

## ЗАВИСИМОСТЬ СОСТОЯНИЯ ЗАГЛУБЛЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ АЭРОПОРТОВ ОТ ГРАНИЧНОГО РАВНОВЕСИЯ ГРУНТОВОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

Дмитрий Прусов<sup>1</sup>, Андрей Белятынский<sup>2</sup>

*Национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова 1, 03680 Киев, Украина  
Эл. почта: <sup>1</sup>prusov@nau.edu.ua; <sup>2</sup>beljatynskij@mail.ru*

**Резюме.** Рассматриваются основы методологии исследования напряженно-деформированного состояния конструкций, находящихся во взаимодействии с грунтовыми массивами, заглубленных объектов и сооружений аэропортов и аэродромов в сложных инженерно-геологических условиях.

**Ключевые слова:** аэропорты, аэродромы, заглубленные объекты, напряженно-деформированное состояние.

### Постановка проблемы

Современное строительство нуждается в максимальном использовании пространства в пределах не только городов и поселков, но и современных аэропортов, на территории которых необходимо строить современные терминальные комплексы, подземные комплексные сооружения и паркинги, ангары, новые взлетно-посадочные полосы, места стоянок сверхтяжелых широкофюзеляжных воздушных судов, транспортных средств для их обслуживания и другие инженерные сооружения. Это требует устройства глубоких котлованов вблизи существующих зданий и сооружений.

В процессе строительства возникают определенные трудности, связанные с сохранением неизменности имеющегося напряженно-деформированного состояния (НДС) уже существующих зданий и оснований под ними. Согласно международной классификации, в частности, европейских норм и стандартов (еврокодов), строительство и реконструкция в зонах существующих застроек в сложных геологических условиях относятся к наивысшей категории сложности.

Многие из существующих зданий, рядом с которыми сооружаются новые здания, имеют фундаменты неглубокого заложения, которые чувствительно реагируют на смену НДС грунтового основания. Устройство котлованов, подземных канальных сооружений, использование подземного пространства под паркинги, срочные локальные водоемы, которые временно аккумулируют грунтовые воды, обеспечивая их уровень в пределах допустимого под взлетно-посадочными полосами, и другие инженерные сооружения нарушают

уравновешенное напряженное состояние основания и по большей части негативно влияют на существующие конструкции зданий. В этих условиях важную роль играют инженерные защитные сооружения и технологии их устройства, которые могут обеспечить минимальные изменения НДС основания. Расчеты конструкций защитных сооружений, а именно: защитных экранов, диафрагм, подпорных стенок различной конфигурации, стен в грунте, сплошных и комбинированных из буронабивных и буро-инъекционных свай глубиной до 40 м и больше необходимо проводить с учетом нелинейного поведения грунтов, особенно на этапе возведения глубоких котлованов.

### Анализ исследований

Анализ последних исследований и публикаций свидетельствует о том, что существующие нормы и эмпирические зависимости при оценке влияния нового строительства на существующие конструкции приводят к необоснованному запасу или наоборот к разрушению существующих конструкций. Более того, некоторые существующие технологии строительства, например, устройство свай без экскавации грунта, являются новыми и еще не нашли отражения в нормативных документах.

Возможность обеспечения надежного и экономического решения той или иной проблемы предоставляет анализ взаимодействия систем: «существующее здание – защитные конструкции – котлован под новое здание»; «основания и фундаменты существующих зданий – защитные

конструкции – надземные конструкции в целом», или различные комбинации взаимодействия грунтового полупространства под существующими зданиями и защитных сооружений между существующими и вновь строящимися зданиями.

На сегодняшний день анализ упомянутых систем можно проводить лишь средствами численного моделирования, которое требует использования современной компьютерной базы и соответствующего математического аппарата. Сложность решения соответствующих проблемных задач заключается не только в создании или использовании соответствующего программного комплекса, а прежде всего в принятии обоснованной физической модели, которая наиболее корректно описывает нелинейные процессы деформирования материала среды, в том числе модели материала грунтов, а также в выборе расчетных схем и реализации специальных алгоритмов расчета, которые обеспечивают достоверность результатов расчета. Ситуация осложняется еще и тем, что в настоящее время отсутствует универсальный метод или модель, которые можно применять к любому материалу, геоматериалу или среде.

Каждая постановка задачи должна включать в себя собственный анализ на достоверность и особый подход, который требует от современного проектировщика не только умения правильно разработать документацию, но и иметь соответствующие значительные навыки и знания в вопросах численного моделирования и механики грунтов.

