

На правах рукописи



Калинин Александр Львович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО
СОПРОТИВЛЕНИЮ СДВИГУ В ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ**

**Специальность 2.1.8 – Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей
(технические науки)**

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Омск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск.

Научный руководитель: **Александров Анатолий Сергеевич**
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно - дорожный университет (СибАДИ)», доцент кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» (г. Омск)

Официальные оппоненты: **Горячев Михаил Геннадьевич**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно - дорожный государственный технический университет (МАДИ)», профессор кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» (г. Москва)

Тиратурян Артём Николаевич
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», профессор кафедры «Автомобильные дороги» (г. Ростов - на - Дону)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный архитектурно – строительный университет» (г. Казань)

Защита диссертации состоится «15» октября 2024 г. в 14:00 час. на заседании диссертационного совета 24.2.400.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно - дорожный университет (СибАДИ)» по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5, ауд. 2.318.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СибАДИ» и на сайте университета по адресу: <https://sibadi.org/about/units/institut-magistratury-i-aspirantury/studies/dissertations/67456/>.

Отзывы на автореферат диссертации, в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5. Тел. (3812) 65-03-23. Копию отзыва просим выслать на e-mail: sibadisemenova@yandex.ru

Автореферат разослан «14» августа 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Семенова
Татьяна Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из проблем песчаных грунтов является их слабое сопротивление сдвигу, обусловленное низким сцеплением. В результате такие грунты склонны к накапливанию остаточных деформаций. При проектировании дорожных одежд отсутствие больших остаточных деформаций гарантируется расчетом по сопротивлению сдвигу. Этот расчет вначале выполнялся по методу А.М. Кривисского, положенному в основу нормативных расчетов по ВСН 46–72 и ВСН 46–83. Позже с появлением модели К.М. Джеррарда, Дж. Р. Моргана и Б.Г. Ричардса, предполагающей упрочнение грунта при действии повторной нагрузки, нормативный расчет был модифицирован. Эта модификация выполнена специалистами СоюздорНИИ под руководством В.Д. Казарновского. Благодаря таким исследованиям в ВСН 26–90 появился расчет дорожных одежд переходного типа по остаточным деформациям. Этот расчет может быть применен к построению кругов напряжений и определению сцепления и угла внутреннего трения в зависимости от числа приложенных нагрузок. Результаты этой большой работы используются в ОДН 218.046–01, ПНСТ 265–2018 и ПНСТ 542–2021. Недостатком таких моделей является то, что при достаточно больших количествах приложенных нагрузок уменьшение сцепления и угла внутреннего трения значительно, что приводит к существенному увеличению толщины рассчитываемой дорожной одежды. Поэтому в исходную зарубежную модель введено ограничение по числу расчетных нагрузок, которое принято в количестве 1 млн расчетных единиц. Отметим, что это искусственное допущение, оригинальная модель этого ограничения не требует, оно в зарубежной модели задано осью абсцисс, на которой сцепление и угол внутреннего трения принимают нулевые значения. Тем не менее даже при ограничении числа нагрузок толщина проектируемых дорожных одежд получалась большой, что потребовало введения второй модификации, состоящей в изменении расчета напряжений сдвига от постоянной нагрузки. В расчет напряжений сдвига от постоянной нагрузки ввели статический угол внутреннего трения, значение которого всегда больше величины динамического угла внутреннего трения, если число нагрузок больше единицы. В этом случае напряжения сдвига от временной и постоянной нагрузок вычисляются для двух разных площадок, наклон которых к главным осям определяется суммой или разностью 45 градусов и половины угла внутреннего трения. Это, конечно же, является недопустимым, а нормативные методы расчета, применяемые в ОДН 218.046–01, ПНСТ 265–2018, ПНСТ 542–2021, нужно модифицировать, устранив эту явную ошибку.

Вторым доводом в пользу модификации современного нормативного метода расчета является недостаточная точность оригинального критерия Кулона – Мора. Согласно литературным данным, критерий Кулона – Мора простой, но эффективный, способный верно предсказывать отказ образца в 85% опытах по трехосному сжатию. В 15% опытов предельное состояние образцов наступает при напряжении, величина которого меньше предельного эквивалентного напряжения критерия Кулона – Мора.

Учитывая сделанные критические замечания, мы считаем необходимым совершенствование метода расчета дорожных одежд по критерию сопротивления сдвигу в песчаных грунтах.

Степень разработанности. Вопросы сопротивления грунтов сдвигу рассматриваются в теоретических и экспериментальных трудах многих специалистов, являющихся представителями разных составляющих строительной отрасли: С.В. Алексикова, А.А. Баженкова, В.Г. Березанцева, М.Г. Горячева, Б.И. Далматова, О.Г. Денисова, Э.М. Доброва, Г.В. Долгих, В.Н. Ефименко, С.В. Ефименко, П.Л. Иванова, В.Д. Казарновского, А.М. Караулова, Ю.И. Косарева, Г.К. Клейна, К.В. Королева, А.А. Лунева, А.М. Кривисского, М.В. Малышева, Н.Н. Маслова, С.А. Матвеева, В.Н. Николаевско-го, А.В. Паталеева, Е.А. Петрушина, А.С. Пилипенко, Г.И. Покровского, Н.П. Пузы-

ревского, В.Н. Разбегина, А.В. Смирнова, В.М. Смирнова, В.В. Сиротюка, Б.С. Радовского, Л.Н. Рассказова, В.В. Соколовского, А.Л. Строковой, К.С. Теренецкого, А.З. Тер-Мартirosяна, З.Г. Тер-Мартirosяна, В.Г. Федоровского, И.В. Федорова, В.А. Флорина, Н.А. Цытовича, В.А. Шашкина, К.Г. Шашкина, В.Н. Яромко, И.В. Яропольского и многих других, в том числе, зарубежных исследователей. Тем не менее ряд вопросов остался за рамками теоретических и экспериментальных исследований.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с тематическим планом ФГБОУ ВО «СибАДИ» по проектной деятельности и прямым договором с УДХ Омской области. Соискатель в качестве исполнителя принял участие в выполнении гранта РФФИ (№ проекта 12-08-98008-р_сибирь_a), а также в разработке СТО 03709897–2021, в которых использованы материалы настоящего исследования.

Основная идея работы состоит в необходимости обеспечения сопротивления песчаных грунтов сдвигу на стадии проектирования дорожной одежды путем выполнения расчетов по сопротивлению сдвигу и первой критической нагрузке, в основу которых положено модифицированное условие Кулона – Мора, включающее третий параметр грунта, который учитывает величину деформации в наиболее опасной точке.

Объектом исследования являются традиционные и модифицированные методы расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу в песчаных слоях и земляном полотне.

Предмет исследования – свойства песчаных грунтов, характеризующие их сопротивление сдвигу при расчете дорожных конструкций.

Цель диссертационной работы состоит в совершенствовании расчета дорожной конструкции по сопротивлению песчаных грунтов сдвигу в земляном полотне и дополнительном слое основания.

Задачи исследования:

- модифицировать критерий Кулона – Мора, положенный в основу расчета дорожной конструкции по сопротивлению сдвигу, путем ввода третьего параметра прочности несвязных материалов b , позволяющего учитывать величину предельной деформации;

- выполнить трехосные испытания песчаных грунтов и определить значения параметра b (третьего параметра) в модифицированном критерии пластичности;

- произвести экспериментальное исследование значений угла рассеивания напряжений в моделях песчаных оснований дорожных одежд, в том числе армированных геосинтетикой, применяя метод цветных полосок-индикаторов;

- выполнить совершенствование расчета грунтов земляного полотна и дополнительных песчаных слоев оснований дорожных одежд по сопротивлению сдвигу, рассмотрев применение критериев сопротивления сдвигу и безопасных давлений по первой критической нагрузке;

- оценить адекватность созданных расчетов сопоставлением экспериментальными данными, полученными при штамповых испытаниях песчаных оснований дорожной конструкции;

Методология и методы исследования состоят в анализе причинно-следственных связей, возникающих в процессе сопротивления сдвигу песчаных грунтов, а также положений теории пластичности, механики грунтов, принципов расчета дорожных конструкций и методов математической статистики, используемых при обработке данных эксперимента.

