что по мере увеличения диаметра сваи происходит рост объёма зоны предельного состояния и глубина её захождения в толщу насыпного грунта при сохранении постоянной его мощности $h_n = 0,4\text{м}$. Очевидно, что зона предельного состояния, которая развивается над оголовком сваи, является некоторой переходной зоной для НДС от песчаной сваи-дрены к насыпному слою.

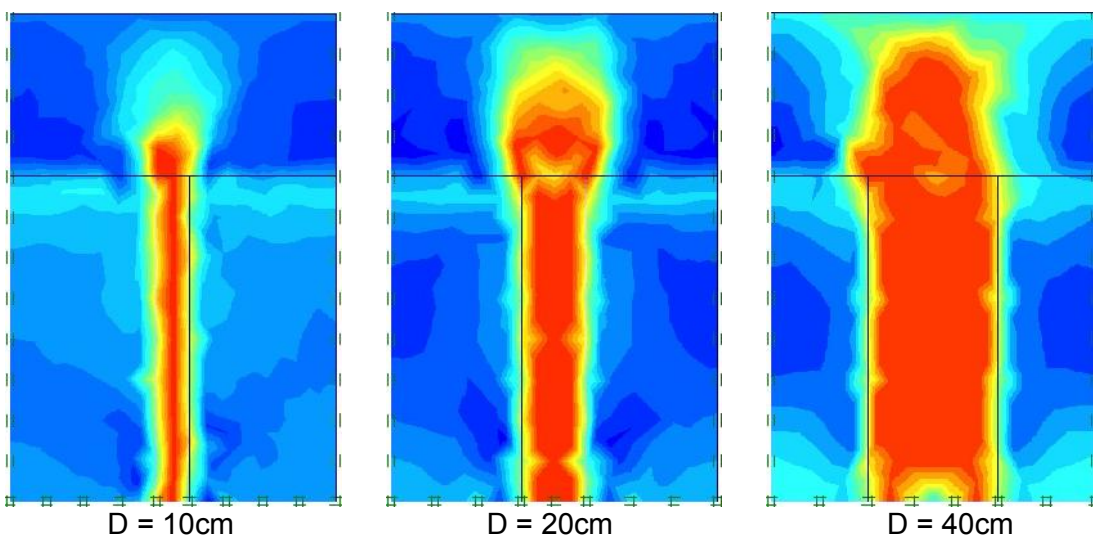


Рис.9. Характер развития зоны предельного состояния при увеличении $D_{\text{сваи}}$.

Используемая нами программа “Плакис” позволяла представить зоны предельного состояния также в виде скопления точек пластичности – рис.1. При диаметре грунтовых свай 10 – 20см точки пластичности концентрируются в форме зон, ограниченных окружностью, но по мере увеличения диаметра сваи до 40 – 50см эти зоны начинают приобретать четко выраженную форму клина – рис.10. вершина которого, как оказалась, лежит на направляющей окружности Н.П. Пузыревского.

Выполненный анализ условий формирования НДС слоя грунта, лежащего на слабом основании, усиленном грунтовыми сваями-дренами, а также результаты моделирования этих условий по МКЭ, показывает, что однородность НДС этого слоя может существенно быть нарушена за счёт не только значительной разницы деформационных характеристик слабого грунта и грунта свай, но также и за счёт их повышенного диаметра и расстояний между осями.