Проектирование защитных конструкций под новую застройку в условиях пристройки следует проводить с учетом влияния на существующие конструкции и прилегающий грунтовой массив различных этапов строительства, таких, как устройство защитных конструкций; разработка котлована с учетом эффекта разгрузки основания, последовательности возведения инженерных конструкций.

Получение надежных результатов моделирования системы в большинстве случаев сводится к использованию нелинейных упруго-пластичных моделей, которые базируются на теории пластичного течения, таких, как Кулона-Мора, Мизеса-Шлейхера-Боткина, Друккера-Прагера, Николаевского и других. При этом необходимым фактором остается учет конструктивности и неоднородности – технологической последовательности процесса строительства согласно принятой системе (Баженов и др. 2000; Шимановский, Цыхановский 2005).

Обеспечение надежности зданий и сооружений, снижения финансовых и материальных затрат остается важным и актуальным вопросом. Эти требования

относятся к основаниям и фундаментам как к самой ответственной части инженерных сооружений. Сметные расходы работ по реконструкции (усилению) фундаментов или исправлению ошибок, которые были допущены при проектировании, во много раз превышают начальную стоимость устройства фундаментов, а порой и всего сооружения. Благодаря этому уточненным расчетам оснований и фундаментов в современных условиях уделяется значительное внимание. Одним из рациональных видов фундаментов являются сваи, которые обеспечивают высокую несущую способность и минимальную величину осадок фундаментов. Объективными причинами внедрения свайных фундаментов являются наличие просадочных грунтов, острая необходимость строительства многоуровневых промышленных и гражданских зданий и сооружений с целью рационального сохранения земель под сельскохозяйственные угодья. Невзирая на давнее и широкое применение свайных фундаментов в жилищном, промышленном и гражданском строительстве, особенности их взаимодействия с основаниями изучены недостаточно, и в настоящий момент существует очень много проблемных задач, достоверное решение которых не реализовано в полной мере.

### **Цель работы и постановка задачи**

Создание расчетной модели грунтовой основы, которая обеспечивала бы достаточное соответствие между результатами расчета и действительностью, все еще является одной из важнейших проблем строительства. Современные методы расчета оснований в механике грунтов позволяют оценить лишь их порядок. Использование в качестве расчетного давления предельной величины, которая соответствует концу (излому) линейного участка графика «нагрузка–осадка» приводит, как правило, к принятию не всегда экономичных решений. За пределами линейной механики грунтов остается неучтенной большая область исследований пластических деформаций. Возникает необходимость разработки более совершенных методов расчета, могущих учитывать действительную схему работы фундаментов и реальные нелинейные свойства грунтовых оснований. Актуальной остается задача разработки математической модели расчета сопротивления свай с целью повышения достоверности и надежности проектных решений путем учета геометрической и физической нелинейности работы основания, дилатантных явлений в них и уточнения критериев предельного состояния грунтов по расширенному критерию Мизеса-Губера-Боткина.

В связи с увеличением подъемной массы современных и перспективных на ближайшие 10–20 лет сверхтяжелых широкофюзеляжных воздушных судов, таких, как В747-400, В747-8, А-320, В-737-900er, В-737-800, А380-800, А380-800f, АН-225 и других, действующие нормы проектирования аэродромных покрытий не обеспечивают необходимую надежность по прочности и деформативности, а также технические требования по долговечности при их эксплуатации. Действующие нормы вообще не учитывают действительное взаимодействие плит конечных размеров жестких покрытий, а также изменяемость величины коэффициента постели грунтовых основ при наличии слабых прослоек.

Данная работа выполнена на основе детального анализа напряженно-деформированного состояния гибких плит конечных размеров на упругом основании с использованием величины коэффициента постели как функции координат точек в плоскости плиты. На основе моментной схемы конечных элементов (МСКЭ) разработана численная методика исследования напряженно-деформированного состояния гибких тонких плит из крепких материалов – бетона, армобетона, фибробетона, железобетона, металлопроката и других композитных материалов, которые работают совместно с линейно упругой неоднородной основой.

