

05.23.01  
П 581

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ  
ОБРАЗОВАНИЮ

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

ПОПОВИЧ Алексей Панькович

УДК 624.151.5:624.139

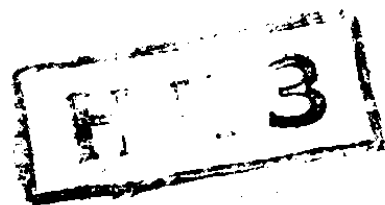
**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ФУНДАМЕНТЫ  
СТРУКТУРНОГО ТИПА  
НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ**

05.23.01. — Строительные конструкции,  
здания и сооружения

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск 1990



Работа выполнена на кафедре строительных конструкций Красноярского инженерно-строительного института.

Научный руководитель —

кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Ш. Ф. АҚБУЛАТОВ.

Официальные оппоненты —

доктор технических наук, профессор С. М. СКОРОБОГАТОВ,  
кандидат технических наук, доцент С. Б. ШМАТКОВ.

Ведущая организация —

Государственно-кооперативное объединение «Якутагропромстрой».

Защита состоится 18 апреля 1990 г. в <sup>15<sup>00</sup></sup> часов на заседании Регионального специализированного совета К 053.13.05 по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Челябинском политехническом институте по адресу: 454044, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, ауд. 244.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института. Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направлять в адрес специализированного совета.

Автореферат разослан «14» марта 1990 г.

Ученый секретарь Регионального  
специализированного совета  
кандидат технических наук, доцент

  
Г. В. ТРЕГУЛОВ

Актуальность темы. Освоение и развитие промышленных и сельскохозяйственных районов на Крайнем Севере и большей части Сибири поставило задачу поиска конструктивно-технологических решений фундаментной части зданий, вводимых в условиях распространения вечномёрзлых грунтов. В пределах крупных городов и населенных пунктов затруднен выбор площадок строительства с благоприятными для традиционных решений фундаментов мерзлотно-геологическими условиями. В практике строительства стоимость нулевого цикла достигает 40% от сметной стоимости общестроительных работ при введении промышленных и гражданских зданий. Постоянно возрастают эксплуатационные затраты, связанные с ремонтом и восстановлением конструкций фундаментной части.

В отечественной практике строительства разрабатываются и внедряются альтернативные решения фундаментной части зданий - вентилируемые поверхностные фундаменты на подсыпках. Это направление фундаментостроения на вечномёрзлых грунтах требует глубокой научной проработки и технико-экономического обоснования. Необходимость исследований обусловлена новизной конструкций, отсутствием апробированных методик проектирования и универсальных решений фундаментной части, приспособленных для зданий с различными конструктивными схемами надземной части.

Решение задач исследований на современном уровне позволит разработать рациональные конструкции пространственных фундаментов с низкими эксплуатационными затратами, повысить эффективность капитальных вложений за счет сокращения сроков строительства и прямых затрат по нулевому циклу, а также за счет возможностей рациональной планировки населенных пунктов.

Диссертационная работа выполнена в рамках целевых научно-технических программ ОЦ.031 (задание 05.01 С 33е5) Госстроя СССР и региональной программы 06.06.00.Н (задание 06.06.00.Н.08.03), предусматривающих разработку и внедрение новых конструктивных решений пространственных фундаментов.

Цель работы - совершенствование конструктивных решений поверхностных пространственных фундаментов на плоских элементах для зданий различного назначения, разработка алгоритмов и программного комплекса для статического расчета таких конструкций.

Научную новизну работы составляют: новые конструктивные решения пространственных фундаментов структурного типа, их элементов и узлов; формулировка расчетной модели, алгоритм и программный комплекс для статического расчета фундамента с учетом специ-

фики работы железобетона на неравномерно деформирующемся основании; методика моделирования оттаивающего основания и результаты экспериментальных исследований мелкомасштабных моделей фундамента на оттаивающем основании; результаты экспериментальных исследований натуральных фрагментов фундамента.

Практическая ценность работы. Разработанная серия конструкций фундаментов структурного типа для сельскохозяйственных и жилых многоэтажных панельных зданий (включая рабочие чертежи) позволяет сократить материалоемкость фундаментной части здания, трудоемкость ее возведения и продолжительность строительства в целом. Программный комплекс дает возможность выполнять статический расчет разнообразных типов пространственных фундаментов с высокой степенью достоверности.

Достоверность результатов. Алгоритмы расчетов основаны на общепризнанных гипотезах, проверенных теориях и зависимостях. Достоверность результатов подтверждена сопоставлением с результатами исследований других авторов и экспериментально. Обоснованность экспериментальных данных подтверждается: адекватностью условий проведения модельного эксперимента реальным и испытанием фрагментов фундамента, полностью соответствующим разработанным конструкциям; полнотой получаемой информации; сопоставлением с данными аналогичных исследований и метрологическим обеспечением испытаний.