Научная новизна заключается:

- в совершенствовании расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу путем модификации классического двухпараметрического условия пластичности Кулона – Мора введением нового третьего параметра b ;

- в разработке способа обработки экспериментальных данных по трехосному сжатию грунтов для определения величины параметра b в предлагаемом трехпараметрическом условии пластичности;

- в разработке способа экспериментального определения угла рассеивания напряжений в моделях песчаных оснований дорожных одежд, в том числе армированных геосинтетическими материалами, основанного на применении метода цветных полосок-индикаторов;

- в усовершенствовании метода расчета элементов дорожной конструкции из песка по сопротивлению сдвигу, выполненного путем расчета по сопротивлению сдвигу и безопасным давлениям.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методики расчета дорожных конструкций нежесткого типа, вносящей существенный вклад в расширение представлений о сопротивлении сдвигу в песчаном слое и на его поверхности.

Предложенный критерий пластичности, при изменении величины параметра b в интервале от 0 до 0,5 позволяет варьировать предельную величину максимального главного напряжения σ_{lim} , от которого зависят предельные значения напряжения сдвига и деформации. Эта особенность позволяет применять предлагаемый трехпараметрический критерий в качестве предвестника наступления предельного состояния по критерию Кулона – Мора.

Практическая значимость работы заключается в возможности проектирования конструкций земляного полотна и дополнительных слоев оснований дорожных одежд неармированных и армированных песчаных грунтов с обеспеченной сдвигоустойчивостью по новому предложенному условию. Расчет по новому критерию позволит повысить работоспособность конструкции и увеличить ее срок службы до нормативных значений.

Автор защищает совокупность уточненных научных положений, на базе которых разработаны теоретические, расчетные и экспериментальные способы способ расчета дорожной одежды нежесткого типа.

Положения, выносимые на защиту, включают:

- ввод третьего параметра b , позволяющего учитывать величину предельной деформации и служащего для модификации критерия Кулона – Мора, положенного в основу расчета дорожной конструкции по сопротивлению сдвигу;

- трехосные испытания песчаных грунтов и определение значения параметра b (третьего параметра) в модифицированном критерии Кулона – Мора;

- применение метода цветных полосок-индикаторов для разработки методики экспериментального определения угла рассеивания напряжений в песчаных основаниях дорожных одежд, в том числе армированных геосинтетическими материалами;

- совершенствование расчета грунтов земляного полотна и дополнительных песчаных слоев оснований дорожных одежд по сопротивлению сдвигу.

Степень достоверности обеспечена корректным использованием научных положений, теоретических решений и полученных результатов с соблюдением основных принципов математического и физического моделирования, механики грунтов и теории пластичности, адекватностью расчетных и экспериментальных данных, полученных при использовании поверенного оборудования в аттестованной лаборатории кафедры «СЭД» СибАДИ и обработанных в соответствии с правилами математической статистики, для совершенствования расчета дорожных одежд по сопротивлению сдвигу. Результаты экспериментально-теоретических исследований подтверждены при опытно-производственном внедрении.

Личный вклад в решение проблемы заключается в формулировании общей идеи и цели диссертационной работы; в выполнении основной части теоретических и

экспериментальных исследований; в анализе и обобщении результатов лабораторных и натурных испытаний.

Реализация результатов исследований. Расчет дорожных конструкций нежесткого типа по сопротивлению сдвигу, внедрен в организациях КУ «Управление дорожного хозяйства Омской области», ООО «СибРос» и ООО «АДМ». Результаты работы использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «СибАДИ» при изучении дисциплин «Динамика и устойчивость сооружений» и «Механика дорожных и аэродромных конструкций».

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на Международном конгрессе СибАДИ (Омск, 2013 г.) и Международных научно-практических конференциях ПНИПУ (Пермь, 2013 г.) и СибАДИ (Омск, 2015, 2016, 2021 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы в полном объеме опубликованы в 20 научных работах по теме диссертации, из них 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и 5 публикациях в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus.

Материалы диссертации соответствуют паспорту научной специальности 2.1.8 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» в части направления исследований, оговоренных в пунктах 2 и 14.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе изучено состояние вопроса, в результате чего установлено, что критерий Кулона – Мора в оригинальном или модифицированном виде применялся во всех, за исключением ВСН 46–60, нормативных документах, действовавших в разное время на территории бывшего СССР (ВСН 46–72, ВСН 46–83) и современной России (ОДН 218.046–01, ПНСТ 265–2018, ПНСТ 542–2021).

Известно несколько тождественных форм записи критерия Кулона–Мора, но наиболее часто применяют две из них в виде:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \tan \varphi \leq c \quad \text{или} \quad \frac{1}{2} \cdot \left(\sigma_1 \cdot \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - \sigma_3 \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \right) \leq c, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 – максимальное и минимальное главные напряжения, МПа; c и φ – сцепление и угол внутреннего трения грунта, МПа и градус соответственно.

В условиях пластичности, записанных неравенствами (1), сцепление, находящееся в правой части, представляет собой прочность грунта. Левая часть неравенств (1) является эквивалентным напряжением критерия Кулона – Мора. Рассматривая левую часть первого неравенства (1), отметим, что уменьшаемое и вычитаемое представляют собой касательное и нормальное напряжения, действующие на площадках, повернутых к главным осям под углом $\alpha = 45 \pm 0,5 \cdot \varphi$. Левая часть первого неравенства (1) применяется для расчета напряжений сдвига от временной и постоянной нагрузок при проектировании дорожных одежд. При этом в нормативах прошлого столетия величина угла внутреннего трения принималась как критическое значение (наибольшее из всех возможных), достигаемое в конце опыта при отказе образца. В этом случае при одном и том же значении угла φ касательная и нормальная составляющие напряжения сдвига от временной и постоянной нагрузок рассчитываются на одной и той же площадке. В нормах настоящего столетия напряжение сдвига от временной нагрузки определяется при динамическом угле внутреннего трения φ_N , а напряжение сдвига от постоянной нагрузки при статическом угле внутреннего трения $\varphi_{ст}$, причем при $N > 1$ всегда имеет место неравенство $\varphi_N < \varphi_{ст}$. Значит, в современных нормах напряжения сдвига от времен-

ной и постоянной нагрузок рассчитываются для разных площадок, что является ошибкой. Идея о применении заниженных значений улов внутреннего трения $\varphi = \varphi_N$ преследовала цель увеличения напряжения сдвига и повышения толщины дорожной одежды по сравнению с расчетами при $\varphi = \varphi_{ст}$. Тем не менее указанная нами ошибка требует поиска другого решения.

Поиск начат с анализа аналитических условий пластичности Drucker – Prager, Lade–Duncan, Matsuoka–Nakai, а также критериев пластичности моделей GrantaGravel, оригинальной и модифицированной CamClay и их современных модификаций ESP-критерий, NorSand-критерий, Hardening Soil и др. Особенностью анализируемых критериев пластичности является то, что поверхности текучести этих условий строятся на девиаторной плоскости. Предельная прямая или предельная огибающая таких критериев строится на $q-p$ плане (где $q = \sigma_1 - \sigma_3$ является девиатором напряжений, а p – средним нормальным напряжением). Параметры материала этих критериев вычисляются через c и/или φ , вследствие чего поверхность текучести любого критерия пересекает шестигранник Мора в любом из трех углов сжатия, в одном из которых $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. Отсюда следует, что все рассмотренные нами критерии при напряженном состоянии, характеризуемом напряжениями $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, приводят к одинаковому результату. Следовательно, замена критерия Кулона – Мора в расчете дорожной одежды каким-либо другим известным аналитическим условием пластичности к изменению толщины дорожной одежды не приведет, результат будет тот же.

Поэтому необходимо применять критерий, поверхность текучести которого не пересекает шестигранник Мора в углах сжатия. Среди таких критериев известно эмпирическое условие Г.К. Арнольда, по которому предельное состояние грунта наступает при максимальном главном напряжении σ_1 , несколько меньшем, чем при предельной величине этого напряжения в критерии Кулона – Мора.

Г.В. Долгих предложение Г.К. Арнольда сформулировал в виде условия пластичности, записав его неравенством

$$\frac{1}{2} \cdot \left(\sigma_1 - \sigma_3 \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \leq c. \quad (2)$$

Другим вариантом решения этой задачи является модификация самого критерия Кулона – Мора путем ввода третьего параметра материала. Такая модификация выполнена моим научным руководителем. Для этого необходимо воспользоваться критерием Мора для твердого тела, который имеет вид

$$\sigma_1 - k_{Mc} \cdot \sigma_3 \leq R_c; \quad k_{Mc} = R_c / R_p, \quad (3)$$

где R_p и R_c – пределы прочности на одноосное растяжение и сжатие, Па.

