

Научно-исследовательский институт строительных  
конструкции (НИИСК)

На правах рукописи

Приходченко Олег Евгеньевич



УДК 624.131.5: 624.15

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
ЛЕССОВЫХ ОСНОВАНИЙ В ПРОЦЕССЕ ВЛАГОПЕРЕНОСА

05.23.02 - Основания и фундаменты

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

К и е в - 1995



62497  
Диссертация в рукописи.

Работа выполнена в Ростовской-на-Дону государственной академии строительства.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор БОЙКО ИГОРЬ ПЕТРОВИЧ

доктор технических наук ЗАГОРУЙКО ЛЕОНИД ПАВЛОВИЧ

доктор геолого-минералогических наук, профессор КРАЕВ

ВАСИЛИЯ ФЕДОРОВИЧ

Ведущая организация - КиевЗНИИЭП

Защита состоится " 19 " XII 1995г. в 13<sup>30</sup> часов на заседании специализированного совета Д 01.14.01 научно-исследовательского института строительных конструкций по адресу 252180, Киев, 37, ул.Ивана Клименко, 5/2, факс /044/ 276-62-69, актовЫЙ зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатями, просим присылать по адресу: 252180, Киев, 37, ул.Ивана Клименко, 5/2, НИИСК, ученому секретарю совета.

Автореферат разослан " 10 " XI 1995 г.

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
кандидат технических наук

Н.Г.Марьенков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Лессовые породы широко распространены на территории России, Украины и других стран СНГ. В этих районах ведется интенсивное строительство объектов различного назначения. Основная особенность лессовых грунтов - проявление просадочных, зачастую неравномерных, деформаций за счет разрушения их структуры при замачивании под нагрузкой. В результате сотни зданий и сооружений получают недопустимые по условиям эксплуатации деформации и нередко приходят в аварийное состояние. Это в большой степени обусловлено отсутствием расчетных моделей, позволяющих получать достоверные, близкие к фактическим значения деформаций. Основным содержанием работы является разработка новых расчетных моделей, в той или иной мере достаточно полно отражающих физическую суть просадочного процесса - феноменологических моделей влагопластичности, влагоползучести и влагоупругости. Реализация этих моделей позволяет осуществить надежный прогноз деформаций лессовых оснований различных объектов и, как следствие, повысить их эксплуатационную надежность, что решает проблему рационального инженерного освоения и использования территорий, представленных грунтами лессового ряда.

Кроме широкого применения в проектной практике, разработанные методы и алгоритмы расчета лессовых сред под воздействием зданий и сооружений представляют определенный интерес с точки зрения дальнейшего развития механики лессовых грунтов.

Целью диссертационной работы является совершенствование методов расчета лессовых оснований по второй группе предельных состояний - по деформациям на

основе построения в рамках детерминированного подхода новых механико-математических моделей, достаточно достоверно отражающих суть просадочного процесса, использование которых в проектной практике позволит обеспечить эксплуатационную надежность зданий и сооружений и резко снизит затраты на преобразование грунтов основания и усиление надземных конструкций.

В соответствии с целевым назначением работы в ней поставлены и решены следующие задачи:

- обоснование несовершенства традиционных методов расчета и необходимости дифференцированного подхода к количественной оценке просадочных деформаций с использованием предлагаемых расчетных моделей на основе обобщения обширного материала по инженерной геологии лессовых пород, как геологической среды для строительства;

- постановка и решение ряда нелинейных начально-краевых задач влагопереноса в ненасыщенно-насыщенной зоне аэрации неоднородных, фильтрационно-анизотропных лессовых толщ с учетом движения гравитационной, капиллярной и рыхлосвязной влаги;

- разработка принципов, теории и методов расчета оснований, представленных лессовыми грунтами, склонными к значительным просадкам, с использованием модели влагопластичности;

- численное моделирование начально-краевых задач влагопластичности в различных условиях загрузки и замачивания лессовых оснований;

- разработка принципов, теории и методов расчета оснований, представленных непросадочными или малопросадочными лессовидными грунтами с использованием связной и несвязной моделей влагоупругости;

- аналитическое и численное исследование трансформации

напряженно-деформированного состояния лессовых оснований в процессе влагопереноса в различных условиях загрузки с использованием моделей влагуупругости;

- формулировка принципов и разработка теории определения деформаций лессовых оснований в рамках реологической модели влагоползучести;

- проведение крупномасштабных полевых экспериментов и сопоставление их результатов с результатами математического моделирования;

- внедрение основных результатов работы в практику проектирования фундаментов зданий и сооружений на лессовых грунтах.

Методика исследований включает:

- анализ литературных источников по вопросам генезиса и постгенетических изменений лессовых грунтов, их состава, структурно-текстурных особенностей и физико-механических свойств, природы и сущности просадочного процесса;

- анализ результатов экспериментально-теоретических исследований напряженно-деформированного состояния оснований, представленных грунтами лессового ряда;

- постановку и решение ряда начально-краевых задач влагуупругости и влагуупругости в различных условиях нагружения и замачивания лессовых оснований;

- численное моделирование с использованием МКР и МКЭ ряда важных в практическом отношении задач и исследование влияния различных факторов на трансформацию напряженно-деформированного состояния лессовых оснований;

- экспериментальное исследование взаимодействия ленточных фундаментов и закрепленных массивов с лессовым основанием в различных условиях замачивания и сопоставление его резуль-

татов с теоретическими.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые сформулированы и разработаны основы достоверного прогноза напряженно-деформированного состояния оснований зданий и сооружений, представленных лессовыми грунтами, в различных условиях их загрузки и замачивания с использованием расчетных моделей влагопластичности, влагоползучести и влагоупругости, что является новым направлением в решении проблемы расчета лессовых оснований по второй группе предельных состояний. Модель влагопластичности учитывает взаимодействие непрерывных нестационарных полей влажности и нелинейных упруго-пластических деформаций, модель влагоползучести - ползучесть грунта в процессе влагопереноса, модель влагоупругости - взаимодействие полей влажности и линейных деформаций. Область использования первых двух - количественная оценка деформация оснований, представленных собственно лессовыми грунтами, третьей - расчет деформаций оснований, сложенных лессовидными породами.

Поставлен и решен ряд задач двумерного, осесимметричного и одномерного влагопереноса в ненасыщенно-насыщенных неоднородных фильтрационно-анизотропных лессовых толщах с учетом нелинейной зависимости всасывающего давления от влажности. По результатам численного моделирования проанализировано влияние размеров источников замачивания, природной влажности, пористости, наличия подземных вод и погребенных почвенных горизонтов, водопроницаемости подстилающих слоев на распространение влаги в грунте в процессе замачивания из различных источников.

Разработаны теория и методы решения начально-краевых задач влагопластичности. При этом лессовый грунт рассматривается как дисперсная квазидвухфазная упруго-пластическая дилатиру-

ющая среда, механические характеристики которой являются функциями влажности. При разработке модели использован один из вариантов теории течения с изотропным упрочнением. Показано, что дилатансионный эффект можно правильным образом учесть при отказе от условия взаимности для пластических потенциалов. С использованием разработанных алгоритмов и соответствующих программ исследовано влияние на напряженно-деформированное состояние лессовых оснований в условиях одномерного уплотнения и плоской деформации характера источников замачивания, в том числе уровня подземных вод.

Реализация связанных начально-краевых задач влагоупругости позволила получить формулы для определения времени и скорости продвижения фронта увлажнения в деформирующейся при просадке лессовой толще, суммарной просадки, как функции от времени.

Несвязная модель влагоупругости использована при решении ряда практически важных задач о взаимодействии нагрузок, фундаментов и закрепленных массивов с лессовым основанием при замачивании с поверхности и при подъеме уровня подземных вод.

Поставлена и аналитически решена задача о распределении напряжений и перемещений в двухслойном лессовом основании при действии в одном из слоев сосредоточенных сил.

Получено аналитическое решение задачи влагоползучести о распределении напряжений и перемещений в слоистой квазидвухфазной весомой лессовой толще с учетом объемных фильтрационных сил и ползучести грунта в процессе влагопереноса.

Установлено, что результаты крупномасштабных экспериментов по исследованию напряженно-деформированного состояния лессовых оснований в процессе их увлажнения во взаимодействии с ленточными традиционными и пластинчатыми фундаментами, закрепленными массивами хорошо согласуются с результатами решения

соответствующих задач влагопластичности и влагуупругости.

Практическая ценность работы определяется широким кругом практических приложений рассмотренных задач, наличием программного комплекса, реализующего разработанные модели для надежного прогноза деформаций лессовых оснований в разнообразных условиях загрузки и замачивания в целях последующего назначения эффективного комплекса мероприятий при инженерном освоении и использовании территорий распространения лессовых пород.

Реализация работы. Материалы исследований включены в ряд нормативных документов государственного, регионального и ведомственного уровней. К ним относятся:

- Временные технические условия по проектированию оснований и фундаментов общественных и жилых зданий на просадочных грунтах в г.Волгодонске. -М.: Госстрой РСФСР, 1980.

- Рекомендации по проектированию закреплённых силикатизацией массивов в лессовых просадочных грунтах. -М.: Госстрой СССР, 1980.

- Рекомендации по усилению железобетонных конструкций зданий и сооружений реконструируемых предприятий. Часть 3. Основания. -Харьков: Харьковский ПромстройНИИпроект, 1985.

Реализация работы осуществлена при освоении новых, а также при использовании уже застроенных территорий распространения лессовых грунтов для обеспечения общей устойчивости и эксплуатационной пригодности инженерных объектов различного назначения в гг. Ростове-на-Дону, Волгодонске, Таганроге, Азове и других городах и населённых пунктах Ростовской области, Краснодарского и Ставропольского краёв.

Результаты исследований по теме внедрены в учебный процесс при чтении общих и специальных курсов в Ростовской-

на-Дону государственной академии строительства, руководстве научно-исследовательской работой аспирантов, соискателей и студентов, выполнении реальных дипломных проектов, написании учебных пособий и методических указаний.

**А п р о б а ц и я р а б о т ы.** Основные положения диссертационной работы доложены на ряде научных и научно-практических семинаров, совещаний и конференций, в том числе Всесоюзных и республиканских (Москва - 1966, 1973, 1978, 1983, 1989; Санкт-Петербург - 1993; Свердловск - 1981; Киев - 1977, 1978; Запорожье - 1978, 1987; Барнаул - 1980, 1990; Ташкент - 1978; Ростов-на-Дону - 1966-1995).

Содержание диссертации в целом явилось предметом рассмотрения на заседаниях кафедр инженерной геологии, оснований и фундаментов Ростовской-на-Дону государственной академии строительства (Ростов-на-Дону - 1995) систем автоматизированного проектирования объектов строительства и фундаментостроения Новочеркасского государственного технического университета (Новочеркасск - 1995), на заседании секции оснований и фундаментов научно-технического совета института Ростовский ПромстройНИИпроект "(Ростов-на-Дону, 1995), на совместном семинаре отдела исследований конструкций зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях научно-исследовательского института строительных конструкций и кафедры оснований и фундаментов Киевского государственного технического университета строительства и архитектуры (Киев - 1995).

**И с х о д н ы е м а т е р и а л ы и л и ч н ы й в к л а д в р е ш е н и е п р о б л е м ы.** Диссертация базируется на результатах многолетних исследований под руководством и при непосредственном участии автора в проблем-

ной лаборатории оснований Ростовской-на-Дону государственной академии строительства по теме: "Исследование инженерно-геологических свойств лессовых грунтов и методов возведения фундаментов на них" (номер государственной регистрации ОI87004392) общесоюзной научно-технической программы, утвержденной ГКНТ СССР.