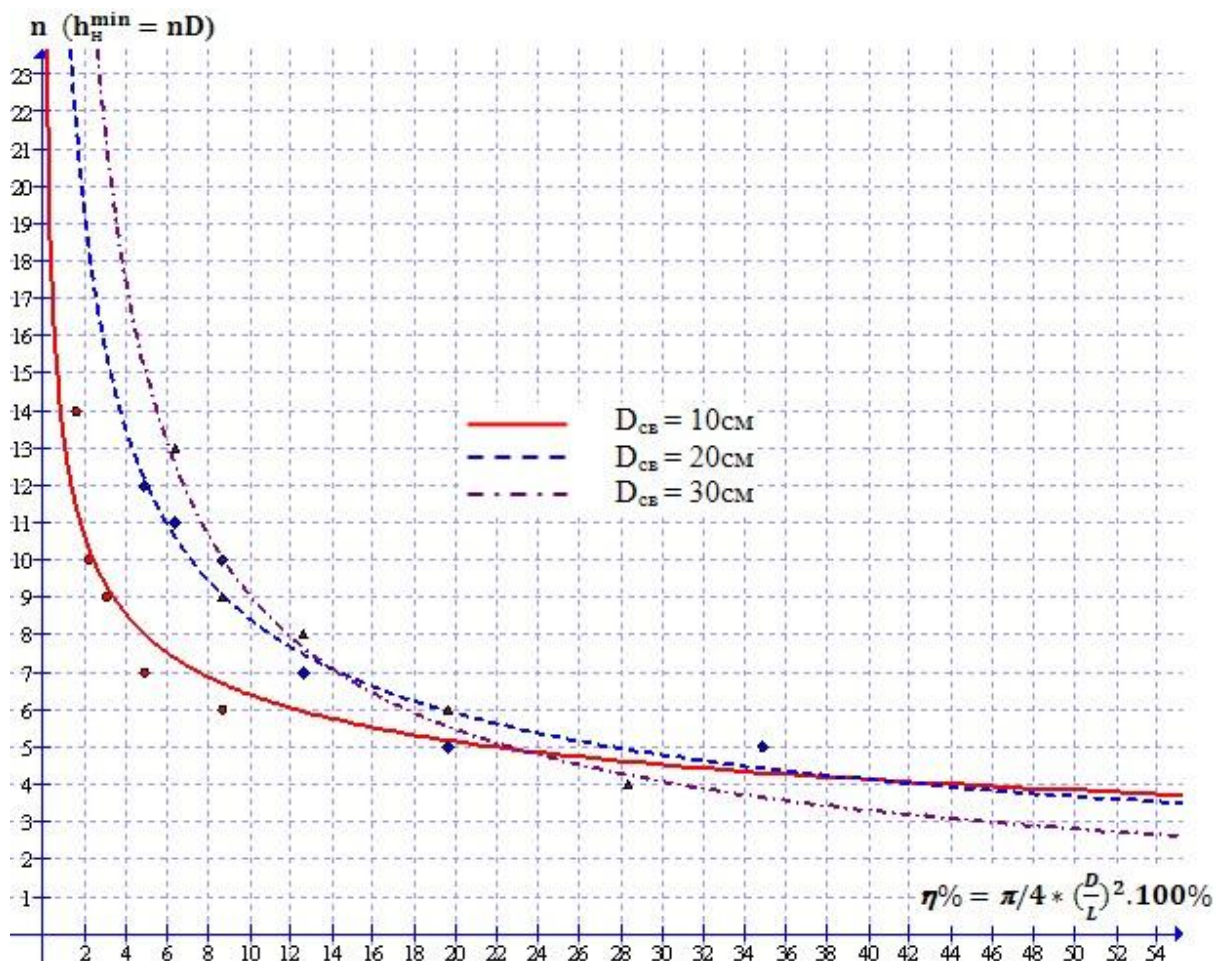


Рис.10. Зависимость h_H^{\min} от степени насыщенности слабого основания сваями $\eta\%$ при диаметре сваи D .

Для проверки и уточнения характера деформирования слоя насыпного грунта на слабом основании с грунтовыми сваями были проведены соответствующие исследования методами математического моделирования (МКЭ), где варьировалась толщина слоя h_n , диаметр свай D и расстояние L между их осями.

На рис.10 представлена зависимость минимально требуемой мощности насыпного грунта ($h_n^{\min} = nD$) от степени насыщенности основания грунтовыми сваями $\eta\%$ для трёх их диаметров $D = 10; 20$ и 30 см исходя из условия получения однородной осадки насыпного слоя или насыпи.

Из этой зависимости видно, что если степень насыщенности слабого основания грунтовыми сваями менее 20% , то на величину h_n^{\min} диаметр свай оказывает существенное влияние. Причём, чем меньше степень насыщения (замены), тем выше влияние на h_n^{\min} диаметра свай D и тем выше опасность проявления неравномерных деформаций насыпного грунта.

Однако при достижении степени насыщения 20% и более (примерно до 30%) роль диаметра нивелируется и составляет для требуемой величины h_n^{\min} значение порядка $4 - 5D$.