В неравенство (3) необходимо подставить формулы для определения пределов прочности, выраженных через c и φ , которые имеют вид

$$R_c = 2 \cdot c \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d; \quad R_p = 2 \cdot c \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d, \quad (4)$$

где φ – критическое (наибольшее из всех возможных) значение угла внутреннего трения, определяемое по данным трехосных испытаний в момент отказа образца.

Подстановка формул (4) в формулу (3) приводит к условию пластичности, имеющему вид

$$\frac{1}{2} \cdot \left(\sigma_1 \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d \cdot \sigma_3 \right) \leq c. \quad (5)$$

Особенность критерия (5) состоит в том, что его эквивалентное напряжение зависит от величины параметра d . Если $d=0,5$, то левая часть неравенства (5) тождественна левой части второго неравенства (1). При уменьшении величины параметра d напряжение сдвига в неравенстве (5) увеличивается, достигая при $d=0$ значения максимального касательного напряжения, которое представляет собой эквивалентное напряжение третьей теории прочности.

Несмотря на достоинства критерия (5), отметим, что пески имеют малое сцепление и достаточно большой угол внутреннего трения, который и обуславливает сопротивление сдвигу. Поэтому для расчета по сопротивлению сдвигу песчаных грунтов целесообразно разработать критерий – предвестник наступления предельного состояния по критерию Кулона – Мора. Таким критерием может быть трехпараметрическое условие пластичности, полученное аналогично выводу уравнения (5), но связывающее оригинальный критерий Кулона – Мора (1) с эмпирическим критерием (2), а не с третьей теорией прочности, как это сделано в неравенстве (5).

Во втором разделе выполнены теоретические и экспериментальные исследования по разработке трехпараметрического условия пластичности и определению его параметров материала посредством статистической обработки данных трехосных испытаний. Таким образом, в этом разделе мы выполнили решение первых двух задач исследования.

Для разработки трехпараметрического критерия необходимо произвести подбор формул, связывающих пределы прочности на сжатие и растяжение с параметрами предельной прямой c , φ и третьим параметром, обозначенным нами b . Подбор формул выполняют так, чтобы после их подстановки в неравенство (3) полученный трехпараметрический критерий при $b=0,5$ преобразовывался в неравенство (1), а при $b=0$ становился неравенством (2).

Для этого нужны зависимости для расчета параметров R_c и R_p задать в виде

$$R_c = 2 \cdot c \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^b; R_p = 2 \cdot c \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^b \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right), \quad (6)$$

где b – введенный автором параметр, изменяющийся в диапазоне $0 \leq b \leq 0,5$.

Подставив формулы (6) в критерий (3) и выполнив преобразования, получим

$$\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^b \cdot \left(\sigma_1 - \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \cdot \sigma_3 \right) \leq c. \quad (7)$$

Из анализа трехпараметрического условия пластичности (7) следует, что при $b=0,5$ оно преобразуется во второе неравенство (1), а в случае $b=0$ выражение (7) приобретает вид неравенства (2). Следовательно, трехпараметрическое неравенство (7) в зависимости от величины параметра b способно описывать напряжения сдвига, изменяющиеся в диапазоне, ограниченном эквивалентными напряжениями критериев Кулона – Мора и Г.К. Арнольда.

Следующим этапом является выполнение трехосных испытаний для обоснования величины параметра b . Традиционным тестированием песчаных грунтов являются трехосные испытания, выполненные по схеме консолидированных дренированных испытаний. В таких испытаниях из образца происходит отток поровой воды. Тем не менее в конструкциях дорожных одежд песчаные дренирующие дополнительные слои

основания подвержены кольматации. В этом случае песок, как говорят, заиливается и постепенно перестает дренировать воду. Поэтому наряду с традиционным трехосным КД-тестом мы провели трехосные консолидированные недренированные испытания. Цель испытаний состоит в сравнении параметров материала критерия (7), полученных при КД- и КН-тестах.

Для испытаний был использован песок мелкий, соответствующий требованиям ГОСТ 8736–2014, с модулем крупности 1,91, содержанием пылевидных и глинистых частиц 3,4% и глины в комках 0,3%. Образцы изготавливались методом стандартного уплотнения, что соответствует указаниям ГОСТ 30416–2012. Уплотнение песка произведено в большом приборе стандартного уплотнения при оптимальной влажности песка 9,9%. Трамбовка песка выполнена согласно требованиям ГОСТ 22733–2016 до максимальной плотности, составляющей 1,89 г/см³. После трамбовки из песчаного образца диаметром 10 см при помощи режущего кольца отбирали образец диаметром 5 см и высотой 10 см, который подвергали трехосному испытанию, выполняя указания ГОСТ 12248.3–2020. На рис. 1 представлены иллюстрации песчаного образца до и после тестирования, а также в процессе испытания.

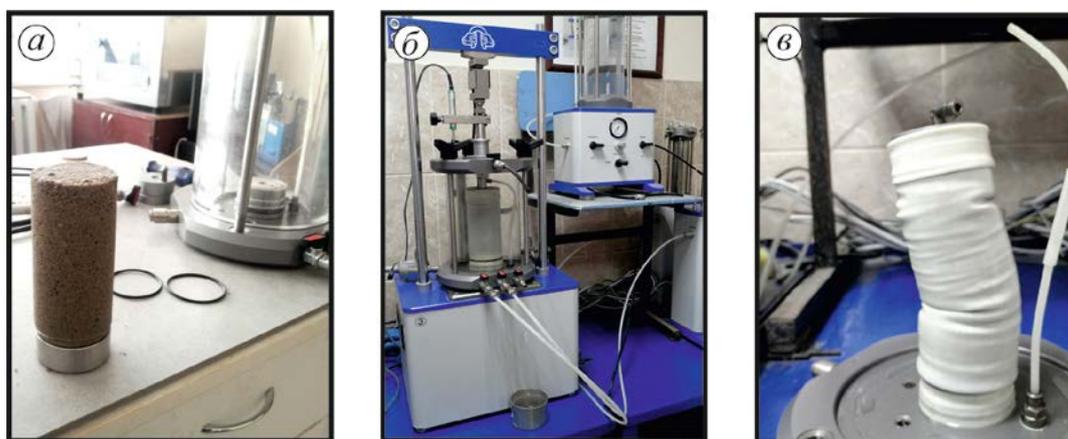


Рисунок 1 – Иллюстрация песчаного образца на разных этапах трехосных тестов: *а*– образец диаметром 5 см, подготовленный к испытанию; *б* – образец в процессе испытания; *в* – образец после испытания

Для определения сцепления и угла внутреннего трения применена методика ГОСТ 12248.3–2020, а для определения величины параметра b автором разработана специальная методика. Определение сцепления и угла внутреннего трения произведено согласно указаниям ГОСТ 12248.3–2020, которые регламентируют правила статистической обработки результатов тестирования. Соблюдая эти требования, нами изготовлены 24 образца для КД- теста и столько же для КН- испытания. Образцы разделялись на восемь групп так, чтобы в каждой группе было по три образца, которые испытывались при трех разных значениях напряжения σ_3 . По результатам испытаний трех образцов, используя формулы ГОСТ 12248.3–2020, вычисляли значения сцепления и угла внутреннего трения, которые являлись частными значениями параметров сопротивления сдвигу. Эти характеристики включались в выборку данных, в которой общее число частных значений пар параметров сопротивления сдвигу составляло восемь, что больше минимального количества, установленного ГОСТ 20522–2012, равного шести парам значений сцепления и угла внутреннего трения.

На рис. 2 приведена иллюстрация кругов предельных напряжений и касательные к ним, построенные по данным КД- и КН- испытаний для определения одной пары параметров сопротивления сдвигу, в табл. 1 приведены результаты статистической обработки данных КД- теста.