Теоретические основы предложенной методологии исследования взаимодействия ограждающих и защитных конструкций с грунтовым полупространством в запредельном состоянии с учетом геометрической и физической нелинейности в постановке задачи при реализации эволюции сложного нагружения с учетом активной и пассивной нагрузки и эффекта разгрузки грунтового полупространства, разработанных с применением теории нелинейной механики грунтов, нелинейной теории упругости и пластичности, методов нелинейного программирования и метода конечных элементов, а также новых модифицированных моделей учета неоднородности и влияния анизотропных свойств многослойного полупространства при отсутствии трения между отдельными слоями, и использовано при решении плоских задач исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) полупространства при взаимодействии покрытия с грунтовым основанием (Цихановский, Прусов 2004, 2009).

Разработка уточненных методов расчета конструкций аэродромных покрытий проведена на основе следующих критериев: предельного состояния плит покрытия по прочности, допустимых упругих прогибов, предельного сопротивления грунтов на сдвиг и допустимых растягивающих напряжений при изгибе для монолитных

слоев покрытия – и обуславливает необходимость рассматривать комбинированный многослойный массив из собственно покрытия, искусственной и грунтовой основы при сведении решения задачи в пространственной постановке к задаче в плоской постановке. Для решения поставленной задачи на основе численного метода выполнено моделирование многоколесного влияния от шасси современных тяжелых воздушных судов с адекватным сведением к эквивалентному полосовому нагружению, которое имеет место при решении плоской задачи. С целью определить предельные деформации всего многослойного расчетного фрагмента полупространства с учетом предельного сопротивления грунтов на сдвиг и допустимых растягивающих напряжений в слоях искусственного основания учитывается развитие локальных пластических деформаций. На основе численных экспериментов, выполненных с помощью моментной схемы конечных элементов, даны рекомендации относительно уточнения коэффициентов условий работы, которые позволяют использовать существующие инженерные аналитические методы расчета (Прусов, Хриптулова 2008; Прусов 2009).

Предельное равновесие грунтов в элементарной рассматриваемой области (конечном элементе) адекватно такому напряженному состоянию, при котором даже небольшое дополнительное влияние может нарушить это равновесие. Такое напряженное состояние характеризуется еще и тем, что сопротивление на сдвиг в элементарной области (конечном элементе) должно быть равным предельному сопротивлению для данного типа грунта. Указанное состояние относится ко второй фазе предельного состояния грунтов при обширном развитии деформаций сдвигов в массиве грунтов. Численное решение задачи устойчивости грунтовых массивов в этом случае осуществляется на основе, предложенной в методике с некоторыми уточнениями критерия текучести для грунтового полупространства.

Вариационное уравнение в соответствии с энергетическими методами описывает равновесие элементарного объема любой сплошной среды независимо от его физико-механических характеристик. В предложенной методике реализуется прикладной подход вариационных принципов и теории предельного напряженного состояния деформированного тела, когда полученные решения связаны с распределением сначала упругих областей на упругие и неупругие, с развитием зон упруго-пластических (сдвиговых для грунтов) деформаций. Исходная расчетная конечно-элементная модель в процессе деформирования трансформируется в соответствии с критерием текучести (разрушения) грунто-

вого массива и разделяется на две области определения напряженно-деформированного состояния: упругую и упруго-пластическую.

В данной работе критерий устойчивости или текучести грунтового полупространства для отдельной локальной однородной изотропной области представлен в универсальной форме на основе расширенного критерия текучести Мизеса (за счет включения в него зависимостей от шарового тензора напряжений – гидростатических напряжений) с использованием поверхности нагрузки по критерию Кулона-Мора и с учетом не только второго, но и третьего инварианта тензора девиатора функции напряжений через инвариант Лодена-Надаи.

### Численные исследования

В качестве примера практического применения метода конечных элементов (МКЭ) и демонстрации достоверности полученных решений в задачах исследования устойчивости грунтового массива были проведены численные исследования комбинированного многослойного полупространства, которое содержит слои железобетонного покрытия, искусственной основы и активной зоны грунтового основания. Также были рассмотрены несколько тестово-контрольных задач, среди которых исследование напряженно-деформированного состояния изотропного однородного грунтового полупространства с полостью в плоской постановке и определение напряженно-деформированного состояния нежесткого аэродромного покрытия от влияния полосовой нагрузки на активное полупространство.