При подготовке диссертации автор пользовался советами и консультациями профессоров, докторов технических наук Клепикова С.Н., Василькова Г.В. профессоров, докторов геолого-минералогических наук Ананьева В.П., Воляника Н.В., за что выражает им свою признательность.

Автор благодарит сотрудников кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов, проблемной лаборатории оснований Ростовской-на-Дону государственной академии строительства за оказанную помощь в проведении полевых и лабораторных экспериментов.

**Ст р у к т у р а и о б ъ е м д и с с е р т а ц и и.**  
Диссертационная работа состоит из введения, 7 разделов, заключения, списка литературы, включающего 260 наименований.

Объем диссертации 347 страниц, из них 223 страницы машинописного текста, 128 рисунков, 20 таблиц, 19 библиографии.

**Н а з а щ и т у в ы н о с я т с я:**

- дифференцированный подход к количественной оценке деформаций грунтов лессового ряда;

- результаты численного моделирования процесса влагопереноса в неоднородных, фильтрационно-анизотропных лессовых толщах;

- постановка и решение начально-краевой задачи влагопластичности, результаты численного моделирования просадочного процесса с использованием модели влагопластичности;

- постановка и решение начально-краевых задач влагоупругости;

- результаты решения связанных задач влагоупругости о деформациях лессового основания при действии полосообразной нагрузки в общем случае изменения влажностного режима за счет инфильтрации воды из поверхностных источников и подъема уровня подземных вод при подтоплении;

- результаты решения несвязных задач влагоупругости о напряженно-деформированном состоянии весоных двухслойных и квазидвухслойных лессовых оснований при действии на их поверхности равномерно распределенной нагрузки, при действии в одном из слоев сосредоточенных сил, при взаимодействии с основанием ленточного закрепленного массива;

- постановка и решение задачи о распределении напряжений и перемещений в слоистой квазидвухслойной весоной грунтовой среде с учетом объемных сил и ползучести грунта в процессе влагопереноса;

- прогрессивная конструкция пластинчатого фундамента и результаты решения несвязной задачи влагоупругости о взаимодействии его с лессовым основанием в процессе одномерного и несимметричного двумерного увлажнения;

- результаты крупномасштабных полевых экспериментов по определению напряженно-деформированного состояния лессовых оснований под ленточными традиционными фундаментами и пластинчатыми, закрепленными массивами в процессе подъема уровня подземных вод и при замачивании с поверхности;

- результаты внедрения исследований в практику проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений на лессовых грунтах.

СО Д Е Р Ж А Н И Е   Р А Б О Т Ы .

Во введении очерчен круг проблем, рассматриваемых в диссертации, обоснована актуальность работы, ее цель и решаемые задачи, научная новизна и практическая значимость. В первом разделе диссертации лессовые грунты рассматриваются как геологическая среда для строительства. Особое внимание уделяется их структурным особенностям, которые при увлажнении рассматриваемых грунтов определяют долю пластических деформаций в процессе загрузки. Приводится критический анализ существующих моделей количественной оценки просадочного процесса. Показано, что собственно лессовые грунты должны рассматриваться как упругопластические тела, а деформации лессовидных пород могут определяться с использованием расчетных моделей линейно-деформируемых тел. Исследования, приведенные в разделе 2, посвящены особенностям влагопереноса при замачивании из различных источников в неоднородных, фильтрационно-анизотропных лессовых толщах. Здесь приводится постановка задачи и результаты численного анализа влияния параметров модели на трансформацию полей влажности в процессе влагопереноса. В третьем разделе рассматриваются принципы, теория и параметры модели влагопластичности, областью применения которой является определение напряженно-деформированного состояния оснований, представленных собственно лессовыми грунтами. Раздел 4 содержит результаты численного моделирования просадочного процесса с использованием расчетной модели влагопластичности. Здесь исследуется напряженно-деформированное состояние лессовой толщи при ее одномерном замачивании с поверхности и лессового основания над заглубленным ленточным фундаментом в условиях несимметричного увлажнения из глубокого линейного источника. Анализируется влияние условий на нижней границе

зоны аэрации лессовых толщ. В пятом разделе приводится постановка и решение начально-краевых задач влагоупругости и влагополюзучести. Рассмотрена связанная задача влагоупругости о деформациях лессового основания при действии на его поверхности полосообразной нагрузки в общем случае изменения влажностного режима в зоне аэрации. Раздел 6 посвящен решению ряда важных в практическом отношении несвязанных задач влагоупругости о взаимодействии нагрузок, фундаментов и закрепленных массивов с лессовым основанием, неоднородность которого по деформационным характеристикам обусловлена замачиванием из различных поверхностных и глубинных источников. Результаты экспериментальных исследований влагопереноса и напряженно-деформированного состояния лессовых оснований и их сопоставление с результатами численного моделирования приведены в седьмом разделе.

#### 1. ЛЕССОВЫЕ ГРУНТЫ КАК СТРУКТУРНО-НЕУСТОЙЧИВЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОСАДОЧНОГО ПРОЦЕССА

Литологические виды грунтов лессового ряда - лессовые и лессовидные обладают признаками, сформулированными И.В.Поповым и Е.М.Сергеевым. К лессовым грунтам относят породы, содержащие в своем составе 50 и более процентов пылеватой фракции 50-2 мкм и обладающие склонностью к проявлению просадочных деформаций. Лессовидные грунты - грунты лессового облика, с содержанием фракции 50-2 мкм менее 50 %, мало или практически непросадочные.

Вопросами генезиса, постгенетических изменений лессовых грунтов, их распространения, состава, структурно-текстурных особенностей, свойств с позиции инженерной геологии занимались Ф.Рихтгофен, И.В.Мухометов, В.А.Обручев, П.А.Тутковский, А.И.Москвитин, И.И.Трофимов., И.Д.Седлецкий, Н.И.Кригер,

В.В.Докучаев, А.П.Павлов, П.А.Кропоткин, Б.П.Булавин, И.Л.Соловьевский, М.М.Жуков, Н.А.Димо, С.А.Захаров, С.С. Неустроев, Л.С.Берг, Т.С.Кавеля, А.К.Ларионов, З.И.Тихонова, В.М.Алексеева, Г.А.Липсон, В.П.Аванъев, Н.В.Воляник, Л.Г.Балаев, П.В.Карев, И.М.Горькова, П.А.Ребиндер, Б.Ф.Галай, Г.А. Мавлянов, В.А.Приклонский, Ю.М.Абелев, М.Ю.Абелев, А.А.Мустафаев, С.К.Алиев, В.Ф.Краев, Я.Д.Гильман, М.Н.Гольдштейн, С.С. Савватеев, Г.Стефанов, Н.Я.Денисов, Ф.П.Саваренский, Б.Б.Полынов, Е.А.Замарин, А.Л.Рубинштейн, В.Н.Голубков, А.М.Дранников, В.И.Крутов, В.Б.Швец, Г.М.Ломизе, Р.С.Зиангиров, А.М.Рыжов и др.

Всеобъемлющая характеристика лессовых пород содержится в двухтомной монографии "Лессовые породы СССР", выпущенной в 1986г. под редакцией авторского коллектива, возглавленного акад. Е.М.Сергеевым, которая явилась важным этапом на пути углубленного и всестороннего изучения лессовых грунтов.

Исходя из направленности работы автор уделил особое внимание структурным особенностям лессовых грунтов, т.е. размерам, форме и характеру поверхности слагающих структурных элементов, количественному соотношению твердой, жидкой и газообразной составляющих грунта и характеру взаимосвязи их друг с другом. Показано, что структура лессовых грунтов во многом определяет развитие пластических деформаций при нагружении. Так лессовые грунты зернисто-пленчатой, пылевато-пленчатой структуры с коагуляционными и кристаллизационно-водорастворимыми связями проявляют значительную склонность к развитию пластических деформаций под нагрузкой при замачивании. Основания, представленные лессовидными грунтами с зернисто-агрегативной и агрегативной структуры с кристаллизационно-водонерастворимыми и коагуляционно-кристаллизационными связями в силу малой доли пластической деформаций при обычно действующих

нагрузках могут рассматриваться как линейно-деформируемые тела.

Особое внимание в разделе уделено просадочности как специфическому свойству лессовых грунтов, сути просадочного процесса и существующим расчетным моделям определения просадки. Рассмотрены различные гипотезы, объясняющие природу просадочности и механизм просадочных деформаций - доуплотнения рыхло-сложенного грунта при потере им связности при замачивании (Б.И.Михеев, С.Н.Максимов, Н.Е.Денисов, Б.А.Замарин и др.), при растворении и выносе солей, являющихся структурным элементом (Б.Б.Польнов, Ф.И.Воронов, С.В. Быстров, Г.И.Архангельский и др.), при коагуляции или ионизации частиц и агрегатов, составляющих скелет грунта. Перечислены внутренние и внешние факторы, при взаимодействии которых возникает просадка.

Большой вклад в решение проблемы количественного описания просадочного процесса внесли Ю.М.Абелев, М.Ю.Абелев, Н.Я.Денисов, Л.Г.Балаев, А.М.Дранников, А.Л.Рубинштейн, Н.А.Цытович, Г.М.Ломизе, А.А.Григорян, В.И.Крутов, А.А.Мустафаев, С.Н.Клепиков, А.П.Пшеничкин, Ю.Н.Мурзенко, З.Г.Тер-Мартиросян, Я.Д.Гильман, Е.А.Сорочан, К.Ш.Шадунц, В.С.Аникин, А.В.Крайванов, Г.В.Васильков и др.

Существующие методы расчета деформаций грунтовых оснований можно разделить на две укрупненные группы: методы, основанные на использовании теории сплошных однородных и неоднородных линейно-деформируемых тел и нелинейные методы, использующие соотношения теории упруго-пластических сред. СНиП 2.02.01-83 регламентирует определение просадочных деформаций с использованием расчетной схемы основания в виде линейно-деформируемого полупространства, что не отражает сущности деформирования оснований, представленных собственно лессовыми

грунтами. Неадекватность методики СНиП физической сущности просадочного процесса и, как следствие, резкое в ряде случаев отличие расчетных значений деформаций от фактических (в 1.2...3 раза) корректируется путем введения ряда эмпирических коэффициентов. К другим недостаткам методики СНиП 2.02.01-83 следует отнести: определение вертикальных перемещений в условиях одномерной задачи только от вертикальных нормальных напряжений по оси, проходящей через центр подошвы фундамента, т.е. неучет горизонтальных нормальных напряжений; ограничение давления по подошве расчетным сопротивлением просадочного грунта, само понятие которого предполагает нормируемое развитие зон пластических деформаций в упругопластической среде, которой в целом является лессовое основание; невозможность учета внутреннего трения, как функции от влажности во всем диапазоне изменения нагрузок.

Я.Д.Гильман, Э.М.Садэтова, В.В.Логутин, В.П.Резников и др. при оценке напряженно-деформированного состояния лессовых просадочных толщ использовали расчетную модель двухслойной изотропной линейно-деформируемой среды. Температурно-влажностная аналогия для описания напряженно-деформированного состояния лессовых линейно-деформируемых массивов была использована Э.Г.Тер-Мартirosяном и А.Г.Мирзаевым. Рассмотрению лессовых толщ как линейно-деформируемых, неоднородность которых обусловлена замачиванием, посвящены исследования А.А.Мустафаева, Г.Л.Браиловского, В.М.Азархина, Ш.М.Шлафмана, С.Н.Клепикова И.В.Матвеева, Н.Г.Мирзаева и др. Автором такие задачи названы несвязными задачами влагоупругости. Термин "влагоупругость" в полной мере можно использовать применительно к решению широкого класса задач консолидации, например, деформации лессовой толщи в зонах водонасыщения с учетом объемных сил

могут быть описаны в рамках теории консолидации В.А.Флорина-М. Био.