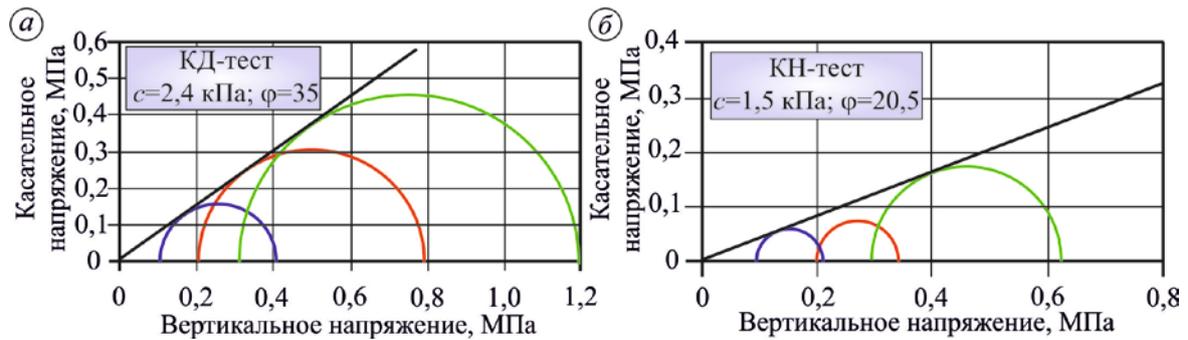


Рисунок 2 – Иллюстрация определения сцепления c и угла внутреннего трения φ_{lim} : а – обработка результатов КД-испытания; б – обработка результатов КН-испытания.

Таблица 1 – Результаты статистической обработки данных КД-теста

Статистическая характеристика		Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град
Частные значения параметров сопротивления сдвигу, вычисленные по результатам испытаний групп из трех образцов	1	2,4	35
	2	2,3	36,7
	3	2,4	36,7
	4	2,4	35
	5	2,2	36,6
	6	2,2	38,2
	7	2,3	36,6
	8	2,2	38,2
Математическое ожидание (среднее выборочное)		2,3	36,6
Среднеквадратическое отклонение		0,09	1,21
Дисперсия, град ²		0,01	1,47
Коэффициент вариации		0,04	0,03
Показатель точности r_a		0,03	0,03
Коэффициент надежности		1,04	1,03
Расчетное значение		2,2	35,6

Аналогичным образом обрабатывались данные КН-испытания. Сравнительный анализ результатов испытаний, полученных при обработке данных КД- и КН-тестов, показывает, что параметры сопротивления сдвигу одного и того же песка одинаковой плотности имеют более высокие значения при испытаниях с дренированием жидкости. Данные КД-теста соответствуют значениям, регламентируемым стандартами РФ, данные КН-теста имеют более низкие значения. Исходя из этих данных, мы пришли к выводу, что в конструкциях дорожных одежд с песчаными материалами следует предусматривать геотекстильную прослойку, а при расположении над песчаным слоем основания из щебня или щебеночно-песчаной смеси на границе раздела слоев следует использовать геокompозит, состоящий из полимерной геосетки и геотекстиля. По нашему мнению, такие мероприятия позволят предотвратить или существенно уменьшить процесс кольтматации и обеспечить дренирование воды песчаным слоем.

Для определения параметра b необходимо анализировать зависимость вертикальной деформации от главных напряжений. Для каждого опыта нужно вычислить предельную величину максимального главного напряжения σ_{lim} при различных значениях параметра b , но известными величинами σ_3 , c и φ_{lim} . Формулу для вычисления напряжения σ_{lim} несложно получить из неравенства (7), положив в нем предельное состояние, заданное равенством эквивалентного напряжения и сцепления. Сделав это, получим

$$\sigma_{1np} = 2 \cdot c \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^b + \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \cdot \sigma_3. \quad (8)$$

В зависимости (8) параметры сопротивления сдвигу определены при предельной деформации образцов, они приведены в табл. 1, а величина напряжения σ_3 задана в опыте по трехосному сжатию. Например, для трех образцов, результаты испытаний которых приведены на рис. 2, а, величина напряжения σ_3 составляет 100, 200 и 300 кПа. Анализируя экспериментальные данные о зависимости деформации образца от главных напряжений, для каждого вычисленного значения σ_{lim} определяют величину деформации ε_1 , достигнутую при трехосных испытаниях. Установленную величину деформации ε_1 делят на предельную деформацию ε_{1cr} , при которой произошел отказ образца. Результаты вычисления интерпретировались в виде табулированной зависимости параметра b от отношения деформаций $\varepsilon_1/\varepsilon_{1cr}$ и напряжения σ_3 . В табл. 2 приведены значения параметра b , установленные для образцов, предельное состояние которых изображено на рис. 2, а.

Таблица 2 – Значения параметра b

Минимальное главное напряжение σ_3 , кПа	Значения параметра b , зависящего от деформации $\varepsilon_1/\varepsilon_{1cr}$							
	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
100	0	0,21	0,25	0,27	0,30	0,35	0,40	0,50
200	0	0	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
300	0	0	0	0,10	0,20	0,40	0,45	0,50

По результатам испытаний других образцов выполнено аналогичное показанному в табл. 2 определение зависимости параметра b от отношения деформаций $\varepsilon_1/\varepsilon_{1cr}$ и напряжения σ_3 . В результате статистической обработки определены математические ожидания и расчетные значения параметра b при напряжении σ_3 и отношения деформаций $\varepsilon_1/\varepsilon_{1cr}$. Это позволяет в зависимости от необходимого отношения деформаций $\varepsilon_1/\varepsilon_{1cr}$ и минимального главного напряжения σ_3 назначать величину параметра b при проверке сопротивления сдвигу.

Нами произведено сравнение предельных эквивалентных напряжений предлагаемого критерия (7) с аналогичными предельными напряжениями сдвига критерия Мора–Кулона. Для этого левую часть неравенства (7) нужно разделить на левую часть второго неравенства (1). После преобразований получим отношение эквивалентных напряжений K двух критериев (7) и (1):

$$K = \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^b \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}. \quad (9)$$

Результаты расчетов по формуле (9) приведены на рис.3.

Из анализа данных рис. 3 следует, что при b , равном 0,5, эквивалентные напряжения, предлагаемого критерия (7) совпадают с напряжением сдвига классического критерия Кулона – Мора. При $b < 0,5$ напряжения сдвига по предлагаемому критерию (7) всегда больше эквивалентного напряжения критерия Кулона – Мора, и эта разница возрастает с уменьшением величины параметра b .

Функцию (9) удобно использовать в расчете напряжения сдвига по критерию (7). Для этого напряжение сдвига по критерию Кулона – Мора (1) нужно умножить на функцию (9). Эта особенность позволяет сравнительно просто вычислять напряжения сдвига от временной нагрузки, по критерию (7) при модификации нормативного расчета. Для такой модификации, определяемые по номограммам стандарта ПНСТ 542–2021

напряжения сдвигу нужно умножить на функцию (9) или ее конкретное значение, установленное по данным рис. 3.

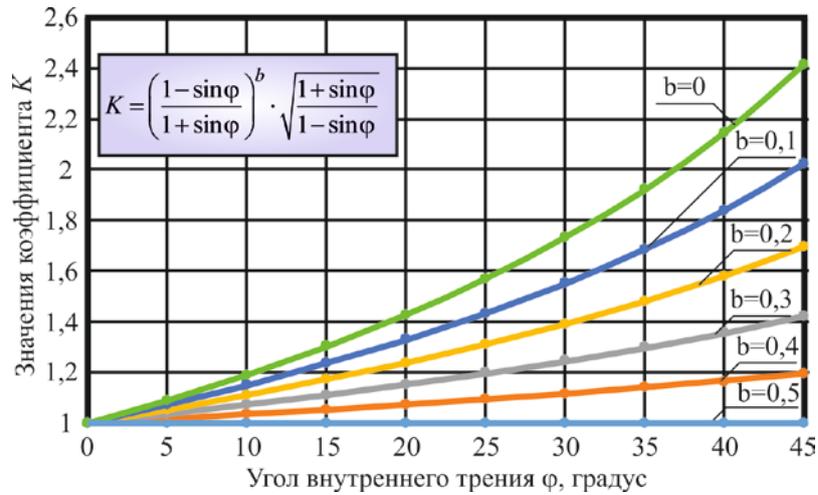


Рисунок 3 – Значения коэффициентов, вычисляемых по формуле (9)

В третьем разделе произведен анализ методов расчета главных напряжений в точках полупространства, принадлежащих оси симметрии нагрузки, благодаря чему установлены их достоинства и недостатки. На основе этого анализа выполнена модификация расчета минимального главного напряжения для слоя конечной толщины, лежащего на полупространстве.