Рассматривается тестовая задача определения напряженно-деформированного состояния (НДС) изотропного однородного грунтового полупространства с полостью в плоской постановке с учетом развития упруго-пластических деформаций, определения пределов областей пластических и упругих зон распространения деформаций, а также определения смещений в зоне образования поверхности скольжения призмы обрушения. Для получения численных решений рассматривалась дискретная модель части грунтового полупространства с вертикальным склоном (рис. 1). Размеры полупространства  $30 \times 21$  м ( $3000 \times 2100 \times 1$  см) с переменной площадью в процессе нелинейного деформирования за счет введения полости (модель котлована) с размерами  $1000 \times 950$  см (ширина постоянна – 1000 см, глубина изменяется от 100 до 950 см). Сеточная область расчетной схемы задачи имела размеры  $2 \times 27 \times 27$ , что соответствовало 676 конечным элементам (КЭ), включая

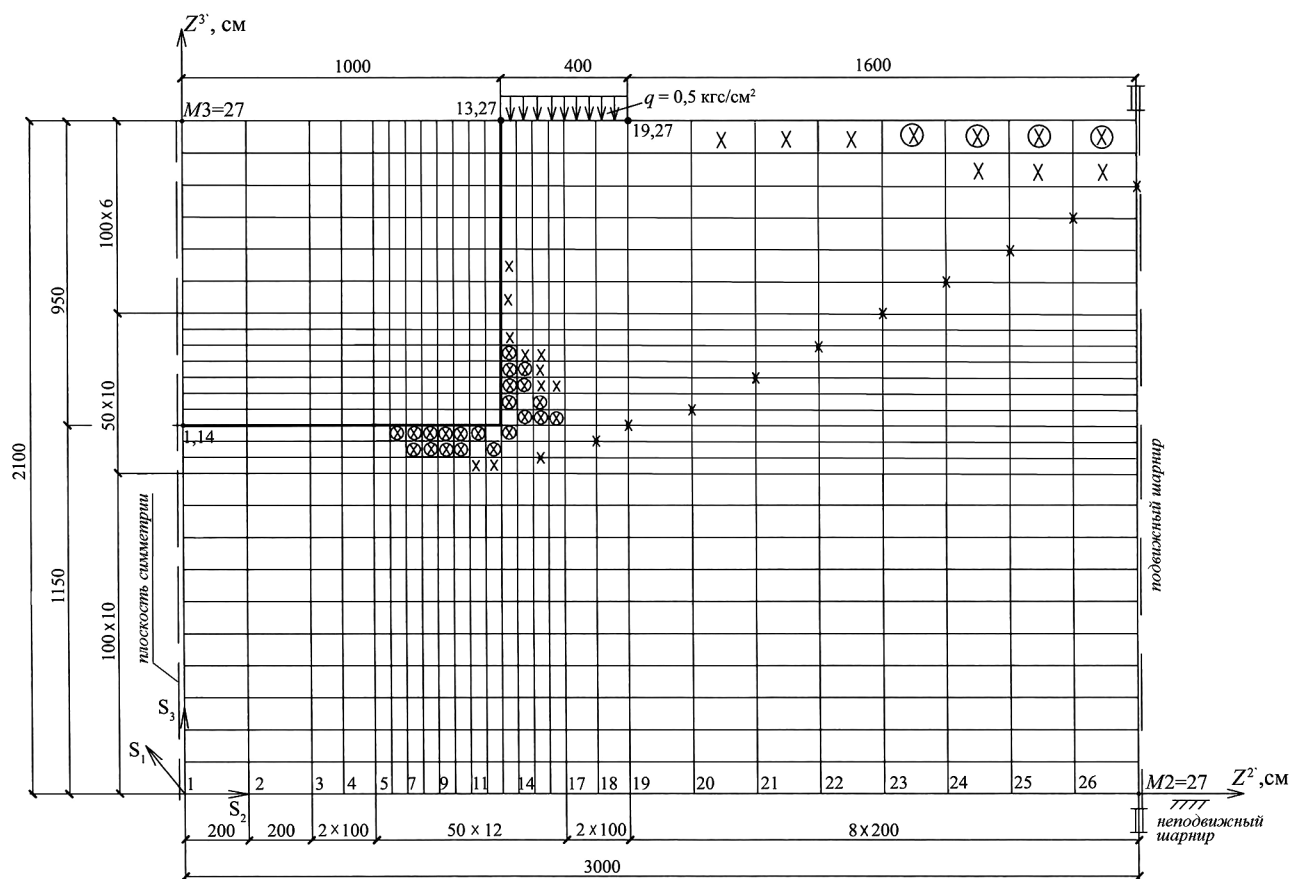
полость с границами. Приняты соответствующие граничные условия расчетного фрагмента, а также физико-механические характеристики однородного изотропного грунтового полупространства.