Четвёртая глава диссертации посвящена детальному рассмотрению результатов наших исследований в свете выводов и данных, полученных ранее в этой области А.Г. Полуновским и А.С. Мохаммедом.

В целом, мы получили достаточно близкие результаты к экспериментальным результатам А.Г. Полуновского. Некоторое расхождение объясняется тем, что математическое моделирование по МКЭ с использованием характеристик песка и слабого грунта отражают взаимодействие слабого грунта и песчаной сваи гораздо полнее, чем в случае использования моделей с дробью и губкой. Тем не менее, результаты наших исследований на математических моделях с использованием МКЭ в достаточной степени соответствуют результатам экспериментальных исследований на физических моделях.

Рассматривая схему деформирования слабого основания, усиленного сваями – дренами, под весом слоя насыпного грунта А.Г. Полуновский в конечном итоге, также как и мы, пришел к выводу, что с увеличением коэффициента бокового давления грунта $\xi_{гр}$, или,

что то же самое, с возрастанием его коэффициента бокового расширения, заметнее становится эффект от применения песчаных свай, т.е. применение песчаных свай на слабых фундаментах с низким модулем деформации оказывается наиболее эффективно.

Нам представляется вполне логичным, что увеличение сближения свай $m > 1$ должно приводить к возрастанию площади основания, занятого песчаными сваями. В результате, устойчивость слабого основания должна повышаться и при этом, разность $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$ должна уменьшаться. Однако, из исследований А.Г. Полуновского следует, что при $m > 1$ разность напряжений $(\sigma_1 - \sigma_2)$ несколько увеличивается. Этот вывод, может быть результатом того, что автор выбрал слишком большие значения угла трения слабого грунта φ_0 ($54,9^\circ - 22,3^\circ$), которым соответствуют малые величины коэффициента бокового давления ξ_0 . Как следствие, влияние песчаных свай на изменение НДС «слабого» грунта оказывалось незначительным.

Анализируя результаты наших исследований на математических моделях, заметим, что они почти полностью соответствуют и подтверждают результаты исследований А.Г. Полуновского. В самом деле, под влиянием песчаных свай разность $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$ в слабом грунте монотонно уменьшается по мере сближения свай..

В отличие от А.Г. Полуновского, мы рассматривали слабое основание с величинами малых углов трения $\varphi_0 = 5^\circ ; 10^\circ$ и 15° (соответственно $\xi_0 = 0.84 ; 0.70$ и 0.59). Эти величины φ_0 , как мы полагаем, в большей степени подходят реальным характеристикам слабого грунта. Результаты наших исследований в общем соответствуя результатам А.Г. Полуновского, тем не менее более активно способствуют уменьшению максимальных сдвигающих напряжений τ_{\max} в межсвайной зоне не изменяя при этом своего знака.

Так же как и А.Г. Полуновским нами было получено, что влияние величины модуля деформации грунта на уменьшение осадки от фактора сближения свай оказывается несколько менее существенным, чем на повышение устойчивости.

В случае, если площадь свай-дрен увеличивается до 20%, то снижение относительных деформации не превышает 10 – 15%.

Максимальное снижение деформируемости наблюдается в случае, если суммарная площадь скважин оказывается более 20%.

Не наблюдалось принципиальных расхождений результатов наших исследований на математических моделях также и с экспериментальными данными А.С.Мохаммеда (2002г.), полученных на губке и паралоне. Так, в качестве примера, можно отметить, что А.С. Мохаммедом и нами была выявлена роль грунтовых свай в снижении деформации и возрастании несущей способности слабого основания со сваями.

Глава завершается общими рекомендациями по практическому применению грунтовых свай-дрен в целях усиления несущей способности слабых оснований дорожных насыпей и общими выводами.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Выполненные в прошлом веке в США и России исследования по изучению работы оснований с вертикальными песчаными дренами позволили установить, что песчаные дрены могут не только значительно ускорить процессы консолидации оснований, но и значительно повысить их устойчивость, проявляя тем самым дополнительную их способность к проявлению свайного эффекта.