На величину главных напряжений влияет распределение контактного давления, которое зависит от формы, размера и гибкости штампа, вида нагрузки, разновидности грунта или материала полупространства или слоя. На рис. 4 приведены эпюры контактных давлений в нежесткой дорожной одежде и от различных штампов.

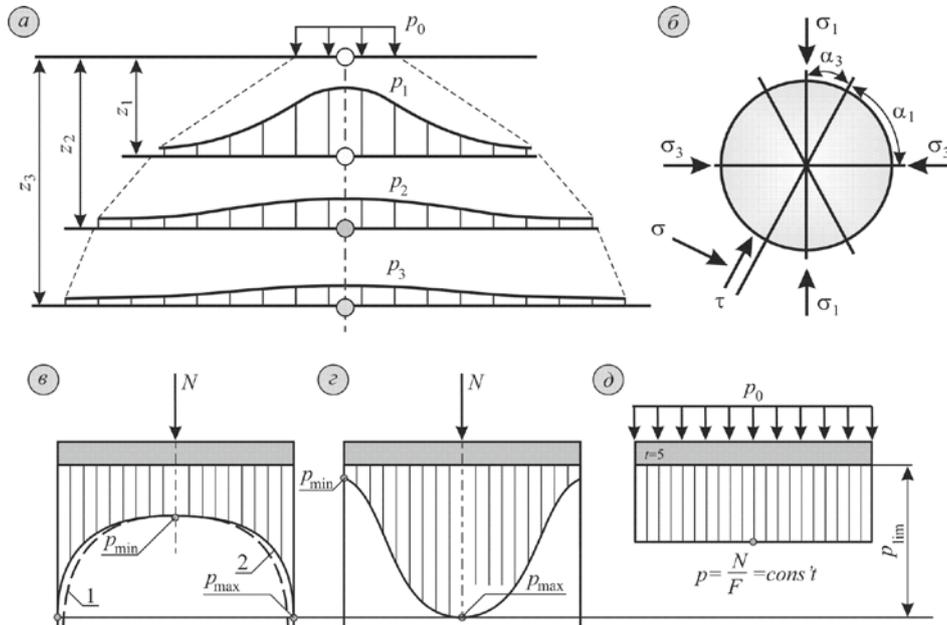


Рисунок 4 – Традиционные эпюры контактных давлений:

a – давления, передаваемые слоями дорожной одежды; *б* – схема ориентации главных напряжений и напряжений, действующих на площадку скольжения в точке, расположенной на оси симметрии нагрузки; *в*, *г* и *д* – контактные давления от жесткого и гибкого штампов при воздействии на них сосредоточенной и распределенной нагрузок; *1* и *2* – теоретическая и экспериментальная эпюры для абсолютно жесткого штампа

Из анализа рис. 4, а следует, что в верхних слоях в силу небольшой площади площадки, передающей давления, форма эпюры контактных давлений схожа с очертаниями эпюры контактных давлений от гибкого штампа при действии на него сосредоточенной силы, показанной на рис. 4, з. В этом случае точка, расположенная под центром штампа, воспринимает наибольшее давление по сравнению с окружающими ее точками. Эта центральная точка испытывает наибольшую деформацию сжатия ε_1 и стремится к наибольшему расширению с деформациями ε_2 и ε_3 . Значит, эта точка оказывает давление на окружающие ее точки, а материал этой точки работает в условиях возможного, хотя ограниченного, бокового расширения. Ограничение бокового расширения центральной точки связано с тем, что окружающие ее точки, воспринимая меньшее контактное давление, испытывают меньшую деформацию сжатия ε_1 и меньшие деформации бокового расширения ε_2 и ε_3 . Следовательно, напряжения σ_2 и σ_3 , возникающие на боковых поверхностях центральной точки от бокового давления соседних точек, меньше аналогичных напряжений, действующих на соседние точки, от давления на них расширяющейся центральной точки. Напряженное состояние центральной точки, расположенной под гибким штампом, диаметрально противоположно состоянию центральной точки под абсолютно жестким штампом, что показано на рис. 4, в. В этом случае на центральную точку давят окружающие точки, испытывающие большие давления и расширяющиеся с большими деформациями. По мере увеличения расстояния от поверхности покрытия, воспринимающего нагрузку (рис. 4, а), контактные давления уменьшаются, что обусловлено перераспределением по большей площади. В этом случае форма эпюры контактных давлений изменяется и с увеличением глубины приближается к равномерному распределению, которое имеет место под гибким штампом, воспринимающим равномерно распределенную нагрузку, что показано на рис. 4, д. Центральная точка испытывает компрессионное сжатие, при котором деформации бокового расширения равны нулю, а напряжения σ_2 и σ_3 находятся по формуле А. Динника $\sigma_2 = \sigma_3 = \xi \cdot \sigma_1$. Исходя из этого можно допустить, что точка, расположенная на поверхности и принадлежащая оси симметрии нагрузки испытывает компрессионное сжатие. Так как горизонтальные нормальные напряжения по глубине затухают более интенсивно по сравнению с уменьшением вертикального нормального напряжения, то точки, расположенные под верхней точкой, испытывают трехосное сжатие с ограниченной возможностью бокового расширения.

Анализируемые решения о расчете напряжений в грунтах и зернистых средах можно классифицировать на методы механики сплошной или зернистой среды и инженерные способы расчета, основанные на простейших физических моделях или эмпирических формулах, аппроксимирующих результаты эксперимента. В ходе анализа установлено, что от действия нагрузки распределенной по поверхности круглого штампа, для расчета максимальных и минимальных напряжений в точках, находящихся на оси симметрии нагрузки, получено только одно решение. Это решение широко известно, оно выполнено применением методов линейной теории упругости. Главный недостаток состоит в том, что в верхней части полупространства минимальные главные напряжения больше, чем это нужно для компрессионного сжатия, то есть точки полупространства, расположенные под центром штампа, поджаты боковыми давлениями от окружающих их точек. Это справедливо для жесткого штампа, но неприменимо к дорожной одежде нежесткого типа. Второй недостаток связан с тем, что решение получено для полупространства, а не слоя конечной толщины. Методы механики зернистой среды и инженерные методы для задачи определения напряженного состояния основания под круглым штампом позволяют вычислять только вертикальные нормальные напряжения, которые в точках, находящихся на оси симметрии нагрузки, равны максимальным главным напряжениям.

Поэтому в работе поставлена задача модификации способа расчета минимальных главных напряжений, возникающих в полупространстве от действия нагрузки, распределенной по поверхности круглого гибкого штампа. Модификация преследует цель учесть в известном решении толщину слоя и жесткость подстилающего основания. Модифицируемое решение для полупространства разработано специалистами ФГБОУ ВО «СибАДИ», оно представляет собой усовершенствованную функцию А. Динника, в которую введен третий множитель в виде функции глубины $\alpha(z)$:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \alpha(z) \cdot \xi \cdot \sigma_1. \quad (10)$$

Формула для вычисления значений функции глубины $\alpha(z)$ в точках, находящихся на оси симметрии нагрузки, имеет вид

$$\alpha(z) = 1 - \sqrt{1 - K^2}. \quad (11)$$

где K – функция уменьшения максимального главного напряжения по глубине полупространства в точках, расположенных на оси симметрии нагрузки.

Особенностью формулы (11) является то, что на поверхности полупространства в точке с ординатой $z=0$ $K=1$, а на бесконечности ($z=\infty$) $K=0$. Если $K=1$, то $\alpha(z)=1$, а формула (10) становится тождественной закону А. Динника, характеризующему компрессионное сжатие. При $K=0$ функция $\alpha(z)$ тоже равна нулю, вследствие чего в формуле (10) напряжения σ_2 и σ_3 принимают нулевые значения. В этом случае можно сказать, что на бесконечности напряжения σ_2 и σ_3 отсутствуют, вследствие чего эта точка испытывает одноосное сжатие. Из этого следует, что зависимости (10) и (11) наилучшим образом описывают напряженное состояние грунта земляного полотна, воспринимающего распределенную нагрузку, показанную на рис. 4, а.

Для расчета минимальных напряжений в слое конечной толщины в зависимость (11) необходимо подставлять функцию K_1 , учитывающую конечную толщину слоя, модуль упругости материала слоя и модуль упругости подстилающего полупространства. Такое решение получено в нашем исследовании, оно основано на применении принципа Н. Одемарка. В результате формулы для вычисления функции K_1 содержат радикал третьей степени из отношения модулей упругости материала слоя и подстилающего полупространства. Для практического применения модифицированы решения Фрелиха и инженерный способ распределяющей способности. Характеристикой модели распределяющей способности является угол рассеивания напряжений.