Реализация исследований. Разработанные конструкции внедрены в проектирование на объектах: коровники на 200 голов в Якутской АССР (проектировщик ПИИ "Якутагропромпроект", шифры: 212/86, 126/86); гараж-стоянка на 25 автомобилей в п. Намцы (КрИИ); склады, трансформаторная подстанция, мусоросборник - в г. Норильске (КрИИ). Объединением "Якутагропромстрой" начато строительство коровника на 200 голов в с. Бердигестях Якутской АССР (шифр 212/86). Техсоветом ПИИ "Якутагропромпроект" конструкции пространственных фундаментов структурного типа рекомендованы для дальнейшего внедрения в гражданском строительстве на селе.

Программа расчета применялась при проектировании вышеречисленных объектов, а также фундаментов-оболочек для зданий: лабораторный корпус Игарской научно-исследовательской мерзлотной станции института мерзлотоведения СО АН СССР, административно-бытовой корпус в г. Норильске.

Апробация работы. Основные результаты исследований доложены и представлены в материалах: совместного заседания секции "Строительство в условиях сурового климата на вечномёрзлых грунтах"

и "Основания, фундаменты и механика грунтов" научно-технического совета Госстроя СССР (Москва, 1964 г.); краевых научно-технических конференциях (Красноярск, 1965 г., 1966 г., 1968 г.); всесоюзного координационного совещания "Нелинейные методы расчета железобетонных пространственных конструкций" (г. Белгород, 1985 г.); научно-технической конференции Томского ИСИ (Томск, 1986 г.); региональной научно-технической конференции "Инженерно-геокриологические проблемы Забайкалья" (Чита, 1987 г.); VIII конференции научной молодежи "Вопросы геокриологии" (Якутск, 1988 г.); XIV научно-производственного совещания-семинара "Конструктивные формы и методы расчета многоярусных зданий в условиях вечной мерзлоты и сейсмички" (Иркутск, 1988 г.); научно-технического семинара "Системы автоматизированного проектирования фундаментов и оснований" (Челябинск, 1988 г.); всесоюзной конференции молодых ученых и специалистов "Актуальные вопросы строительства" (Воронеж, 1987 г.); региональной конференции ученых Сибири и Дальнего Востока "Наука - строительному производству" (Новокузнецк, 1989 г.); XV научно-производственном региональном совещании-семинаре "Автоматизация проектирования и исследований железобетонных конструкций зданий" (Львов, 1989 г.).

Результаты работы были положены и обсуждены на техсоветах и совещаниях в проектных институтах и строительно-производственных организациях: Якутагропромпроект, Мосгипротранс, Норильскстрой и Якутагропромстрой. Отдельные положения работы отражены в научно-технических отчетах (номер ГР 01870071999, 01860018782). По теме диссертации опубликовано 15 работ.

На защиту выносятся:

- конструктивные решения пространственных фундаментов структурного типа;
- алгоритмы и программа расчета пространственных фундаментов;
- результаты экспериментально-теоретических исследований моделей фундамента на оттаивающем основании и натуральных фрагментах;
- рекомендации по проектированию пространственных фундаментов структурного типа.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов и приложения. Содержит 147 страниц машинописного текста, 87 рисунков, 11 таблиц, список литературы из 249 наименований, приложение на 17 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан анализ конструктивных решений фундаментов, возможных для применения в строительстве в условиях распространения вечномерзлых грунтов, рассмотрены формулировки и методы решения задач расчета пространственных конструкций, модели оснований и обоснованы задачи исследований.

Анализ конструктивных решений выполнен на основе обобщения опыта исследований, проектирования и строительства фундаментов, а также по патентному поиску. Ряд ключевых вопросов фундаментостроения на вечномерзлых грунтах решен Ю. Я. Белли, Ю. М. Гончаровым, В. В. Докучаевым, К. Ф. Маркиным, П. Н. Мельниковым, Л. И. Неймарком, Г. В. Пурхаевым, Л. Н. Хрусталевым, Н. А. Цыгановичем и другими. По конструктивным решениям фундаментов можно разделить на две группы - заглубленные и поверхностные (мелкозаглубленные). Широкое распространение получили сваи, имеющие давнюю историю применения. Разнообразные мерзлотно-геологические условия, сложность буровых работ и деструкция бетона свай в процессе эксплуатации ограничивают область их эффективного применения. Поверхностные фундаменты начали применяться с конца 70-х годов на экспериментальных объектах. За счет совмещения прочностных, охлаждающих, распределительных и ограждающих функций поверхностные фундаменты могут конкурировать с заглубленными. Для этого необходимо создать рациональные условия контакта фундамента с грунтом при высокой жесткости конструкции и целесообразном расходе материалов.