Результаты исследования показали, что первыми в критическое состояние при наличии пластических деформаций, когда функция нагружения становится большей нуля, переходили конечные элементы, которые локализовывались в окрестности нижней точки откоса (вертикальной стенки), при этом наблюдалась тенденция развития критического состояния в направлении от угла выемки влево и вправо вдоль границ полости и по диагонали. При достижении глубины выемки 9,5 м характер концентрации пластических деформаций в области нижнего угла выемки практически совпадал по двум вариантам схемы нагружения, что свидетельствует о том, что основным фактором образования границ призмы обрушения на откосах грунтовых массивов является глубина выемки (высота откоса). Благодаря наличию небольшой локальной полосовой нагрузки удалось получить и обнаружить узлы на линии скольжения призмы обрушения, когда напряженное состояние в примыкающих КЭ приближается к критическому. Таким образом, с определенным приближением можно получить цилиндрическую поверхность скольжения призмы обрушения грунтового массива, которая проходит ниже угла выемки на 1,5 м (составляет 0,15 от глубины выемки), ориентировочный радиус которой составляет  $R_c = 28$  м.

По результатам нелинейного деформирования дискретных моделей задачи можно представить изменение формы грунтового массива в критическом состоянии с соответствующими векторами перемещения узлов КЭ-модели по ограничивающим поверхностям откоса и в характерных сечениях по поверхностям скольжения и выпору грунтов по дну котлована, значениями компонент узловых векторов отмеченных поверхностей, что позволяет получать реальную картину взаимодействия призмы обрушения откоса и выпору грунтов по дну котлована.

В качестве второй тестово-контрольной задачи определения напряженно-деформированного состояния нежесткого аэродромного покрытия от влияния полосового нагружения на активное полупространство для оценки влияния развития упруго-пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние аэродромных покрытий рассматривался расчет нежесткого аэродромного покрытия и сравнительный анализ его НДС при использовании инженерного и численного расчетов. Использован пример расчета нежесткого аэро-





**Рис. 1.** Расчетная схема задачи на устойчивость вертикального земляного откоса в однородном грунтовом полупространстве и зоны распространения пластических деформаций: × – только от собственного веса грунтов; ⊗ – от собственного веса грунтов и полосового нагружения

**Fig. 1.** The Design scheme of the stability problem of the vertical slope in a uniform soil semi-space, and the zones of plastic deformation distribution: × – from the soil self weight only; ⊗ – from the soil self weight and strip loading

**1 pav.** Vienalyčio grunto šlaito vertikalaus stovumo skaičiuojamoji schema ir plastinių deformacijų sklaidimo zonos: × – vertinant grunto nuosavą svorį; ⊗ – vertinant grunto nuosava svorį ir juostinės apkrovos faktorių

дромного покрытия облегченного типа для аэропорта IV класса. Исходя из технико-экономических обоснований соответствующего проекта аэродрома, учтены специфика экономических, климатических, гидрологических и других условий строительства. Достоверность надежности проекта конструкции облегченного покрытия взлетно-посадочной полосы аэродрома подтверждается инженерным расчетом на прочность и дополнительным научно-исследовательским расчетом с использованием разработанной методологии.

В конструкции облегченного нежесткого покрытия предусматривалась искусственная основа — собственное покрытие из грунтоцемента, защитный слой из гранитного отсева и активная зона грунтовой основы, которая состоит из глины пылеватой, глины жесткой, песка среднезернистого и глины песчаной с соответствующими физико-механическими характеристиками (рис. 2).

Было определено расчетное значение колесной нагрузки для расчетного воздушного судна, которая имеет наибольшую нормативную нагрузку на основную опору.

В соответствии с исходными данными проведен инженерный расчет на прочность нежесткого аэродромного покрытия, который показал, что допустимый (предельный) прогиб покрытия по относительной деформации при колесном действии самолета не удовлетворяет нормативным условиям. Проанализировав напряженно-деформированное состояние рассмотренной конструкции облегченного нежесткого покрытия при действии полосового нагружения (с учетом коэффициента приведения к эквивалентному круговому отпечатку), можно сделать окончательные выводы.