Для определения угла рассеивания напряжений в песчаных слоях, армированных и неармированных геосинтетическими сетками, нами выполнены экспериментальные исследования, базирующиеся на применении метода цветных полосок-индикаторов. Для таких испытаний изготовлены модели, в которых поверх уплотненного песчаного грунта укладывали такой же песок, покрашенный зеленой или синей тушью. Цветные полоски прокладывали через одинаковое расстояние по глубине модели. Модель нагружалась давлением до отчетливого деформирования цветных полосок-индикаторов. По изменению профиля цветных полосок-индикаторов с использованием тригонометрии определяли частные значения углов рассеивания напряжений в неармированном песке и песчаном слое с геосеткой. Во втором случае углы рассеивания напряжений определяли в слое песка, расположенном над сеткой, и в слое песка, находящемся под сеткой.

Основные моменты испытания приведены на рис. 5.

По результатам испытаний выполнена статистическая обработка данных, позволяющая определить углы рассеивания напряжений.

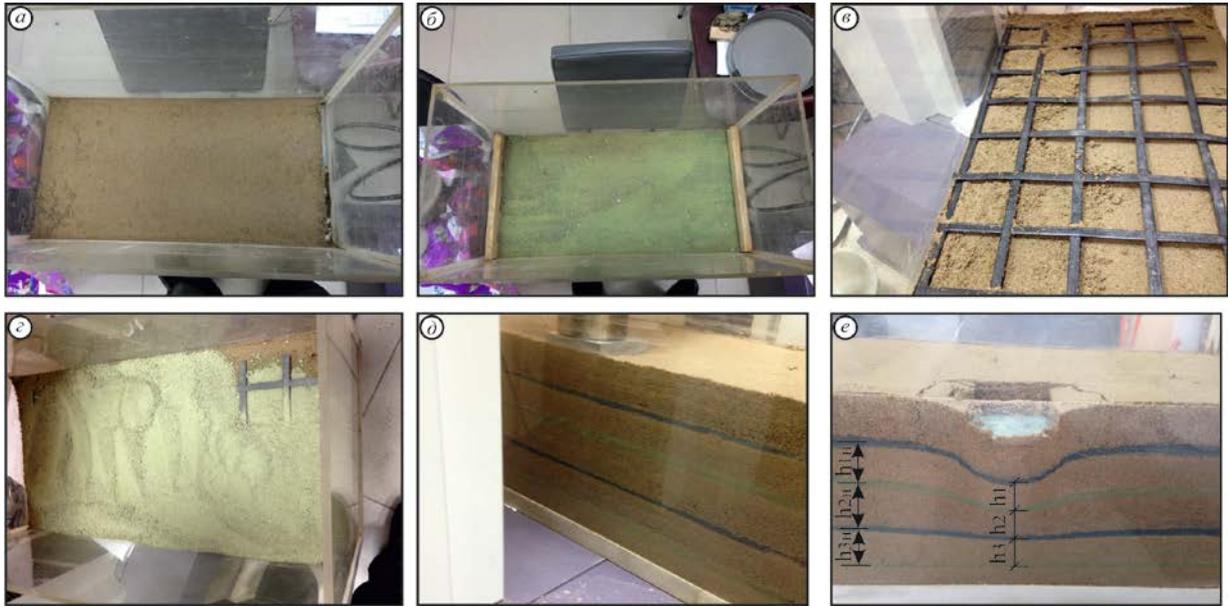


Рисунок 5 – Иллюстрации испытания методом цветных полосок- индикаторов: *a* – уплотненный нижний слой модели; *б* – нижняя цветная полоска; *в* – геосетка, уложенная на второй от поверхности песчаный слой; *г* – распределение крашеного песка по поверхности геосетки; *д* – нагружение модели давлением; *е* – деформированные цветные полоски и уменьшение расстояний между полосками в результате осадки песчаного слоя

В четвертом разделе выполнена модификация расчета дорожной одежды по сопротивлению сдвигу песчаных грунтов. Модифицированный расчет дорожной одежды в песчаном грунте содержит две проверки по двум расчетным схемам. Первая расчетная схема такая же, как в нормативном расчете, она основана на положении, что наиболее опасная точка расположена на оси симметрии нагрузки и находится на поверхности земляного полотна или дополнительного слоя основания.

В этом случае в качестве условия принимается нормативный критерий, записанный в виде неравенства

$$T \leq \frac{T_{\text{пр}}}{K_{\text{пр}}}, \quad (12)$$

где $K_{\text{пр}}$ – требуемый коэффициент прочности, регламентируемый нормативными документами; T и $T_{\text{пр}}$ – напряжение сдвига в расчетной точке и предельная величина этого напряжения, МПа.

Напряжение сдвига определяется левой частью предложенного нами критерия (7), который в данном случае целесообразно определять произведением эквивалентного напряжения критерия Кулона – Мора и функции (9), представляющей собой отношение напряжений сдвига критериев (7) и (1). В этом случае появляется возможность применения номограмм нормативных документов. Используя графики ПНСТ 542–2021, легко определить напряжение сдвига критерия Кулона – Мора, а умножив его на функцию (9), получим напряжение сдвига по критерию (7).

В данном случае формула для определения напряжения сдвига T в критерии (12) примет вид

$$T = p \cdot \tau \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^b \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}, \quad (13)$$

где p – давление на покрытие, численно равное давлению воздуха в шине, МПа; τ – напряжение сдвига от временной нагрузки, определяемое по соответствующей номограмме ПНСТ 542–2021.

Предельное напряжение сдвига в критерии (12) определяем разностью сцепления и напряжения сдвига от постоянной нагрузки. Напряжение сдвига от постоянной нагрузки находим аналогично с определением напряжения сдвига от временной нагрузки, то есть, произведением функции (9) и эквивалентного напряжения критерия Кулона – Мора, в котором главные напряжения определяются весом материала слоев, расположенных над проверяемым элементом дорожной одежды.

Таким образом, для определения предельного напряжения сдвига при использовании закона А. Динника или закона А. Гейма имеем две формулы:

$$T_{\text{пр}} = \left\{ \kappa_{\partial} \cdot c - \frac{\gamma_{\text{ср}}}{2 \cdot \cos \varphi} \cdot [1 - \xi - (1 + \xi) \cdot \sin \varphi] \cdot h \right\} \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^b \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}, \quad (14)$$

где h – толщина верхнего слоя двухслойной модели, вычисляемая суммой толщин всех слоев, расположенных над проверяемым элементом, м; $\gamma_{\text{ср}}$ – объемный вес материалов слоев дорожной одежды, вычисляемый как усредненное значение по толщине верхнего слоя двухслойной модели, МН/м³; ξ – коэффициент бокового давления песчаного грунта, расположенного в нижнем слое двухслойной модели.

$$T_{\text{пр}} = (\kappa_{\partial} \cdot c + \gamma_{\text{ср}} \cdot h \cdot \tan \varphi) \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^b \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}, \quad (15)$$

Вторая проверка по сопротивлению сдвигу выполняется для наиболее опасной точки, расположенной внутри проверяемого элемента. Этот расчет выполняется на критическую нагрузку, под которой понимается давление, передаваемое на проверяемый элемент конструкции, при котором в наиболее опасной точке этого элемента возникает предельное состояние по предлагаемому критерию (7). Тогда критерий расчета записывается по аналогии с неравенством (12), но не в напряжениях сдвига, а в давлениях, воспринимаемых рассчитываемым элементом p и его предельной величиной $p_{\text{без}}$:

$$p \leq \frac{p_{\text{без}}}{K_{\text{пр}}}. \quad (16)$$

Вывод формулы для расчета критической нагрузки $p_{\text{без}}$ аналогичен решению задачи о первой критической нагрузке Н.М. Герсеванова, но с той разницей, что вместо уравнения предельного состояния критерия Кулона – Мора в основу вывода формулы необходимо положить уравнение предельного состояния неравенства (7).