Теоретическое и экспериментальное развитие нелинейных моделей грунта нашло отражение в работах М.Ю.Абелева, М.Арнольда, А.И.Боткина, А.К.Бугрова, А.Бишоп, Е.Ф.Винокурова, С.С.Вялова, Г.А.Гениева, М.Н.Гольдштейна, Б.И.Дидука, В.А.Иосилевича, А.Л.Крыжановского, В.Кирпатрика, Г.Лемба, Н.В.Мальшева, Г.Н.Ломизе, С.К.Месчана, Л.Н.Рассказова, К.Роско, А.С.Строганова, З.Г.Тер-Мартirosяна, А.Б.Фадеева, В.Г.Федоровского, В.И.Соломина, В.Н.Широкова, С.Б.Ухова, и др.

С.Н.Клепиковым, А.С.Трегубом, И.В.Матвеевым рассмотрены особенности определения деформации лессовых массивов при их замачивании с использованием расчетной схемы просадочной толщи в виде неоднородного нелинейно-деформируемого слоя. Вопросы взаимодействия свайных фундаментов с лессовым основанием в нелинейной постановке посвящены обширные исследования И.П.Бойко.

А.А.Мустафаев, внесший большой вклад в развитие механики лессовых грунтов, подчеркивает, что просадочный процесс определяется взаимодействием неустановившихся непрерывных полей влажности и упруговязкопластических деформаций. Ю.Н.Мурзенко также указывает на необходимость учета упруго-пластических деформаций лессовых оснований. Отличие пластического деформирования грунтов от конструкционных материалов четко сформулированы Ю.К.Зарецким, С.С.Вяловым, А.К.Бугровым. В грунтах деформация формы является преимущественно пластической и зависит не только от девиатора, но и в значительной степени от гидростатической части тензора напряжений, от пути нагружения и вида напряженного состояния, т.е.

$$\epsilon_i = \epsilon_i(\sigma_o, \sigma_i, \mu \sigma),$$

ЛНБ ім. В. Стефанюк (І)  
АН України

Объемная деформация грунта в большей своей части является пластической и зависит не только от шарового тензора напряжений, но и весьма существенно от девиатора напряжений и в некоторой степени от вида напряженного состояния и траектории нагружения, т.е.

$$\epsilon_0 = \epsilon_0(\sigma_0, \sigma_i, \mu_\sigma), \quad (2)$$

Для лессовых просадочных грунтов, деформационные характеристики которых изменяются при увлажнении, зависимости (1), (2) очевидно должны быть записаны в виде

$$\epsilon_i = \epsilon_i(\sigma_0, \sigma_i, \mu_\sigma, w), \quad (3)$$

$$\epsilon_0 = \epsilon_0(\sigma_0, \sigma_i, \mu_\sigma, w). \quad (4)$$

Характер инвариантных зависимостей (3), (4) для различных литологических типов лессовых грунтов экспериментально изучался Г.М.Ломизе, А.Л.Крыжановским, Г.Н.Кравцовым, В.А.Пустогачевым, М.М.Ханкельдиевым, В.Г.Столяровым, А.В.Крайвановым и др. Определяющие уровнения, отражающие индивидуальные свойства грунта, в рамках теории течения упрочняющейся пластической среды, выгодно отличающейся от деформационной теории пластичности, сформулированы Ю.К.Зарецким, Г.В.Васильковым и др.

Реализация нелинейных задач обычно осуществляется с использованием метода конечных элементов. Этот метод дискретного анализа получил развитие в трудах А.В.Вейнбегра, Л.А.Розина, В.А.Постнова, А.А.Сахарова, Н.Н.Шапошникова, Г.В.Василькова, Д.Одена, О.Зенкевича, К.Бейе, Е.Вилсона, Л.Сегерлинда и др.

Из работ, посвященных решению задач влагопластичности следует отметить исследования К.Ш.Шадунца, В.С.Аникина, Г.В.Василькова, И.Ю.Дежиной.

Раздел завершается выводом о том, что проблема количественного описания деформаций лессовых оснований может быть ус-

пешно решена путем разработки расчетных моделей, достаточно достоверно отражающих сущность просадочного процесса. Кроме того, прогноз напряженно-деформированного состояния различных литологических типов лессовых грунтов должен осуществляться дифференцированно: собственно лессовых грунтов с использованием нелинейных моделей влагопластичности и влагоползучести, лессовидных - моделей влагоупругости.

## 2. ВЛАГОПЕРЕНОС В ЗОНЕ АЭРАЦИИ ЛЕССОВОЙ ТОЛЩИ

В основу рассматриваемых моделей положен учет взаимодействия двух непрерывных полей - влажности и деформаций. В этом контексте важное значение приобретает установление закономерности влагопереноса в ненасыщенно-насыщенной грунтовой среде. Эти закономерности изучались в трудах А.В.Лькова, А.А.Родэ, У.Г.Гарднера, А.Н.Костякова, Б.В.Дерягина, В.Ф.Будаговского, Н.Ф.Бефани, В.В.Ведерникова, П.Я.Полубариновой-Кочиной, Н.Н.Веригина, С.Ф.Аверьянова, И.И. Калабуховой, А.А.Мусаева, А.Б.Ситникова, Н.Н.Муромцева, Л.Лукнера, В.М. Шестакова, Э.Букингема, У.Гарднера, И.Чайлдса, Дж.Р.Филипа, П.Бродбриджа, И.Уайта и др. Процесс влагопереноса в лессовых грунтах с учетом их просадки рассмотрен в работах А.А.Мустафаева, Л.М.Певзнера, Г.Л.Браиловского и др. Большинство исследователей предполагали, что грунтовая толща является однородной и фильтрационно-изотропной. Однако, на практике лессовая толща включает в себя один или несколько погребенных слоев, мелиорирована путем устройства уплотненных экранов. Это обуславливает существенную фильтрационную неоднородность просадочного основания. Результаты экспериментальных исследований указывают на наличие порой ярко выраженной фильтрационной анизотропии. На распределение влажности в грунте в процессе замачивания

лессовых толщ существенное влияние оказывают природная влажность, наличие подземных вод и водопроницаемость подстилающих слоев. Это обусловило постановку и решение двумерной плоской, осесимметричной и одномерной задач влагопереноса в ненасыщенно-насыщенной, неоднородной, фильтрационно-анизотропной лессовой толще. В основу рассматриваемой модели влагопереноса положены следующие предположения:

- лессовый грунт является квазидвухфазным телом, состоящим из скелета и фиктивной жидкости с растворенным в ней воздухом;

- движение влаги в грунте подчиняется обобщенному закону Дарси-Герсеванова и условию неразрывности;

- передвижение влаги обусловлено действием термодинамического потенциала влаги, мерой которого является всасывающее давление, которое характеризует движение капиллярной и рыхлосвязанной воды; всасывающее давление нелинейно зависит от влажности;

- всасывающее давление, коэффициенты влагопроводности и диффузии являются заданными функциями водонасыщения.

Нелинейная начально-краевая задача влагопереноса в зоне аэрации лессовой толщи формулируется следующим образом

$$\begin{aligned}
 -B^T DBW - B^T kJ + \dot{W} &= 0, & \in V; \\
 -B_s^T DBW - B_s^T kJ - V_s &= 0, & \in S_1; \\
 W - W_s &= 0, & \in S_2; \\
 W - W_0 &= 0, & \in V; \quad S \text{ при } t = 0
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где  $\dot{W} = \frac{\partial W}{\partial t}$  - скорость изменения содержания влаги в элементарном объеме;

$\vec{V} = \left\{ V_{x_1} \quad V_{x_2} \quad V_{x_3} \right\}$  - вектор-функция скоростей движения влаги;

$B^T = \left\{ \frac{\partial}{\partial x_1} \quad \frac{\partial}{\partial x_2} \quad \frac{\partial}{\partial x_3} \right\}$  - матрица операции дифференцирования;

$B_n^T = \left\{ \cos \hat{n}_1 x_1 \quad \cos \hat{n}_1 x_2 \quad \cos \hat{n}_1 x_3 \right\}$  - матрица направля-

ющих косинусов внешней нормали границы  $S_1$ ;

$$V = -DBW - kJ, \quad J^T = \{001\};$$

$h = \frac{P}{\gamma_w} + x_3$  - напорная функция;

$D = K \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial p}{\partial W}$  - матричный коэффициент диффузии;

$K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & k_1 \end{bmatrix}$  - матричный коэффициент водопроницаемости.

Коэффициенты водопроницаемости и всасывающее давление, как функции влажности, определяются эмпирически, например, по С.Ф. Аверьянову.

$$K_i(W) = K_{\phi i} \left( \frac{W - W_0}{n - W_0} \right)^S, \quad S = 3,56, \quad (6)$$

где  $K_{\phi i}$  - коэффициент фильтрации,  $n$  - пористость грунта,  $W_0$  - количество связанной воды в единице объема грунта;

$$P = P_k(W) = \frac{P_0 W_0}{W} \frac{W_{sat}^3 - W^3}{W_{sat}^3 - W_0^3}, \quad (7)$$

где  $P_0$  - всасывающее давление в среде при влажности  $W_0$ ,  $W_{sat}$  - полная влагоемкость, соответствующая атмосферному давлению.

$-B_n^T DBW - B_n^T kJ - V_n = 0$ ,  $\in S_1$  - краевое условие, отражающее

тот физический факт, что скорость влагопереноса на границе  $S_1$  является заданной величиной (на водоупоре  $V_w = 0$ );

$W - W_w = 0$ ,  $\in S_2$  - краевое условие, соответствующее постоянному содержанию влаги на границе  $S_2$  (при наличии уровня подземных вод на  $S_2$   $W = W_{w,at}$ ).

$W - W_0 = 0$ ,  $\in V_1 S$  при  $t = 0$  - начальное условие, означающее что в некоторый начальный момент времени распределение влаги в грунтовой толще известно.

На произвольном временном отрезке система уравнений (5) линеаризуется. Для построения решения МКЭ используются вариационные уравнения в свертках. Разрешающее уравнение влагопереноса по методу конечных элементов представлено в виде  $g * (K_0^T q + sq + p) = 0$ , где  $g = t$ ,  $q = q(t)$  - вектор узловых значений влажности, компоненты которого являются функциями времени.

В результате численного моделирования установлено, что на распространение влаги в лессовой толще в процессе замачивания из различных источников существенное влияние оказывают природная влажность, пористость, наличие подземных вод и погребенных горизонтов, водопроницаемость подстилающих слоев. Фильтрационная анизотропия и неоднородность лессовых толщ сказывается на скорости распространения влаги и очертании полей влажности, формировании куполов подгопления и образовании верховодки на погребенном почвенном горизонте. Показано, что в случае одномерного замачивания усреднение значения коэффициента влагопроводности по глубине зоны аэрации приводит к снижению значений влажности. Проанализировано влияние толщины уплотненных экранов из условия их водонепроцаемости. Отдельные фрагменты результатов численного анализа проиллюстрированы на рис. I...4.

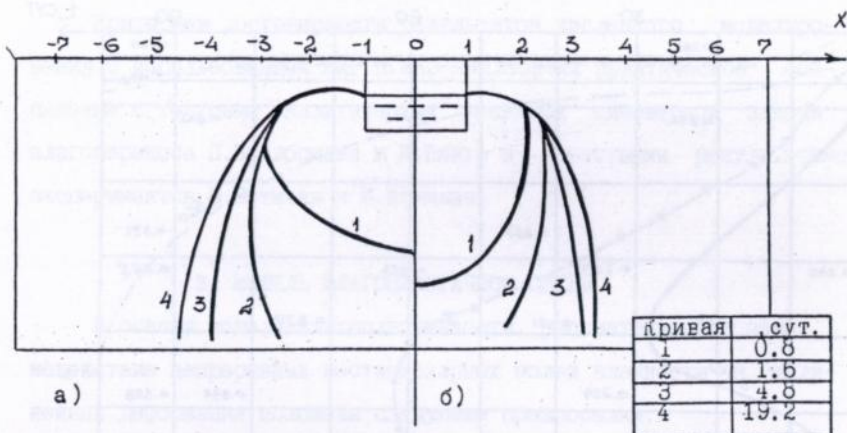


Рис. 1. Развитие зон водонасыщения для случаев неучета (а) и учета анизотропии (б).