С целью получения численных результатов рассмотренной задачи расчета нежесткого аэродромного покрытия с учетом взаимодействия с грунтовой основой выполнены соответствующие процедуры моделирова-

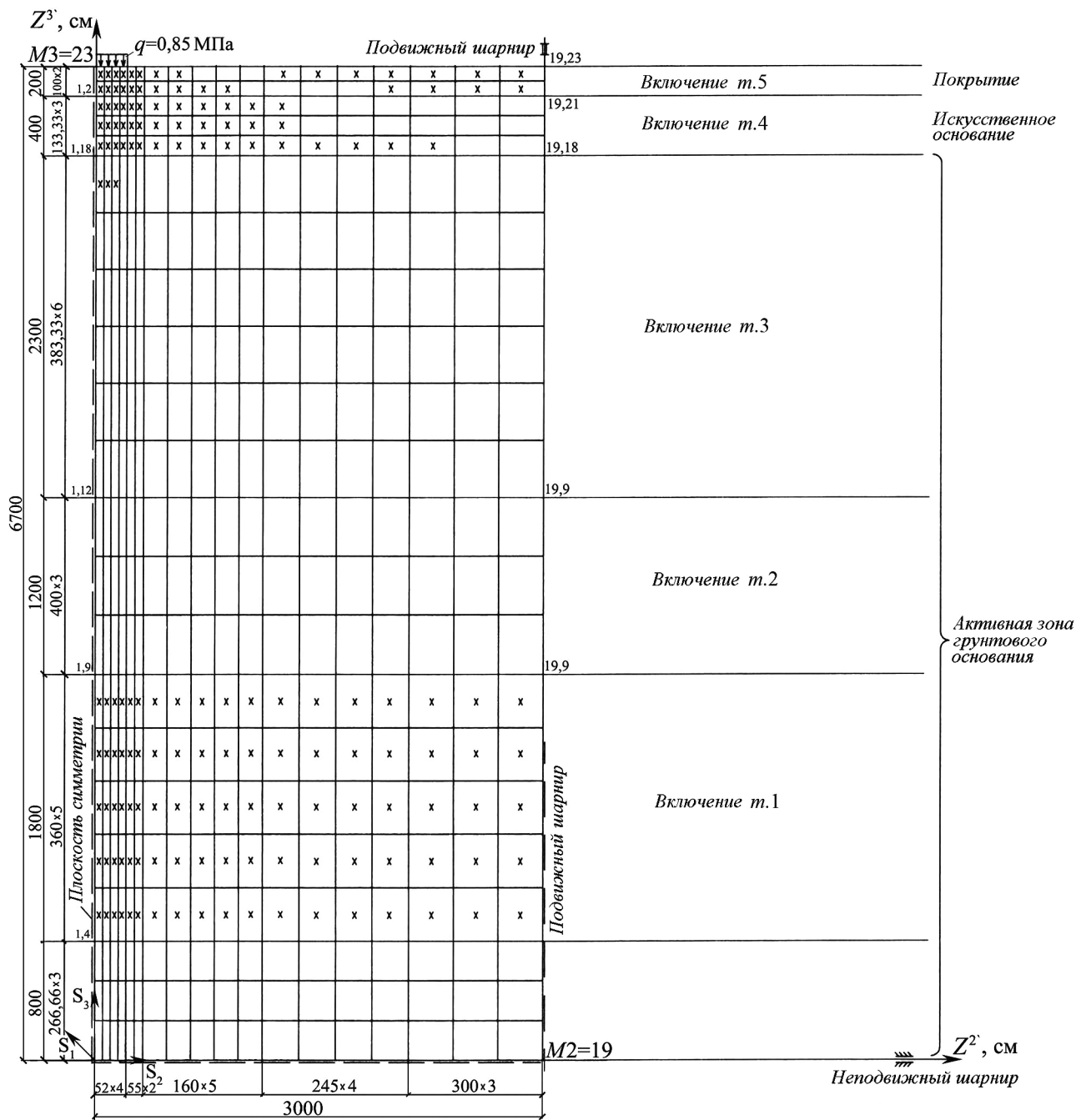


Рис. 2. Расчетная схема задачи исследования НДС многослойного полупространства с учетом включений (искусственное покрытие) и области развития зон упруго-пластических деформаций

Fig. 2. Design model of stress-strain state research problem of multilayered soil semi-space in view of the inclusion (artificial surfacing) and the elastic-plastic deformations zones development

2 pav. Daugiasluoksnės grunto konstrukcijos deformuoto būvio skaičiuojamoji schema ir deformacijų sklaidimo zonos

ния исходных параметров: нагружения, геометрических и физико-механических для получения адекватной дискретной модели в плоской постановке задачи плоской деформации.