В это уравнение необходимо подставить главные напряжения, которые определим по формулам:

$$\sigma_1 = p \cdot K; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \left(1 - \sqrt{1 - K^2} \right) \cdot \xi \cdot p \cdot K. \quad (17)$$

Если формулы (17) подставить в левую часть неравенства (7), то после преобразований получим зависимость для расчета безопасного давления:

$$p_{\text{б}} = \frac{2 \cdot c_N}{K} \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi_N}{1 - \sin \varphi_N} \right)^b \cdot \left[1 - \left(\frac{1 + \sin \varphi_N}{1 - \sin \varphi_N} \right) \cdot \left(1 - \sqrt{1 - K^2} \right) \cdot \xi \right]^{-1}. \quad (18)$$

В формуле (18) нужно найти такое значение функции K , при котором напряжение сдвига T критерия (7) принимает наибольшее значение. Зависимости, опреде-

ляющие функцию K , индивидуальны для разных формул вычисления главного напряжения σ_1 .

При применении решения Фрелиха коэффициент K определяется по формуле

$$K = \frac{\sigma_1}{p} = 1 - \left(\frac{z}{R} \cdot \sqrt[n]{\frac{E_1}{E_2}} \right)^n \cdot \left[1 + \left(\frac{z}{R} \cdot \sqrt[n]{\frac{E_1}{E_2}} \right)^2 \right]^{\frac{n}{2}}, \quad (19)$$

где z – расстояние по оси симметрии нагрузки от поверхности рассчитываемого элемента до точки расчета напряжений, м; R – радиус площадки, по которой распределено давление; n – параметр Фрелиха; E_1 и E_2 – модули упругости материала слоя и подстилающего полупространства; C – параметр приведения (по Н. Одемарку, $C=3$, по Н.Н. Иванову и М.И. Якунину, $C=2,5$).

В модели распределяющей способности коэффициент K определяется по формуле

$$K = \frac{\sigma_1}{p} = \left(1 + \frac{z}{R} \cdot \sqrt[n]{\frac{E_1}{E_2}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_\sigma \right)^{-2}. \quad (20)$$

Для определения критической величины давления из критерия (7) при учете напряжений сдвига от постоянной нагрузки в соответствии с формулой (15) получена зависимость:

$$p_{\text{б}} = \frac{2}{K} \cdot \frac{c_N + \gamma_{\text{ср}} \cdot z_{\text{опт}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_N}{1 - \left(\frac{1 + \sin \varphi_N}{1 - \sin \varphi_N} \right) \cdot \left(1 - \sqrt{1 - K^2} \right) \cdot \xi} \cdot \left(\frac{1 + \sin \varphi_N}{1 - \sin \varphi_N} \right)^b. \quad (21)$$

Далее выполнялось экспериментальное исследование для определения опытных значений безопасных давлений на песчаный дополнительный слой основания дорожной одежды и сравнения с ними вычисленных безопасных давлений. Натурный эксперимент реализован путем выполнения штамповых испытаний при строительстве дорожной одежды автомобильной дороги по ул. Донецкая в г. Омске. При обработке данных эксперимента мы учитывали, что при одинаковых средних давлениях, передаваемых гибким и жестким штампом на одинаковый материал, осадки будут разные. Поэтому для одинаковых осадок необходимы разные средние давления, передаваемые жестким и гибким штампами. Давление от жесткого штампа $p_{\text{ж}}$, применяемого в эксперименте, пересчитывали в величину среднего давления от гибкого штампа $p_{\text{г}}$, при котором песчаный слой испытает осадку той же величины.

Для пересчета получена формула

$$p_{\text{г}} = \frac{\pi}{4} \cdot p_{\text{ж}}. \quad (22)$$

Сопоставив значения экспериментальных и теоретических критических давлений, установили, что наиболее близкие результаты получаются при $b=0,4$ и параметре Фрелиха $n=2,06$ для неармированного песчаного слоя, для армированного песчаного слоя $b=0,5$, а $n=2$. Применение модели распределяющей способности к приемлемым результатам не привело, вследствие чего расчет критической нагрузки с применением зависимости (20) был отвергнут.

В пятом разделе выполнено сравнение одинаковых конструкций дорожных одежд, запроектированных по нормативному методу (ПНСТ 542–2021) и предлагаемым способам расчета. Выполнена оценка экономической эффективности дорожных одежд, рассчитанных по предлагаемым методикам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получен критерий пластичности для расчета дорожных одежд нежесткого типа по сопротивлению сдвига, включающий в себя максимальное и минимальное главные напряжения и три параметра материала, из которых двумя параметрами служат сцепление и угол внутреннего трения, а третьим параметром является новая характеристика b . Изменение величины параметра b в интервале от 0 до 0,5 позволяет варьировать предельную величину максимального главного напряжения σ_{lim} , от которого зависят предельные значения напряжения сдвига и деформации. В зависимости от значения этого третьего параметра b предлагаемый критерий способен вырождаться в условие Кулона–Мора (при $b=0,5$) и критерий Г.К. Арнольда (при $b=0$). При варьировании величины параметра b в диапазоне от 0 до 0,5 напряжения сдвига уменьшаются с увеличением b . Сравнительный анализ предельных значений напряжений сдвига, вычисленных по критериям Арнольда (при $b=0$) и Кулона – Мора (при $b=0,5$), показал, что их значения различаются в 1,77 раза. Если в предлагаемом критерии принять $b=0,4$, то вычисленные значения напряжения сдвига будут превышать напряжения сдвига критерия Кулона – Мора в 1,13 раза.

Таким образом, варьируя величину параметра b , вычисляемые значения напряжения сдвига можно приближать к величинам этих напряжений, соответствующих либо критерию Кулона – Мора, либо критерию Арнольда. Эта особенность позволяет применять предлагаемый трехпараметрический критерий в качестве предвестника наступления предельного состояния по критерию Кулона – Мора. Или, наоборот, уменьшением параметра b можно добиваться значительного отличия напряжений сдвига по предлагаемому критерию и критерию Кулона – Мора.

2. Определение параметров предлагаемого трехпараметрического условия пластичности выполнено путем проведения лабораторных трехосных испытаний. При планировании эксперимента во внимание принимали склонность песчаных грунтов к кольматации, в процессе которой происходит вымывание более мелких глинистых частиц в поры грунта, что ухудшает фильтрационную способность дренирующих слоев дорожной одежды. Поэтому трехосные испытания проведены как по традиционной для песчаных грунтов КД-схеме, так и в условиях отсутствия оттока поровой жидкости, что реализовано выполнением КН-теста. Сопоставления данных таких испытаний показали, что в условиях отсутствия оттока воды параметры сопротивления песка сдвигу значительно уменьшаются. Отсюда следует, что конструкции дорожных одежд с песчаными дренирующими слоями должны включать геотекстиль или геокompозит, состоящий из армирующей геосетки и геотекстиля. В этом случае негативное влияние процесса кольматации снижается. В качестве расчетных параметров сопротивления песка сдвигу приняты данные КД-теста, обработанные методами математической статистики. Анализ и обработка результатов трехосных испытаний песчаных грунтов позволили определить значения параметра b для конструирования дорожных одежд, при которых напряжения сдвига соответствуют строго определенной величине деформации, принимаемой в качестве предельной величины.

3. На основе метода цветных полосок-индикаторов разработан способ экспериментального исследования распределяющей способности песчаных слоев, в том числе армированных геосинтетическими материалами. Разработанная методика позволила определить частные значения углов рассеивания напряжений, как в неармированных моделях, так и в армированных моделях. Армирующая геосетка располагалась внутри песчаной модели, а углы рассеивания напряжений вычислялись, как в песчаных областях над геосеткой, так и в области песка, расположенного под геосеткой. Выборки частных значений углов рассеивания напряжений в неармированных и армированных моделях сравнивались применением критериев согласия. В результате установлено, что под армирующей сеткой РД-60 100×100 угол рассеивания напряжений увеличива-

ется на 2,9%, а под сеткой РД-60 75×75 возрастает на 9,1%. Это позволяет утверждать, что эффективность армирования зависит от размера ячейки сетки, изготовленной из одного и того же материала.

4. Выполнено совершенствование расчета песчаных слоев и грунтов земляного полотна по сопротивлению сдвигу применением полученных решений. Созданный расчет по сопротивлению сдвигу основан на выполнении двух проверок.