2. Вместе с тем, до настоящего времени остаются до конца не выясненными особенности формирования напряженно-деформированного состояния оснований дорожных насыпей при наличии в них грунтовых дрен и степень влияния этого фактора на эффективность конструкции, особенно в части учета ее особенностей не как дренирующей системы, а как свайной конструкции. Эта проблема для ряда регионов России и Вьетнама приобретает особую актуальность, учитывая широкую распространенность слабых покровных отложений, которые часто оказываются в основании дорожных насыпей.

3.Нами, используя метод конечных элементов (МКЭ), изучены особенности формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов грунтовой толщи слабого основания с учётом различных параметров его вертикальной неоднородности по

прочностным и деформационным характеристикам, моделирующих условия работы слабого грунта и грунтовой свай-дрены.

4. Экспериментально выявлены основные особенности НДС слабых оснований при устройстве свай-дрен и получены аналитические зависимости, позволяющие оценить степень влияния их диаметра, длины, сближения, мощности слабого слоя и его прочностных и деформационных характеристик на увеличение несущей способности основания в целом.

5. Аналитически и экспериментально установлено, что чем ближе расположены грунтовые свай-дрены и больше их диаметр (коэффициент сближения "m" и степень насыщения слабого основания грунтом свай увеличивается), а также, чем больше разница в величинах коэффициентов бокового давления слабого грунта ξ_w и грунта свай $\xi_{св}$ (и следовательно, в углах внутреннего трения φ_w и $\varphi_{св}$), тем выше будет прогнозируемая эффективность устройства свайного основания.

6. На основе теоретического анализа и экспериментальных исследований по численному моделированию условий работы слоя насыпного грунта (дорожной насыпи) на слабом основании и, усиленном грунтовыми сваями, было установлено, что характер развития зон предельного состояния по критериям Н.П. Пузыревского, несколько отличается от условий их формирования в основаниях сооружений из-за иных условий проявления взаимосвязи давления от собственного веса грунта на оголовки грунтовой свай.

7. Повышение сближения свай "m" (или степени насыщенности песком слабого основания), уменьшает как сумму главных напряжений, так и их разницу, что в свою очередь снижает уровень максимальных касательных напряжений и уменьшает возможность появления точек пластичности в межсвайном пространстве.

8. Модуль деформации грунта (песок, гравийно-песчаная смесь, щебень и т.п.) свай и его сдвиговые характеристики играют существенную роль в факторе увеличения устойчивости и значительного уменьшении осадки слабого основания в целом.

9. Мощность насыпного слоя, диаметр грунтовых свай и расстояние между их осями должны быть согласованы, чтобы

обеспечить однородность полей НДС в массиве грунта (слой насыпного грунта насыпи), лежащего над сваями-дренами.

10. Для обеспечения требуемой равномерности осадок насыпи при одной и той же степени насыщенности слабого основания грунтовыми сваями-дренами того или иного диаметра следует ограничивать минимально допустимую мощность насыпного грунта h_H^{min} , учитывая, что чем меньше степень насыщения слабого грунта сваями, (замены), тем выше влияние на h_H^{min} их диаметра D и тем выше опасность проявления неравномерных деформаций насыпного грунта; роль диаметра нивелируется только при достижении степени насыщения основания сваями 20% - 30%.

11. Предложены практические рекомендации по методам проектирования и расчета степени повышения несущей способности слабых оснований дорожных насыпей за счет учета свайного эффекта вертикальных песчаных свай.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Чан Куок Дат. Роль грунтовых свай в повышении несущего способности слабых оснований / Чан Куок Дат // Научный транспортно-коммуникационный Жур-л, Ханойский институт транспорта и коммуникации, Вьетнам, 2009, № 27. С.63-66.

2. Добров Э.М., Чан Куок Дат, Ле Суан Тхо. Грунтовые сваи – эффективный метод в усилении слабых оснований / Э.М. Добров, Чан Куок Дат, Ле Суан Тхо // Вьетнамский мостовой и дорожный Жур-л, Научно-техническое сообщество по мостам и дорогам, Министерство транспорта, Ханой, Вьетнам, 2010, № 7. С.50-54.

3. Добров Э.М., Чан Куок Дат, Ле Суан Тхо. Оценка эффективности усиления слабых оснований дорожных насыпей грунтовыми сваями / Э.М. Добров, Чан Куок Дат, Ле Суан Тхо // Жур-л «Транспортное строительство» М. 2010, № 7. С.9-12.