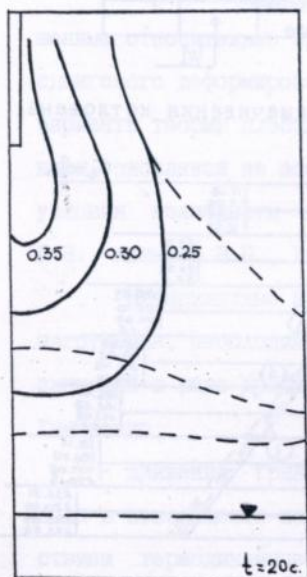


Рис. 2. Изолинии влажности при различных условиях на нижней границе лессовой толщи (--- наличие подземных вод, — их отсутствие).

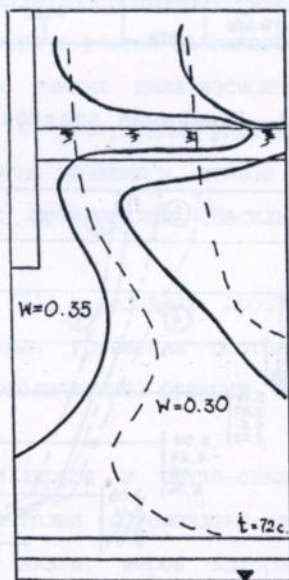


Рис. 3. Изолинии влажности для неоднородной (—) и однородной (---) лессовой толщи.

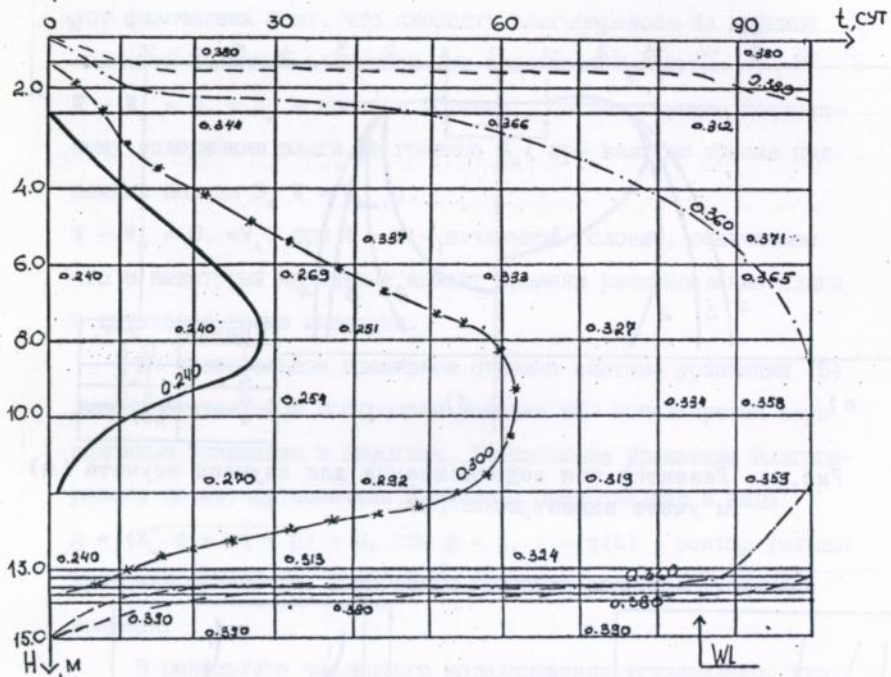


Рис. 4. Изменение влажности в процессе замачивания котлована.

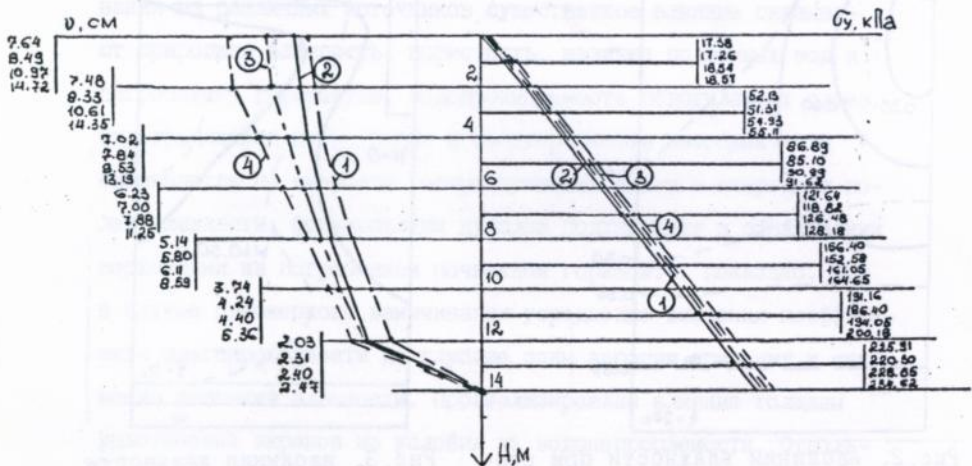


Рис. 5. Перемещения  $V$  и напряжения  $\sigma_y$  до начала замачивания котлована и в его процессе (1, 2 - соответственно в линейной и нелинейной постановке; 3, 4 - для нелинейного решения через 30 и 60 суток одномерного замачивания).

Критерием достоверности результатов численного моделирования с использованием МКР и МКЭ явилось их практическое совпадение с тестовым аналитическим решением одномерной задачи влагопереноса П.Бродбриджа и И.Вайта и известными результатами экспериментов Г.Ботмана и И.Колмана.

### 3. МОДЕЛЬ ВЛАГОПЛАСТИЧНОЙ СРЕДЫ

В основу модели влагопластичности, рассматривающей взаимодействие непрерывных нестационарных полей влажности и нелинейных деформаций положены следующие предпосылки:

- лессовый грунт рассматривается как дисперсная квазидвухфазная, пластически сжимаемая, дилатирующая среда, механические характеристики которой являются функциями влажности;

- определяющие уравнения просадочного процесса, разрешенные относительно приращений напряжений с учетом объемного и сдвигового деформирования записаны в рамках дилатансионного варианта теории пластического течения с изотропным упрочнением, основанной на ассоциированном законе течения и отказе от условия взаимности для пластических потенциалов (Васильков Г.В., Ананьев В.П., Хадисов М.К.);

- инвариантные зависимости, (1), (2), в условиях простого нагружения, необходимые для построения уравнений состояния записаны в виде дробно-линейной (гиперболической) функции С.П. Тимошенко;

- движение гравитационной, капиллярной и рыхло-связной воды в ненасыщенно-насыщенной лессовой толще обусловлено действием термодинамического потенциала влаги, мерой которого является всасывающее давление.

Определяющие уравнения имеют вид:

$$\Delta \sigma = \bar{N}_1 \Delta \varepsilon, \quad (8)$$

$$\text{где } \bar{H} = D_0 + (K_k - K_0) D_1 - \frac{I}{\partial \varepsilon_i} (\beta_2' - \beta_2'') D_2 + \frac{4}{3 \varepsilon_i^2} (G_k - G_0) D_3, \quad (9)$$

$D_0, D_1, D_2, D_3$  - матричные коэффициенты,  $\beta_2', \beta_2''$  - дилатансионная часть упруго-пластического деформирования грунтовой среды, функции  $\beta_k, k_k, G_k$  определяются с использованием экспериментальных зависимостей вида (1), (2) по формулам:

$$\beta_2' = \frac{\partial \sigma_i}{\partial \varepsilon_0}, \quad \beta_2'' = \frac{\partial \sigma_0}{\partial \varepsilon_i}, \quad K_k = \frac{\partial \sigma_0}{3 \partial \varepsilon_0}, \quad G_k = \frac{\partial \sigma_i}{3 \partial \varepsilon_i},$$

$$\Delta \sigma^T = \left\{ d\sigma_{11} \dots d\sigma_{23} \right\}, \quad \Delta \varepsilon^T = \left\{ d\varepsilon_{11} \dots d\varepsilon_{23} \right\}.$$

Начально-краевая задача влагопластичности в приращениях перемещений с учетом (5), (8), уравнений равновесия, геометрических зависимостей в приращениях, статических и кинематических граничных условий имеет вид:

$$\begin{aligned} A^T (\sigma^n + \bar{H}_1 A \Delta U) + \rho + B \dot{p} &= 0, & \in V; \\ A_S^T (\sigma^n + \bar{H}_1 A \Delta U) - p_s &= 0, & \in S_1; \\ U - U_0 &= 0, & \in S_2; \\ -B^T D B W - B^T K J + \dot{W} &= 0, & \in V; \\ -B_0^T D B W - B_0^T K J - \dot{V}_0 &= 0, & \in S_1; \\ W - W_0 &= 0, & \in S_2; \\ W - W_0 &= 0, & \in V, S \text{ при } t=0. \end{aligned} \quad (10)$$

В системе уравнений:

$A^T, A_S^T, \bar{H}_1, A \Delta U, D, K$  - матрицы соответственно операций дифференцирования, направляющих конусов внешней нормали грани  $S$ , физических зависимостей, геометрических зависимостей, коэффициентов диффузии, коэффициентов водопроницаемости;  $U_0 -$

заданные перемещения,  $\rho$  - плотность грунта,  $p$  - всасывающее давление,  $P_n$  - поверхностные силы. Обозначения в последних четырех уравнениях приведены ранее (5).

В (10)  $D = K \frac{I}{\gamma_v} \frac{\partial p}{\partial w}$  зависит от коэффициентов влагопроводности  $K$  и пористости  $h = \frac{\eta_0}{\eta_0 + (1 + \eta_0)\epsilon_0}$ , где  $\eta_0 = \frac{V_n}{V_d}$  - коэффициент пористости грунта природного сложения, следовательно  $D = D(w, \epsilon_0)$ . Матрица физических зависимостей  $\bar{H}_1$  в неявной форме зависит от влагосодержания грунта, так как деформационные и прочностные характеристики лессового грунта существенно зависят от  $W$ .

При решении конкретных задач влагопластичности шаговым методом физические зависимости (8) линеаризуются. Переход к конечно-элементной постановке разрешающих уравнений осуществляется с использованием вариационного уравнения Лагранжа. Конечно-элементный аналог начально-краевой задачи влагопластичности запишется следующим образом:

$$K_k^n \Delta q^{n+1} = p^{n+1} - P_p^{n+1} - R^n; \quad (11)$$

$$\left[ \frac{C}{\Delta t} + K_v^n \right] q_v^{n+1} = \left[ \frac{C}{\Delta t} - \frac{K_v^n}{2} \right] q_v^n + \frac{I}{2} \left[ P^{n+1} - P^n \right] \quad (12)$$

где  $K_k^n$  - касательная матрица жесткости,  $q$  - вектор узловых перемещений,  $p^n$  - вектор узловых сил,  $R^n$  - вектор узловых сил, порожденный внутренними силами,  $C$  - матрица влагопереноса,  $K_v^n$  - матрица водопроницаемости,  $P$  - вектор узловой скорости фильтрации,  $q_v$  - вектор узловых значений влажности, компоненты которого являются функциями времени.