Первая проверка является модификацией традиционного расчета по нормативной методике ПНСТ 542-2021. В основу этого расчета положен трехпараметрический критерий пластичности, в котором эквивалентное напряжение критерия Кулона – Мора умножено на функцию угла внутреннего трения и введенного автором третьего параметра b . Формула для определения этой функции получена из отношения эквивалентного напряжения трехпараметрического критерия к эквивалентному напряжению традиционного условия Кулона – Мора. Такая форма записи позволяет применить к расчету напряжений сдвига номограммы, представленные в ПНСТ 542-2021.

Вторая проверка предполагает вычисление давления, передаваемого на песчаный слой или песчаное земляное полотно, а также расчет диаметра площадки, по которой давление распределено по поверхности рассчитываемого элемента дорожной конструкции. В этом случае проверка выполняется для нижнего подстилающего слоя. В основе расчета лежит тот же предложенный нами трехпараметрический критерий пластичности, записанный в главных напряжениях. Для определения главных напряжений рассмотрена возможность применения традиционного решения С.Р. Foster, R.G. Ahlvin и Н.Н. Ulery. При этом выяснили, что минимальное главное напряжение в верхней части слоя или полупространства больше, напряжения необходимого для компрессионного сжатия, то есть для сжатия без бокового расширения. Это означает, что в верхняя часть рассчитываемого элемента поджата, как под жестким штампом. Так как пневматическое колесо автомобиля и слои нежесткой дорожной одежды относятся к категории гибких штампов и конструкций, то применение известного решения возможно, только лишь в качестве приближение по причине отсутствия более подходящего. Поэтому сочли целесообразным развить решение СибАДИ, которое представляет собой вычислением минимального главного напряжения произведением трех множителей, два из которых хорошо известны (коэффициент бокового давления и максимальное главное напряжение). Третьим множителем является функция глубины, величина которой убывает по глубине от единицы на поверхности и до нуля на бесконечности. Решение СибАДИ получено для полупространства, оно не применимо к слою конечной толщины. Поэтому формула для определения функции глубины автором была модифицирована, а для расчета главных напряжений предложены две модифицированные модели, а именно модифицированное решение О. Фрелиха и модифицированная модель распределяющей способности. После подстановки главных напряжений, вычисляемых по соответствующему решению в уравнение предельного состояния трехпараметрического критерия пластичности, оно решено относительно давления. Полученное давление является первой критической нагрузкой если в наиболее опасной точке возникает предельное состояние по предложенному критерию пластичности.

5. Для оценки адекватности предложенного решения по критерию безопасных давлений были реализованы штамповые испытания, которые проведены на реконструируемой ул. Донецкая в г. Омске. Для обработки результатов испытаний, выполненных применением жесткого круглого штампа, разработана методика пересчета давлений от жесткого круглого штампа в давления от гибкого круглого штампа. Эта методика распространяется на пересчет первой критической нагрузки, которая в процессе испытаний является одной из ступеней давления. Результаты испытаний однозначно указывают на то, что более предпочтительным является расчет безопасного

давления (первой критической нагрузки) из предложенного критерия пластичности с подстановкой в него модифицированной модели О. Фрелиха. Установлено, что при $b=0,4$ и параметре Фрелиха $n=2,06$ для неармированного песчаного слоя, $b=0,5$ и $n=2$ для армированного песчаного слоя результаты расчетов согласуются с данными эксперимента. От применения модели распределяющей способности автор был вынужден отказаться.

Перспективы по дальнейшей разработке темы могут заключаться в применении предложенного метода расчета к слоям оснований дорожных одежд из зернистых материалов, но для этого необходимо выполнение большого объема экспериментов по предложенным экспериментальным методикам.

ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ:

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России

1. Александров, А.С. О допустимых давлениях на грунты земляного полотна и слою дорожных одежд / А.С. Александров, Г.В. Долгих, А.Л. Калинин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2012. – № 2 (61). – С.10–13.

2. Александров, А.С. Применение критерия Друкера – Прагера для модификации условий пластичности / А.С. Александров, Г.В. Долгих, А.Л. Калинин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2013. – № 2 (65). – С.26–29.

3. Калинин, А.Л. Применение модифицированных условий пластичности для расчета безопасных давлений на грунты земляного полотна / А.Л. Калинин // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – №4 (39). – С.35–45.

4. Александров, А.С. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Ч. 1. Учет деформаций в условии пластичности Кулона–Мора / А.С. Александров, А.Л. Калинин // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 7. – С. 4 – 17.

5. Александров, А.С. Определение первой критической нагрузки для дорожных конструкций / А.С. Александров, А.Л. Калинин, Т.В. Семенова // Вестник ВолгГАСУ. – 2022. – №1. – С. 116 – 132.

6. Пролыгин, А.С. Сравнительный анализ методов вычисления штамповых модулей деформации грунтов / А.С. Пролыгин, А.Л. Калинин, А.С. Александров и др. // Вестник СибАДИ. – 2022. № 1 (83). – С. 114–130.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

7. Александров, А.С. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Ч. 2. Модифицированные модели расчета главных и касательных напряжений / А.С. Александров, Г.В. Долгих, А.Л. Калинин // Инженерно-строительный журнал. – 2016. – № 2. – С. 51 – 68.

8. Aleksandrov A.S., Kalinin A.L., Tsyguleva M.V. Distribution capacity of sandy soils reinforced with geosynthetics. Magazine of Civil Engineering. 2016. Vol. 6 (66). Pp. 35–48.

9. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L. Analysis and modeling of process of residual deformations accumulation in soils and granular materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. –C. 012004

10. Aleksandrov A.S., Dolgih G.V., Kalinin A.L. Criteria of mora-coulomb with three parameters of material. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 992. Pp. 863–869.

11. Aleksandrov A., Dolgih G., Kalinin A. Calculation of shear stresses in the soil of the subgrade using empirical plasticity conditions. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. C. 012016.

Статьи в сборниках материалов конференций и других изданиях

12. Калинин, А.Л. Применение модифицированного критерия Писаренко – Лебедева для расчета касательных напряжений в земляном полотне/ А.Л. Калинин// Материалы Международного конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ». Архитектура, строительство, транспорт, технологии, инновации. – Омск: СибАДИ, 2013. – С. 299–307.

13. Александров, А.С. Один из путей совершенствования расчета дорожных одежд по условию сопротивления сдвигу в грунте земляного полотна/ А.С. Александров, Г.В. Долгих, А.Л. Калинин // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – Пермь, 2013.–Т. 3. –С. 9–22.

14. Калинин, А.Л. Применение условий пластичности для расчета безопасных давлений/ А.Л. Калинин // Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных ФГБОУ ВПО «СибАДИ». – Омск: СибАДИ, 2015. – С. 384–393.

15. Калинин, А.Л. Способ модификации условий пластичности/ А.Л. Калинин // II Международная научно-практическая конференция ФГБОУ ВО «СибАДИ». – Омск: СибАДИ, 2016. – С. 146–150.

16. Калинин, А.Л. Экспериментальное исследование несущей способности армированных и неармированных песчаных слоев дорожной одежды/ А.Л. Калинин // II Международная научно-практическая конференция ФГБОУ ВО «СибАДИ». – Омск: СибАДИ, 2016. – С. 150–154.

17. Александров, А.С. Эмпирические условия пластичности в расчетах земляного полотна по сдвигу/ А.С. Александров, Г.В. Долгих, А.Л. Калинин // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2019. – № 10 (85). – С. 7–20.

18. Пролыгин, А.С. Эпюры контактных давлений и напряженное состояние грунта под жестким и гибким штампами/ А.С. Пролыгин, А.Л. Калинин, А.С. Александров// Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции : Омск, 2021. –С. 331–337.

19. Юсупов, И.М. Применение методов линейно-деформируемой среды к расчету предельных нагрузок на грунты земляного полотна/И.М. Юсупов, А.Л. Калинин, Н.П. Александрова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. – Омск, 2021. –С. 345–353.

20. Юсупов, И.М. Применение решений теории предельного равновесия грунта к расчету предельных давлений на земляное полотно. /И.М. Юсупов, А.Л. Калинин, Т.В. Семенова// Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. – Омск, 2021. –С. 338–344.

КАЛИНИН АЛЕКСАНДР ЛЬВОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО
СОПРОТИВЛЕНИЮ СДВИГУ В ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано к печати _____
Формат 60x90 1/16. Бумага писчая.
Оперативный способ печати.
Усл. п. л. 1,5
Тираж 150 Заказ № 137

Отпечатано в типографии ООО "АН2"
г. Омск, ул 4я Поселковая, 26, корп.2
тел.: 503-163