Учитывая параметры эквивалентного сечения покрытия, искусственного основания, и грунтового многослойного полупространства, построена расчетная

схема для рассмотренной задачи с учетом плоскости симметрии, которая проходит через центральную ось эквивалентного колесного отпечатка (рис. 2). Размеры расчетного фрагмента полупространства таковы: ширина – 300 см, глубина – 674 см, толщина – 1 см, а размеры сеточной области расчетной схемы были  $2 \times 19 \times 23$ , что соответствует 396 конечным элементам (КЭ), ко-

личеству узлов КЭ – 874 и количеству разрешающих уравнений 2622. Также были приняты соответствующие граничные условия расчетного фрагмента и внешние условия в виде полосового нагружения.

Результаты исследования напряженно-деформированного состояния рассмотренного полупространства конструкции покрытия нежесткого типа во взаимодействии с искусственной и грунтовой основой на глубину 6,74 м были представлены в виде зон распространения пластических (сдвиговых) деформаций; таблиц значений перемещений и внутренних усилий в характерных сечениях (по плоскости симметрии и ограничивающей верхней ности полупространства) от дополнительной внешней нагрузки; а также в виде графиков-эпюр перемещений, изолиний сжимающих напряжений (изобар) и изолиний напряжений сдвигов (распор).

На рис. 2 также представлены области (набор конечных элементов), в которых имеют место только упругие и упруго-пластические деформации. Деформации сдвигов незначительной величины (около  $2,6 \cdot 10^{-4} \div 6,3 \cdot 10^{-4}$ ) наблюдаются в песчаном слое практически при нулевом удельном сцеплении  $c = 0,02$  кгс/м<sup>2</sup>. В нижнем слое (песчаная глина, серо-зеленая) при  $c = 0,42$  кгс/см<sup>2</sup> пластические деформации не наблюдаются. Пластические деформации в слоях облегченного покрытия и искусственного основания носят характер начального критического состояния, о чем свидетельствуют и их значения:  $1,8 \cdot 10^{-3} \div 1,5 \cdot 10^{-6}$ , уменьшение происходит по направлению  $Z_2$  – расширение области сдвига от плоскости симметрии к боковой границе полупространства.

Сравнение результатов численных исследований в характерных сечениях при расчете с учетом развития пластических деформаций и без учета последних показало небольшую разницу по максимальным перемещениям – около 11%, а по максимальным напряжениям – около 8%, при этом с учетом пластических деформаций наблюдается некоторая концентрация в КЭ, которые примыкают к поверхности нагружения.

Характер распределения напряжений свидетельствует о неоднородности грунтового многослойного массива, однако общий характер изолиний, полученных в рассмотренной задаче, соответствует известным классическим примерам (Цытович, Тер-Мартirosян 1981).

Для использования формул инженерного расчета по деформациям, принятым в нормативных документах, предложено уточнить формулы определения абсолютных прогибов, введя уточненный коэффициент условий работы нежесткого покрытия с учетом некоторых дефор-

маций сдвига в предельном состоянии таким образом, чтобы нежесткое покрытие в предельном состоянии по показателям относительного прогиба удовлетворяло нормативным требованиям.

## Выводы

Анализ полученных результатов исследований равновесного предельного состояния многослойного грунтового полупространства при его взаимодействии с ограждающими и защитными сооружениями при строительстве запроектированных зданий в прилегающих городских или промышленных зонах, близко размещенных существующих зданий и сооружений позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработанные новые соотношения модели уравнений состояния грунтов при учете влияния поперечной анизотропии и неоднородности гибких многослойных систем на основе нелинейной теории упругости и пластичности с учетом критерия текучести на основе расширенного критерия текучести Мизеса позволяют получить достаточно достоверный характер взаимодействия грунтов с заглубленными конструкциями и уточнить величину внутренних усилий в элементах ограждающих и защитных конструкций при наличии стабилизирующих элементов, вспомогательных экранов и других жестких включений в грунтовое пространство.
2. Разработанные специальные алгоритмы, построенные на методах нелинейного программирования, нелинейной теории упругости и пластичности, соотношениях нелинейной механики грунтов, позволяют построить расчетные модели, достаточно адекватные реальным физическим процессам взаимодействия плит покрытий, грунтовых насыпей, уклонов, массивов с ограждающими комбинированными конструкциями, которые допускают кинематическую подвижность – большие перемещения и большие углы поворота.
3. Численная реализация соотношений и алгоритмов нелинейного деформирования позволяет решать задачи оптимального проектирования конструкций, находящихся во взаимодействии с грунтовыми массивами, по обобщенным параметрам проектирования: толщине, глубине погружения в полупространство, жесткости стабилизирующих элементов и другим.
4. Разработанная методология обеспечивает уточненный расчет элементов конструкций, находящихся