Алгоритм решения начально-краевой задачи влагопластичности по определению напряженно-деформированного состояния лессового основания при его замачивании состоит из трех этапов. На первом этапе определяется НДС лессового основания в условиях естественного залегания. На втором вычисляются компоненты НДС от нагрузки сооружения. На третьем этапе опреде-

ляется НДС лессового основания с учетом влагопереноса при появлении источника замачивания.

Совокупность параметров модели разделена на две группы: стандартные, методика которых гостирована либо детально разработана и нестандартные, способы определения которых необходимо разработать или интерпретировать применительно к рассматриваемой модели. В качестве инвариантных зависимостей для построения определяющих уравнений (8) использованы результаты исследований Г.М.Ломизе. Эти зависимости аппроксимированы дробно-линейной функцией, предложенной С.П.Тимошенко и содержащей как деформационные, так и прочностные характеристики грунта, что позволяет использовать ее в большом диапазоне напряжений. Оценено влияние влажности на прочностные и деформационные характеристики лессовых грунтов. Показана необходимость определения параметров модели - всасывающего давления, коэффициента влагопроводности и диффузии с учетом напряженно-деформированного состояния лессовых грунтов.

Раздел завершается перечислением основных направлений совершенствования модели влагопластичности с целью более глубокого и всестороннего отражения сути просадочного процесса.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСАДОЧНОГО

##### ПРОЦЕССА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ВЛАГОПЛАСТИЧНОСТИ

С использованием (10) и зависимостей прочностных, деформационных и других параметров модели от влажности и ряда других показателей МКЭ решены задачи о НДС лессовых толщ при замачивании из больших по площади поверхностных и глубинных линейных источников. Первые имеют место в случае инфильтрации воды из опытных котлованов, вторые очень часто возникают вблизи зданий и сооружений при растекании воды или фекальных жидкостей вдоль поврежденных трубопроводов. В обоих случаях изучено влияние подъема уровня подземных вод.

На рис.5 представлены результаты численного моделирования НДС лессовой толщи от собственного веса грунта ниже дна котлована с размерами в плане 16 x 16 м с использованием расчетных моделей линейно-деформируемого тела и влагопластичности. Толща представлена лессовыми суглинками с плотностью сухого грунта  $\rho_d = 1,5 \frac{\tau}{\text{а}}$ . Эпюры построены исходя из шагового приложения нагрузки от собственного веса грунта. Вертикальные нормальные напряжения и в том и в другом случаях примерно равны, а вертикальные перемещения при нелинейной постановке больше соответствующих значения  $V$  на 12,5 %. При наличии уровня подземных вод вертикальное перемещение дна котлована за 30 суток замачивания увеличивается на 65 % за счет капиллярного увлажнения нижней части рассматриваемой области.

Результаты решения нелинейной задачи о взаимодействии ленточного штампа конечной жесткости с лессовым основанием, обладающим характерными для Ростовской области физико-механическими характеристиками, в условиях несимметричного замачивания из линейного источника свидетельствуют о существенном перераспределении напряжений и перемещений в основании за счет увеличения его деформируемости в увлажненных зонах. Характер и скорость трансформации НДС в значительной степени зависит от условий на нижней границе области. При отсутствии подземных вод по мере развития процесса влагопереноса вертикальные нормальные напряжения в зоне увлажнения уменьшаются. Наибольшее падение напряжений (до 44 %) наблюдается по оси источника замачивания, а по оси штампа напряжения уменьшаются от 12 % в верхней части лессового основания до 27 % в нижней. С другой стороны возрастают напряжения в зоне грунта естественной влажности. В нижней части области со стороны наиболее удаленной от источника это увеличение составило около 35 %. В рассматриваемом разделе диссертации приводится анализ перераспределения во времени и

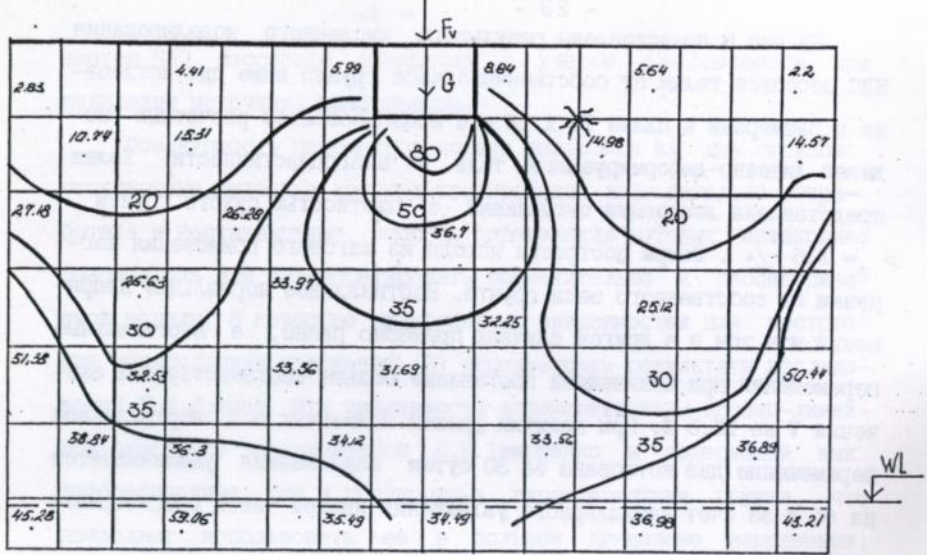


Рис 6. Линии равных вертикальных нормальных напряжений  $\sigma_y$ , через 60 суток замачивания из линейного источника.

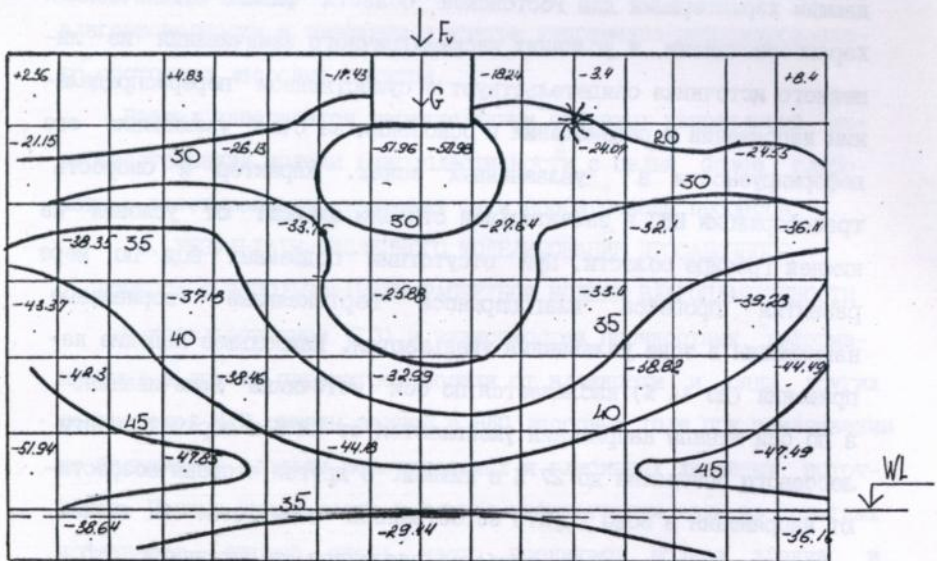


Рис. 7. Линии равных горизонтальных напряжений  $\sigma_x$ , через 60 суток замачивания.

других компонентов тензора напряжений. При наличии уровня подземных вод процесс трансформации НДС основания выражен более явно и быстрее протекает во времени, особенно это относится к горизонтальным нормальным напряжениям, они увеличиваются по оси штампа для разных глубин примерно в два раза. В качестве примера на рис.6,7 приведены линии равных вертикальных и горизонтальных напряжений через 60 суток замачивания. На рис.8 представлен характер вертикальных перемещений узлов конечных элементов при замачивании лессового основания при отсутствии подземных вод. Вертикальное перемещение штампа (осадка и просадка) в рассмотренном примере больше соответствующего значения по СНиП 2.02.01-83 на 22 %. При наличии уровня подземных вод просадка основания резко увеличивается.

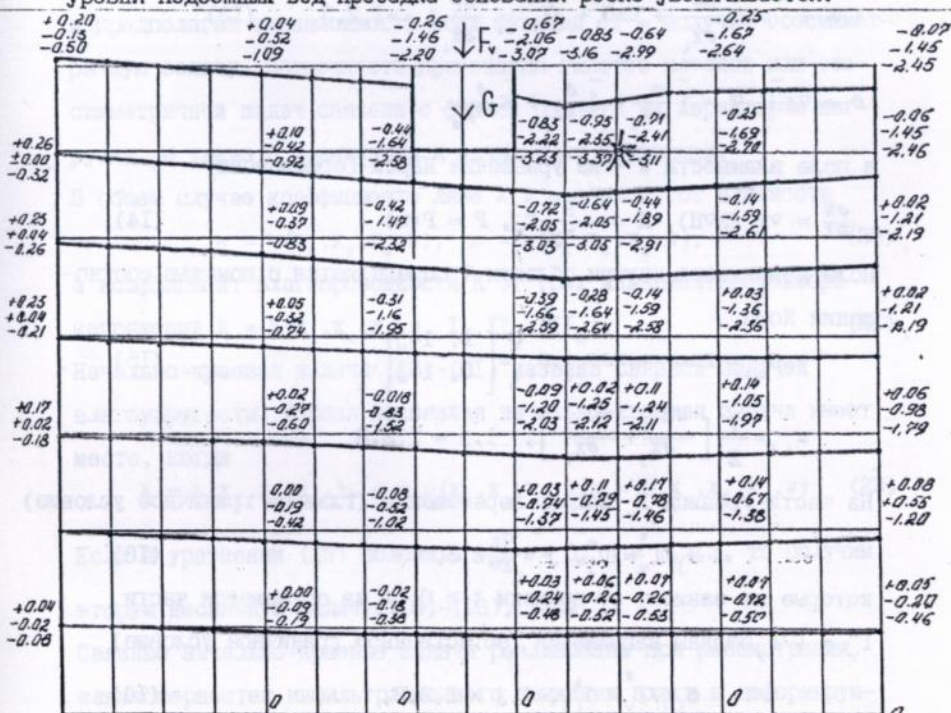


Рис.8. Вертикальные перемещения узлов конечных элементов через 30, 80 и 140 суток замачивания из линейного источника

## 5. МОДЕЛЬ ВЛАГОУПРУГОЙ СРЕДЫ. СВЯЗНЫЕ ЗАДАЧИ

### ВЛАГОУПРУГОСТИ И ВЛАГОПОЛУЧЕСТИ

В основу предложенной модели положены следующие предпосылки:

- лессовый грунт рассматривается как сплошная изотропная линейно-деформируемая среда, при этих условиях справедливы уравнения равновесия, обобщенный закон Гука, зависимости Коши;
- деформационные характеристики являются функциями влажности;
- движение жидкости в ненасыщенно-насыщенной квазидвухфазной среде обусловлено действием потенциала влаги.

Рассмотрено тело, занимающее пространство  $V$  и имеющее границу  $\Gamma$ . Поле перемещений  $\bar{U}$  ( $U_1, U_2, U_3$ ) точек внутри области  $V$  определяется из уравнений равновесия

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \mu \Delta U_i + \rho F_i = \frac{\partial P}{\partial x_i}; \quad i=1,2,3, \quad (I3)$$

$$\theta = \nabla x \bar{U}, \quad \nabla = \bar{i} \frac{\partial}{\partial x_1} + \bar{j} \frac{\partial}{\partial x_2} + \bar{k} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

а поле влажности  $W$  - из уравнений Дарси-Герсеванова

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \nabla x (k \nabla H), \quad H = \frac{P}{\gamma_v} - x_2, \quad P = P(W) \quad (I4)$$

Поле напряжений внутри области  $V$  определяется с помощью соотношений Коши

$$\sigma_{ij} = 2\mu \epsilon_{ij} + \lambda \theta \delta_{ij}, \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases}, \quad (I5)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right], \quad i, j = 1, 2, 3$$

На части границы  $\Gamma_y^1$  заданы перемещения (главное граничное условие)

$$u_j / \Gamma_y^1 = u_j^*, \quad j = 1, 2, 3, \quad (I6)$$

которые не зависят от времени  $t \geq 0$ , а на оставшейся части

$\Gamma_y^2 = \Gamma / \Gamma_y^1$  заданы напряжения (естественное граничное условие)

$$\sigma_{ij} / \Gamma_y^2 = \sigma_{ij}^*, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (I6)$$

также не зависящие от времени  $t \geq 0$ .

На части границы  $\Gamma_1^1$  задано значение функции влажности (главное граничное условие)

$$W/\Gamma_1^1 = W^*, \quad (17)$$

а на оставшейся части  $\Gamma_1^2 = \Gamma/\Gamma_1^1$  задано естественное условие

$$\frac{\partial W}{\partial n} + dW = \beta, \quad n \perp \Gamma \quad (18)$$

Функции  $W^*$ ,  $d$ ,  $\beta$  не зависят от параметра  $t$ .

Кроме того, задано начальное условие

$$W|_{t=0} = W_0 \quad (19)$$

Предполагая независимость всех входящих в уравнения (13)-(19) функций от параметра  $x_3$ , получим плоскую задачу. Переходя в уравнениях (13)-(19) к цилиндрической системе координат  $r$  и  $\varphi$  и предполагая независимость всех функций от  $\varphi$  получим осесимметричную задачу. Возможность применения гипотез плоской или осесимметричной задач связана с формой области  $V$ , характером нагрузки, а также с граничными и начальными условиями.

В общем случае коэффициенты Ляме  $\lambda$  и  $\mu$  зависят от влажности

$$\lambda = \lambda(x_1, x_2, x_3, W), \quad \mu = \mu(x_1, x_2, x_3, W), \quad (20)$$

а коэффициент теплопроводности  $K$  от трех инвариантов тензора напряжений  $K = K(x_1, x_2, x_3, W, I_\sigma, II_\sigma, III_\sigma)$ .

$$(21)$$

Начально-краевая задача (13)-(21) названа связной задачей теплоупругости. Первая несвязная начально-краевая задача имеет место, когда

$$\lambda = \lambda(x_1, x_2, x_3, W), \quad \mu = \mu(x_1, x_2, x_3, W), \quad K = K(x_1, x_2, x_3, W) \quad (22)$$

Если в уравнении (13) положить  $\frac{\partial P}{\partial x_j} = 0$ ,  $j = 1, 2, 3$ , то получим вторую несвязную задачу (13)-(18), (22).

Связные начально-краевые задачи реализованы при рассмотрении закономерностей инфильтрационного движения влаги в деформирующейся при просадке лессовой толще и определении НДС лессового

основания при действии на его поверхности полосообразной нагрузки в общем случае изменения влажностного режима в зоне аэрации. Приведены формулы для определения времени и скорости продвижения фронта увлажнения, величины просадки как функции от времени, компонентов тензора напряжений и вектора перемещений.

Процесс просадки сопровождается изменением во времени и пространстве физико-механических характеристик лессового грунта. Это вызвало необходимость постановки и решения связанной задачи влагоползучести - задачи о распределении напряжений и перемещений в слоистой квазидвухфазной среде с учетом ползучести в процессе влагопереноса. Деформации твердой среды описаны линейной теорией наследственной ползучести Г.Н.Маслова-Н.Х.Арутюняна, а компоненты напряжений и перемещений определены с учетом объемных сил, возникающих при движении жидкости в пористой среде. Функция перемещений Фурье в квадратурах записывается раздельно для слоя грунта естественной влажности и увлажненного, при этом значения коэффициентов функции определяются из граничных условий. Приводятся аналитические выражения для определения компонентов тензора напряжений и перемещений.

## 6. НЕСВЯЗНЫЕ ЗАДАЧИ ВЛАГОУПРУГОСТИ

Здесь рассмотрен класс задач о взаимодействии нагрузок, фундаментов и закрепленных массивов с лессовым основанием, неоднородность которого по деформационным характеристикам обусловлена замачиванием из различных поверхностных и глубинных источников. Процесс влагопереноса моделируется рядом фиксированных состояний нестационарных решений, излагаемых в разделе 2. Исследована трансформация НДС весомого загруженного полосообразной нагрузкой двухслойного основания при одномерной инфильтрации влаги и при подъеме уровня подземных вод. В тех же

условиях рассмотрена задача о распределении напряжений и перемещений в двухслойном основании при действии в одном из слоев сосредоточенных сил, результаты решения которой могут быть использованы при расчете заделанных в грунт и подземных конструкций. Указанные задачи решены аналитически. Рассмотрено взаимодействие системы "закрепленный ленточный массив - лессовая толща" и пластинчатого фундамента с грунтовым основанием в условиях замачивания. Моделирование осуществлялось вариационно-разностными методами МКР и МКЭ. Здесь получен ряд важных с практической точки зрения выводов, позволяющих оптимизировать фундаментные конструкции и производить расчет их оснований по второй группе предельных состояний.

При решении несвязных задач влагуупругости о НДС лессового основания при действии поверхностной полосообразной нагрузки или внутренних сосредоточенных сил оно рассматривается как двухслойное, мощность одного из слоев которого определяется границей фронта увлажнения. Верхняя граница основания частично или полностью свободна от напряжений, а на границе сопряжения слоев поставлены условия неразрывности напряжений и перемещений. При действии полосообразной нагрузки смешанная плоская задача сводится к решению неоднородного бигармонического уравнения при помощи преобразования Фурье

$$\Delta\Delta\Phi_i = \frac{2P_y(I + \nu_i)}{E_i}, \quad i = 1, 2, \quad (23)$$

где  $\Delta$  - оператор Лапласа,  $P_y$  - проекция массовых сил на ось  $y$ ,  $E_i$  и  $\nu_i$  - соответственно модуль деформации и коэффициент Пуассона грунта для  $i$ -го слоя грунта.

При действии сосредоточенных сил в одном из слоев компоненты напряжений и перемещений выражены через бигармонические функции перемещений, две из которых записаны для слоя, где приложены

силы, одна - для незагруженного слоя.

НДС неоднородной системы "закрепленный ленточный массив - лессовая толща" анализировалось с использованием модели квазидвухслойной среды (один из слоев водонасыщен, другой имеет природную влажность). С учетом зависимости коэффициентов Ляме от влажности (координат) задача сводится к решению дифференциальных уравнений теории упругости в перемещениях с переменными коэффициентами Ляме относительно неизвестных функций  $U(x,y)$ ,  $V(x,y)$  с учетом граничных условий и определению компонентов тензора напряжений из обобщенного закона Гука. Анализ НДС системы произведен с учетом влияния: модулей деформации и коэффициентов Пуассона элементов системы, положения уровня подземных вод и фронта инфильтрации, геометрических размеров закрепленного массива.

Установлено, что при инфильтрации жидкости с поверхности происходит концентрация напряжений, при подъеме уровня подземных вод - деконцентрация. Распределение напряжений в квазидвухслойной и однородной средах существенно различается. Например, изобары по ширине уже, но распространяются на большую глубину, чем в однородной среде. Изменение коэффициентов Пуассона элементов системы не оказывает существенного влияния на значения вертикальных нормальных напряжений, в то время как горизонтальные нормальные напряжения изменяются весьма значительно (до 100 %). Для конкретной площадки, представленной лессовидными суглинками, показано, что расчетное вертикальное перемещение закрепленного массива на 40 % превышает аналогичную величину по СНиП 2.02.01-83 и близко к фактическому, отличаясь от него на 3-4 %.

Автором в содружестве с М.В.Поляковым разработана прогрессивная, экологическая относительно чистая конструкция пластинчатого фундамента, состоящего из опорного блока и вертикальных

пластин из закрепленного грунта. Численное моделирование НДС системы "ленточный пластинчатый фундамент - лессовое основание" осуществлялось с использованием программного комплекса "Полос" в два этапа. На первом этапе изучалась трансформация НДС при изменении последовательно одного или сразу нескольких параметров - различного положения пластин, их высоты и расстояния между ними, ширины опорного блока, модульности материала пластин и др. Показано в частности, что при оптимальном расположении пластин достигается существенное снижение осадки (до 45%) по сравнению с осадкой сплошного ленточного фундамента. На втором этапе изучено взаимодействие пластинчатого фундамента с фильтрационно-анизотропной лессовой толщей в условиях двумерного симметричного и несимметричного замачивания из поверхностных источников, т.е. решалась невязанная задача влагуупругости. Рассматривался ряд фиксированных состояний лессового основания по влажности в различные моменты времени. Установлено, что эффективность применения пластинчатого фундамента по сравнению с традиционным исходя из расчета по деформациям достигает 40%.

#### 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛАГОПЕРЕНОСА В ЗОНЕ АЭРАЦИИ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОСАДОЧНЫХ ОСНОВАНИЙ

Результаты численного решения одномерных, двумерных и осесимметричных задач влагопереноса в ненасыщенных однородных и неоднородных, фильтрационно-анизотропных лессовых толщах сопоставлены с результатами известных крупномасштабных полевых экспериментов НИИОСП, КЖНИИ (Харьков), Днепропетровского филиала НИИОСП, УкрГИИНТИЗА, осуществленных в 1961-1963 гг в Запорожье и Днепропетровске, экспериментов И.Г.Тахирова, И.А.Абдуллаева на площадках в г.Ош (Кыргызстан) и г.Душанбе (Таджикистан), проведенных в 1981-1985 гг. В целом итоги теоретических исследований и

перечисленных экспериментов по замачиванию лессовых оснований хорошо согласуются.

Результаты численного решения одной из начально-краевых задач влагопластичности сопоставлены с результатами опытного замачивания лессовой толщи II типа по просадочности из котлована в г. Волгодонске (РостовДонтиаз, 1973-1974 гг.). Фактическая просадка дна котлована - 236 мм, расчетная с использованием модели влагопластичности 251 мм, расчетная по СНиП 2.02.01-83 - 200мм (рис.9).

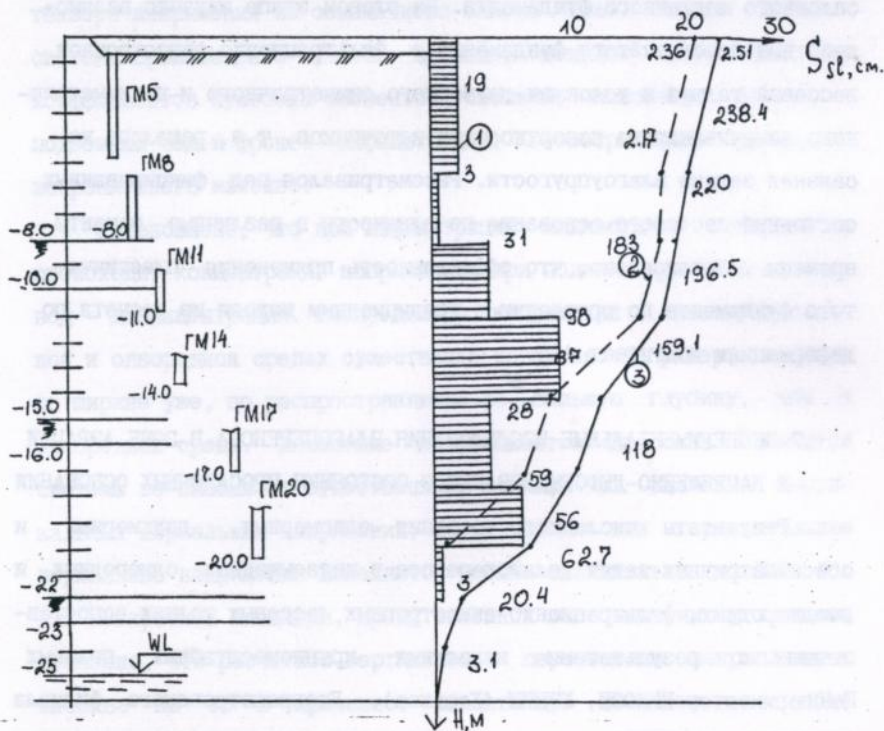


Рис.9. Эпюры просадки от собственного веса грунта (1,2 - по результатам натуральных испытаний, 3 - по результатам расчета).