ся во взаимодействии с грунтовыми массивами, огражденных глубоких котлованов, подпорных стенок в условиях активного и пассивного давления грунтов, реализации эволюционных технологий внешнего влияния на грунтовое полупространство, насыпных дамб и транспортных земляных полотен с учетом их многослойного армирования, а также сооружений каналов для определения устойчивости дна в условиях развития предельных пластических деформаций.

5. С целью уточнения амплитуд сплайновой функции коэффициента постели разработаны адекватные модели упругого полупространства с описанием многослойных включений с реальными физико-механическими характеристиками грунтов на основе инженерно-геологических разрезов.

Полученные результаты расчета на прочность конкретных примеров конструкций жесткого покрытия с использованием разных дискретных моделей и типов грунтовых оснований свидетельствуют об универсальности предложенной методики исследования НДС тонких плит на упругой неоднородной основе, что в перспективе позволит учитывать адекватность влияния сквозных швов и стыковых соединений плит на распределение внутренних усилий, концентрацию нормальных и сдвиговых напряжений в плите, произвольную схему влияний колесных нагрузок для любого типа воздушного судна и других.

## Литература

- Баженов, В. А.; Цихановський, В. К.; Кислоокій, В. М. 2000. *Метод скінченних елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонок*. Киев: КНУБА. 386 с.
- Прусов, Д. Е.; Хріптулова, О. В. 2008. Проблеми уточнених методів розрахунку конструкцій укріплень ґрунтових масивів, огорожі котлованів та їх вплив на оточуючу забудову при наявності слабких прошарків ґрунтів, *Будівництво України* 1: 34–36.
- Прусов, Д. Е. 2009. Аналіз рівнянь рівноваги дискретної розрахункової моделі ґрунтового півпростору, *Вісник НАУ* 3: 125–130.
- Цихановський, В. К.; Прусов, Д. Е. 2004. Метод скінченних елементів у задачах дослідження неоднорідного півпростору з урахуванням геометричної і фізичної нелінійності, в Сб. *Опір матеріалів і теорія споруд*, 87–98.
- Цихановський, В. К.; Прусов, Д. Е. 2009. Метод скінченних елементів в задачах рівноваги півпростору при взаємодії ґрунтового масиву з огорожуючими конструкціями, *Промислове будівництво та інженерні споруди* 4: 38–44.

Цытович, Н. А.; Тер-Мартirosян, З. Г. 1981. *Основы прикладной геомеханики в строительстве*. Москва: Высшая школа. 317с.

Шимановский, А. В.; Цыхановский, В. К. 2005. *Теория и расчет сильно нелинейных конструкций*. Киев: Сталь. 432 с.

## THE DEPENDING OF EMBEDDED STRUCTURES STATE OF AIRPORTS OBJECTS IN TERMS OF THE BOUNDARY EQUILIBRIUM STATE OF SOIL SEMISPACE

D. Prusov, A. Beljatynskij

Abstract

The basis of the research methodology of the stress-strain state of underground facilities and defense airports and airfields structures are considered in complex difficult geological conditions.

**Keywords:** airports, airfields, underground objects, the stress-strain state.

## ORO UOSTOSE ESANČIŲ ĮGILINTŲ KONSTRUKCIJŲ ELEMENTŲ DEFORMUOTAS BŪVIS VERTINANT SAŲVEIKĄ SU GRUNTU

D. Prusov, A. Beljatynskij

Santrauka

Pateikiama ir analizuojama metodologija, kuria remiantis galima tirti konstrukcijų elementus, sąveikaujančius su gruntu. Kaip žinoma, oro uostose statiniai statomi naudojant įvairaus gylio pamatus. Priklausomai nuo konstrukcijos pamato įgilinimo keičiasi jo deformuotas būvis.

**Reikšminiai žodžiai:** oro uostas, aerodromas, įgilinti objektai, pamatai, įtemptis, deformuotas būvis.