Рассматриваются результаты осуществленных в 1979-1992 гг. под руководством автора крупномасштабных экспериментов по определению

напряженно-деформированного состояния оснований, представленных лессовидными суглинками. На трех экспериментальных площадках в г. Ростове-на-Дону и Волгодонске исследовалось взаимодействие ленточных традиционных и пластинчатых фундаментов, закрепленных силикатизацией массивов с лессовым основанием в процессе искусственного замачивания. В первом и третьем экспериментах испытания проводились на частично уплотненном и естественном основании в процессе регулируемого подъема уровня подземных вод, при этом замерялись вертикальные нормальные напряжения и перемещения. При подъеме уровня подземных вод наблюдались деконцентрация вертикальных нормальных напряжений, увеличение активной зоны, рост деформации за счет просадки. Фактические вертикальные перемещения хорошо согласуются с результатами численного решения соответствующих несвязных задач влагоупругости и превышают расчетные по СНиП 2.02.01-83 на 35-40%. Экспериментальное исследование НДС основания ленточного пластинчатого фундамента производилось в процессе одномерного замачивания с поверхности. Здесь фактическое вертикальное перемещение основания также близко к расчетному и превышает соответствующее значение по СНиП на 18%.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований, которые посвящены решению важной научно-технической проблемы - разработке методов расчета лессовых оснований по второй группе предельных состояний на основе использования механико-математических моделей, отражающих суть просадочного процесса. Использование этих методов в проектной практике позволяет обеспечить эксплуатационную надежность зданий и сооружений и резко снижает затраты на преобразование грунтов основания и

усиление надземных конструкций.

Основные научные и практические результаты исследования приведены в следующих выводах:

1. Рассмотрение природы деформирования различных литологических типов лессовых грунтов и результаты сопоставления расчетных значений деформаций просадочных оснований множества объектов, определенных по действующим нормативным документам, с фактическими, приводит к выводу, что причиной значительного их отличия являются существенные недостатки методики СНиП 2.02.01-83, основным из которых является использование расчетной модели линейно-деформируемого полупространства без надлежащего учета сути просадочного процесса, структурных особенностей и характера связи между частицами лессового грунта. Исходя из этого обоснован дифференцированный подход к количественной оценке деформации оснований, представленных грунтами лессового ряда, с использованием предлагаемых расчетных моделей, учитывающих сущность просадочного процесса.

2. Для оснований зданий и сооружений, представленных собственно лессовыми грунтами, содержащими более 50 % частиц пылеватой фракции, зернисто-пленчатой, пылегато-пленчатой структуры с коагуляционными и кристаллизационно-водорастворимыми связями и обладающими значительной склонностью к просадкам, разработаны принципы, теория и метод решения нелинейных начально-краевых задач в рамках феноменологической механико-математической модели влагопластичности. При численной реализации модели влагопластичности использован обобщенный метод упругих решений. На основе использования касательного модуля, как коэффициента пропорциональности между приращением интенсивности напряжений и интенсивности деформаций, итерационный процесс сводится к решению линейно-упругих задач, коэффициенты которых зависят от напряженно-деформированного состояния предыдущего шага и изменения

внешней нагрузки. Указаны основные направления совершенствования модели влагопластичности за счет увеличения связности начально-краевых задач и точности определения параметров модели.

3. Поставлен и решен ряд задач двумерного, осесимметричного и одномерного влагопереноса в зоне аэрации неоднородных фильтрационно-анизотропных лессовых толщ. Принято, что передвижение влаги в грунте обусловлено действием термодинамического потенциала влаги, мерой которого является всасывающее давление, которое нелинейно зависит от влажности, плотности скелета грунта, напряженно-деформированного состояния и других параметров. Установлено, что на распространение влаги в грунте в процессе замачивания из различных источников существенное влияние оказывают природная влажность, пористость, наличие подземных вод и погребенных горизонтов, водопроницаемость подстилающих слоев. Показано, что фильтрационная анизотропия и неоднородность лессовых толщ сказывается на скорости распространения влаги и очертании поля влажности. Результаты численного моделирования согласуются с известными из практики фактами о формировании куполов подтопления и образовании верховодки на погребенном слое. Показано, что в целом результаты численного моделирования одномерного влагопереноса с использованием МКР и МКЭ согласуются с тестовым аналитическим решением Бродбриджа П. и Вайта И. и известными результатами экспериментов Ботмана, Колмана и других исследователей.

4. Для решения ряда практических задач в рамках расчетной модели влагопластичности использованы разработанные алгоритмы и соответствующие программы на языке Фортран IV для ЭВМ типа ЕС и Турбо Паскаль для ПЭВМ, совместимых с IBM. Использован программный комплекс "Полус", в основе которого лежит метод конечных элементов. Рассмотрены различные случаи загрузки лессовых оснований в условиях замачивания из больших по площади поверхностных и глубоких

линейных источников. Изучено влияние уровня подземных вод. Наряду с внешней нагрузкой учтены собственный вес грунта, объемные капиллярные силы и поровое давление. Установлено, что вертикальные нормальные напряжения в случае замачивания лессовой толщи из котлована при использовании предложенной модели и модели линейно-деформируемого тела примерно равны, а вертикальные перемещения при нелинейной постановке задачи больше соответствующих значений при линейной постановке примерно на 12,5 %. Причем вертикальные перемещения существенно возрастают (до 65%) при наличии уровня подземных вод, причиной чему является капиллярное поднятие влаги.

Результаты изучения трансформации напряженно-деформированного состояния однородного, фильтрационно-анизотропного лессового основания ленточного фундамента при одностороннем замачивании из глубокого линейного источника указывают на то, что учет взаимовлияния двух непрерывных нестационарных полей влажности и нелинейных деформаций приводит к существенному перераспределению напряжений в основании за счет увеличения деформативности грунта в увлажненной зоне основания. Перераспределение напряжений при несимметричном замачивании приводит к неравномерной деформации лессового основания. Существенным является значительный рост нормальных горизонтальных напряжений, что свидетельствует об ошибочности применения методики расчета деформаций просадочных оснований, основанной только на учете компрессионного уплотнения. Суммарное вертикальное перемещение (осадка и просадка) примерно на 32% превышает аналогичную величину, подсчитанную по СНиП 2.02.01-83.

5. Для расчета по второй группе предельных состояний - по деформациям оснований, представленных лессовидными грунтами с зернисто-агрегативной и агрегативной структурой с кристаллизационно-водонерастворимыми и коагуляционно-кристаллизационными связями и, поэтому, непросадочными или малопросадочными, предложены связанные и

несвязные модели влагоупругости. Эти модели предполагают рассмотрение лессового грунта как линейно-деформируемого тела, неоднородность которого обусловлена изменением демормационных характеристик в процессе увлажнения.

6. Связная модель влагоупругости реализована при решении важных в практическом отношении задач о распределении напряжений и деформаций лессовых массивов при одномерной инфильтрации влаги и при подъеме уровня подземных вод с учетом внешней нагрузки и массовых сил. Получены формулы для определения времени и скорости продвижения фронта увлажнения влаги в деформирующейся при просадке лессовой толще, суммарной просадки как функции от времени, которые используются в практике проектирования.

7. Несвязная модель влагоупругости реализована при решении класса задач о взаимодействии нагрузок, фундаментов и закрепленных массивов с лессовым основанием. Аналитически решена новая задача механики сплошных деформируемых тел - задача о распределении напряжений и перемещений в двухслойном за счет замачивания лессовом основании при действии в одном из слоев сосредоточенных сил, из которой путем предельных переходов получены известные классические решения Мелана и Кельвина.

8. Получено аналитическое решение задачи влагоползучести о распределении напряжений и перемещений в слоистой квазидвухфазной весомой лессовой толще с учетом объемных фильтрационных сил и ползучести грунта в процессе влагопереноса. Деформации твердой фазы грунта описаны с использованием линейной теории наследственной ползучести Маслова Т.Н.-Арутюняна Н.Х., причем общие связи между напряжениями и деформациями записаны исходя из того, что скелет объемно деформируется под действием порового давления. Приведены формулы для определения составляющих тензора напряжений и вектора перемещений через функцию перемещений Фурье.

9. Изучено взаимодействие системы "закрепленный ленточный массив - лессовое основание". Установлены закономерности формирования напряженно-деформированного состояния лессового основания в процессе увлажнения, выявлены факторы, оказывающие наиболее существенное влияние. Показано, что распределение напряжений в квазидвухслойной и однородной средах существенно различается. Закрепленный массив передает подстилающему грунту от 10 до 50 % внешнего давления. Коэффициент Пуассона составляющих системы значительно влияет на изменение горизонтальных нормальных напряжений. Путем численного моделирования установлено, что при инфильтрации жидкости с поверхности наблюдается концентрация вертикальных нормальных напряжений, в то время как при подъеме уровня подземных вод обнаруживается их деконцентрация, что согласуется с результатами экспериментальных исследований. Для конкретной площадки, представленной лессовидными суглинками, показано, что расчетное суммарное вертикальное перемещение закрепленного массива на 40 % превышает аналогичную по СНиП 2.02.01-83 и близко к фактическому, отличаясь от него на 3-4 %.

10. Предложена прогрессивная, экономичная и экологически относительно чистая конструкция пластинчатого фундамента с использованием метода гидроразрыва при его устройстве. В рамках несвязной модели влагуупругости исследована трансформация напряженно-деформированного состояния системы "пластинчатый фундамент - лессовое основание". Численный эксперимент позволил установить, что наиболее эффективным является такое размещение пластин, при котором их ось совпадает с краем опорного блока; пластинчатые фундаменты позволяют в условиях замачивания снизить вертикальные перемещения до 40 % по сравнению с традиционными конструкциями ленточных фундаментов. Использование пластинчатых фундаментов позволяет снизить затраты труда на 14 %, крепящего раствора на 23 % по сравнению с

известными техническими решениями.

11. Методы решения всех вышеупомянутых задач реализованы в виде пакетов прикладных программ для ЭВМ и ПЭВМ.

12. Результаты численного решения задач о влагопереносе в зоне аэрации лессовых толщ при замачивании из различных источников указывают на хорошую их сходимость с результатами известных экспериментов. Проведены крупномасштабные эксперименты по исследованию напряженно-деформированного состояния лессовых оснований в процессе их увлажнения во взаимодействии с ленточными и пластинчатыми фундаментами, закрепленными массивами. Фактические значения вертикальных перемещений согласуются с результатами численного моделирования на основе предложенных расчетных моделей влагопластичности и влагоупругости и превышают аналогичные значения по СНиП 2.02.01-83 на 18...40 %.

13. Материалы диссертации включены в ряд нормативных документов государственного и регионального уровней и используются в практике проектирования объектов на лессовых грунтах организациями Северного Кавказа и Украины.

По теме диссертации опубликовано 80 работ. Основными из них являются:

#### Рекомендации, технические условия.

1. Рекомендации по проектированию закрепленных силикатизацией массивов в лессовых просадочных грунтах. -М.: Госстрой СССР, 1980, -50 с. (соавторы Азархин В.М., Селезнев А.Ф., Бекетов А.К. и др.).

2. Временные технические условия по проектированию оснований и фундаментов общественных и жилых зданий на просадочных грунтах в г.Волгодонске. -М.: Госстрой РСФСР, 1980, -28 с. (соавторы Трейвас В.И., Косицын Б.А., Шевелев В.Б. и др.).

3. Рекомендации по усилению железобетонных конструкций зданий и сооружений реконструируемых предприятий. Часть 3. Основания. -Харьков: Харьковский ПромстройНИИпроект, 1986, -119 с. (соавторы Лучковский И.Я., Лекумович Г.С., Азархин В.М. и др.).

#### Статьи в журналах и сборниках.

4. Распределение напряжений и перемещений в упругом слое при

действии внутри него сосредоточенных сил. //Основания, фундаменты и механика грунтов. - №5. -М., 1964. Гос. изд-во по стр. -с.2-4 (соавтор Шерхер О.Я.).

5. Особенности инфильтрации влаги в лессовых неоднородных толщах //Труды Межвузовской конференции по строительству на лессовых грунтах. -М.: Стройиздат, 1973, -с. 14-15.

6. Напряженно-деформированное состояние двухслойного основания при действии на его поверхности равномерно-распределенной нагрузки //Изв. СКНЦ ВШ. Техн. науки. -№2, -Ростов-на-Дону, 1975. -с. 41-48. (соавтор Браиловский Г.Л.).

7. Напряженно-деформированное состояние просадочной грунтовой толщи при инфильтрации влаги (проская задача) //Основания и фундаменты. Межвуз, сб. -Новочеркасск: Новочеркасский политехн. ин-т, -1976. -с.64-70. (соавторы Браиловский Г.Л., Азархин В.М.).

8. К вопросу о прогнозировании деформаций лессовой просадочной толщи при подъеме уровня грунтовых вод //Изв. СКНЦ ВШ. Техн.науки. -№4, -Ростов-на-Дону, 1977. -с.61-64. (соавторы Ананьев В.П., Браиловский Г.Л.).

9. Распределение напряжений и перемещений в слоистой квазидвухфазной среде с учетом ползучести (плоская задача) //Расчет оболочек и пластин. -Ростов-на-Дону: Рост.инж.-строит. институт, 1978. -с.173-183. (соавтор Браиловский Г.Л.).

10. Расчет напряжений и перемещений в грунтовой системе "закрепленный массив - лессовая среда" при действии полосообразной нагрузки //Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве: Тез. докл. IX Всесоюз. совещ. -М.: Стройиздат, 1978. -с. 20-22. (соавторы Селезнев А.Ф., Азархин В.М.).

11. Деформации лессовой просадочной толщи при изменении влажностного режима в зоне аэрации //Основания и фундаменты в сложных инженерно-геологических условиях. Межвуз, сб. №3, -Казань: Казан. инж.-строит. ин-т, 1979. -с.11-15. (соавторы Ананьев В.П., Браиловский Г.Л.).

12. О некоторых моделях "влагоупругости" механики лессовых грунтов //Проектирование и строительство зданий и сооружений на лессовых просадочных грунтах: Тез. докл. к республ. научн.-техн. конф. - Т.2. Теории и методики расчета оснований и фундаментов. -Барнаул, 1980. -с. 120-127. (соавтор Шлафман Ш.М.).

13. К решению плоской и осесимметричной задач влагопереноса в ненасыщенной грунтовой среде //Экспериментально-теоретические исследования процессов упруго-пластического деформирования основа-

ний и фундаментов. Межвуз. сб., -Новочеркасск: Новочеркасский политехн. ин-т, 1980. -с.63-72. (соавтор Шлафман Ш.М.).

14. Напряженно-деформированное состояние лессовой толщи при одномерном изменении влажностного режима в зоне аэрации //Проектирование и строительство зданий и сооружений на лессовых просадочных грунтах: Тез. докл. республ. науч.-практ. конф. -Т.2. Теории и методики расчета оснований и фундаментов. - Барнаул, 1980. -с.134-142. (соавторы Бекетов А.К., Азархин В.М.).

15. К описанию влагопереноса в зоне аэрации просадочной лессовой толщи //Основания и фундаменты в сложных инженерно-геологических условиях. Межвуз. сб., -Казань: Казан. инж.-строит. ин-т., 1981. -с.46-48. (соавторы Шлафман Ш.М., Азархин В.М.).

16. Исследование трансформации напряженно-деформированного состояния закрепленного ленточного массива, работающего в лессовой толще I типа по просадочности //Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве: Тез. докл. X Всесоюз. научно-техн. совещ. -М.: Стройиздат, 1973. -с.20-22. (соавтор Азархин В.М.).

17. Экспериментальные исследования взаимодействия ленточных штампов с уплотненным лессовым основанием в условиях подтопления //Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве: Тез. докл. X Всесоюз. научн.-техн. совещ. -М.: Стройиздат, 1983. -с. 157-159. (соавтор Гольдшляк Б.Л.).

18. Решение плоской задачи влагопереноса с учетом анизотропии //Вопросы исследования лессовых грунтов и методов возведения фундаментов на них. Межвуз. сб. -Ростов-на-Дону: Рост. инж.-строит. ин-т., 1983, -с.71-77. (соавтор Шлафман Ш.М.).

19. Исследование влагопереноса в лессовой толще при замачивании из поверхностного линейного источника //Вопросы исследования лессовых грунтов и методов возведения фундаментов на них. Межвуз. сб. -Ростов-на-Дону: Рост. инж.-строит. ин-т., 1985. -с.128-134. (соавтор Углич С.И.).

20. О влиянии граничных условия на влагоперенос при замачивании лессовой толщи из поверхностного линейного источника //Вопросы исследования лессовых грунтов и методы возведения фундаментов на них. Межвуз. сб. -Ростов-на-Дону: Рост. инж.-строит. ин-т., 1987. -с. 82-87. (соавтор Углич С.И.).

21. Об одной модели влагопереноса в просадочном основании //Проблемы защиты, строительства зданий и сооружений на просадочных грунтах. Тез. докл. к республ. научн.-техн. конф. в г.Запорожье. -Киев: НИИСК Госстроя СССР, 1987. с. 84-86. (соавторы Васильков

Г.В., Дежина И.Ю., Дедух А.И.).

22. Исследование влагопереноса для оценки свойств просадочных и силикатированных грунтов //Современные проблемы инженерной геологии и гидрогеологии территорий городов и городских агломераций. Тез.докл. III Всесоюз. семин. Акад.наук СССР. Ин-т литосферы. -М.: Наука, 1987. с.16-17.(соавторы Азархин В.Н.,Пашков В.И.).

23. Исследование НДС лессового основания как упруго-пластической среды с учетом изменения влажностного режима при замачивании //Инженерная геология лессовых пород. Тез.докл. Всесоюз. совещ. кн.2. -М.:Госстрой РСФСР, 1989. -с.27-28. (соавторы Васильков Г.В., Дежина И.Ю.).

24. О параметрах модели влагопластичности лессовых грунтов //Вопросы исследования лессовых грунтов и методов возведения фундаментов на них. Межвуз.сб. -Ростов-на-Дону: Рост. инж.-строит. ин-т., 1989. -с.63-68. (соавторы Васильков Г.В., Дедух А.И.).

25. К описанию НДС просадочных оснований с использованием модели влагопластичности. //Лессовые просадочные грунты как основания зданий и сооружений. Тез. докл. к Всесоюз. науч.-практ. конф.-Барнаул,1990.-с.30-32.(соавторы Васильков Г.В.,Дежина И.Ю.).

26. Исследование напряженного состояния основания пластинчатых фундаментов //Вопросы исследования лессовых грунтов и методов возведения фундаментов на них. Межвуз.сб. -Ростов-на-Дону: Рост. инж.-строит. ин-т., 1991. -с.79-85. (соавтор Поляков М.В.).

27. А.с. 1629413 СССР, МКЛ Е 0217/20. Способ укрепления откосов. -Опубл. 1991, Бюл. №7. -с.80. (соавтор Поляков М.В.).

28. К вопросу расчета лессовых оснований с использованием модели влагопластичности //Вопросы исследования лессовых грунтов и методов возведения фундаментов на них. Межвуз.сб. -Ростов-на-Дону: Рост. инж.-строит. ин-т., 1993. -с.60-67. (соавторы Васильков Г.В., Дежина И.Ю.).

29. Задачи влагоупругости и влагопластичности применительно к расчету просадочных оснований //Нелинейная механика грунтов. /Тр. IV Российск.конф. с иностранным участием. Т.1. -Спб., 1993. -с. 26-31. (соавторы Васильков Г.В., Дежина И.Ю.).

30. Моделирование методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния в основании пластинчатого фундамента в условиях двумерного замачивания и фильтрационной анизотропии грунта //Вопросы исследования лессовых грунтов и методов возведения фундаментов на них. Межвуз.сб. -Ростов-на-Дону: Рост. гос. акад.стр-ва, 1993. с.78-88.(соавторы Васильков Г.В.,Поляков М.В.).

АНОТАЦІЯ

Приходченко О.Е. Напружено-деформований стан лесових основ в процесі вологопереносу. Рукопис. 05.23.02 - Основи та фундаменти. Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій. Київ - 1995 р. Об'єктом досліджень є прогноз деформацій лесових основ будівель та споруд з використанням феноменологічних моделей вологопластичності, вологоползучості та вологопружності. Розглянуто взаємодію полів вологості, нелінійних та лінійних деформацій основ, які представлені ґрунтами лесового ряду, в різноманітних умовах навантаження та замочування. Поставлено і вирішено ряд практично важливих початково-краєвих задач. Проаналізовано вплив різноманітних параметрів розрахункових моделей. Наведено результати великомасштабних польових експериментів по визначенню напружено-деформованого стану лесових основ та їх співставлення з результатами чисельного моделювання. Дослідження впроваджені в практику будівництва.

ANNOTATION

Prikhodchenko O.E. Stress-Strain State of Loessial Bases in the Process of Moisture Transfer. Manuscript. 05.23.02 -- Bases and Foundations. The Scientific Research Institute of Building Constructions. Kiev -- 1995. The object of investigation is the forecast of loessial base of buildings and constructions using phenomenological models of moisture plasticity, moisture creeping and moisture elasticity. In the interaction of moisture fields, nonlinear and linear deformations of bases, represented by soils of a loessial row under different conditions of loading and artificial saturation was examined. A number of practically important and initially marginal problems was put and solved. The influence of different parameters of theoretical models was analysed. The results of large-scale field experiments to determine the stress-strain state of loessial bases and their comparison with the results of numerical simulation are given. The investigation was put into the practice of construction.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: основания, лесовые грунты, напряжения, деформации, влагоперенос, расчетные модели, влагопластичность, влагоползучесть, влагоупругость, численное моделирование, результаты полевых экспериментов.



---

ЛР N 020818. Подписано в печать 10.10.95. Формат 60x84 /16.

Бумага писчая. Ксерокс. Уч.-изд. л. 2.0

Тираж 100 экз. С. 305

---

Редакционно-издательский центр Ростовской-на-Дону государственной  
академии строительства. 344022, Ростов-на-Дону, ул.Социалисти-  
ческая, 162.

BBE CC 8A

Av 33.406

Ав

33.388

И. П. Иванов, Институт физики СО АН ССР, Ленинград, 190900.

Сфера печати: Издательство "Наука", г. Москва, 1980.

Тираж 100 экз. С. 125

Издательство "Наука" - Ленинградское отделение, Ленинград, 190900.  
Учреждение: Институт физики СО АН ССР, Ленинград, 190900.  
Адрес: Ленинград, 190900, Институт физики СО АН ССР, ул. Гурьевская, 120.