Поверхностные фундаменты классифицированы и рассмотрены по конструктивным признакам: ленточные, перекрестно-ленточные и рамные; плитно-ребристые и оболочечные; структурные и трехслойные. Вопросы разработки конструкций ленточных фундаментов нашли отражение в работах В. П. Андрушкова, Е. Ф. Бинюкурова, С. Н. Клепикова, Н. С. Метелька, Е. А. Сорочана и других. Спиральные конструкции оболочечного и плитного типов фундаментов получили развитие благодаря исследованиям Ю. М. Гончарова, П. Я. Григорьева, А. Г. Литвиненко, Ю. Н. Мурзенко, В. О. Орлова, В. П. Соломина, А. Н. Тетюора, В. И. Федорова, Ли Ху Лонга, Ф. Кандели, Г. Гоцера, А. Мангуса и других. Фундаменты структурного типа рассматривались А. Г. Дашковым, В. П. Редькиным, Ю. Н. Мурзенко, С. И. Ефтушенко, А. Н. Тетюором и другими. Проектирование поверхностных фундаментов в условиях многолетнемерзлых грунтов посвящены работы С. С. Вилова, Ю. М. Гончарова, П. Я. Григорьева, А. А. Колесова, Н. В. Кутанской и других. Совет

шенствование пространственных поверхностных фундаментов достигается за счет многофункциональности, концентрации материала в местах приложения нагрузок, максимального распределения давления по площади основания, применения канальной системы охлаждения, технологичности элементов и более полного использования прочностных свойств материалов.

Пространственные фундаменты представляют собой составные оболочечные конструкции с переменными геометрическими и физическими параметрами, имеющими дискретные связи между элементами. Задача расчета таких конструкций усложняется анизотропией свойств, трещинообразованием железобетона и спецификой основания. Такие задачи целесообразно решать с использованием вариационных формулировок, численными методами, ориентированными на применение ЭВМ.

Развитие и применение вариационных принципов теории оболочек основано на трудах Н. П. Абовского, Л. Я. Айнолы, К. З. Галимова, А. П. Деруги, В. В. Новожилова, Б. Прагера, Л. А. Розина, Э. Тонти и других. Задачи практического расчета в рамках вариационно-разностного метода решены в работах Н. П. Абовского, А. В. Александрова, Д. В. Вайнберга, Б. Г. Коренева, Л. А. Розина, А. Г. Угодчикова, О. Зенкевича и других. Вопросы алгоритмизации и численного решения задач вариационно-разностным методом на ЭВМ отражены в работах Н. П. Абовского, З. Л. Бурмана, Д. В. Вайнберга, П. М. Варвака, А. С. Городецкого, А. П. Деруги, Л. В. Енджиевского, В. С. Здоренко, М. С. Корнишина, В. И. Мыченкова, А. С. Сахарова, В. И. Соломина, Н. Н. Шапошникова, И. Я. Хархурина, А. Г. Юрьева и других. Известны вычислительные комплексы ПРОЧНОСТЬ, ДИРА, РАМОК, ПАРСЕК, ДИСТОС, СПРИНТ, ПРСКРУСТ, РАСОСК, ПОРТІК-S. Большинство из них предназначено для расчета конструкций, не контактирующих с основанием. Анализ рассмотренных работ показывает, что для расчета пространственных фундаментов структурного типа в условиях возможного нарушения контакта с основанием законченных методик и программных средств в настоящее время не существует.

Экспериментальные и теоретические исследования по прочности бетонов нашли свое отражение в работах П. П. Баландина, О. Я. Берга, А. А. Гвоздева, Г. А. Геншева, Н. И. Карпенко, Е. С. Лейтеса, М. Ф. Лишица, Л. К. Лукши, Н. И. Миролюбова, Б. Я. Тябликова, А. В. Яшина, М. Д. Котсовоса, Г. Кунцера, Н. Оттосена и других. Вопросы расчета пространственных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности и трещинообразования исследовались В. А. Ашкова, Г. А. Геншевым, А. С. Городецкого, В. С. Здоренко, Н. И. Карпенко, А. И. Коачеп-

ского, В.М.Круглова, Л.И.Ярина, К.Герстля, Ф.Фьяджи, П.Марти и других.

В практических задачах расчета железобетонных конструкций, в том числе оболочечного типа с учетом конструктивной и приобретенной анизотропии используются ортотропная, трансверсально-изотропная и изотропная модели с представлениями о многослойности оболочек. Решение задач в физически нелинейной постановке выполняется итерационными методами. Наиболее распространенным является сочетание шагового процесса с линеаризацией на шаге нагружения методом переменных параметров упругости.

Большой вклад в создание методов расчета конструкций на деформируемом основании и моделей основания внесли ученые В.З.Власов, Н.М.Герсеванов, М.И.Горбунов-Посадов, Б.И.Далматов, К.Е.Егоров, К.Г.Клейн, С.Н.Клешинков, Б.Г.Коренья, Н.Н.Леонтьев, Т.А.Маликова, П.Л.Пастернак, Н.П.Пузыревский, И.А.Симвулиди, В.И.Соломин, О.Я.Шехтер и другие. В обзоре рассмотрена возможность применения к оттаивающему основанию существующих моделей: основание Винклера, упругое и однородное полупространство и его модификации, упругий слой конечной толщины, параметрические модели, нелинейно-деформируемая сплошная среда и контактные модели. На основе анализа моделей и данных о их экспериментальном подтверждении сделан вывод об возможности применения модели с переменными коэффициентами постели.

Вторая глава содержит сведения о конструктивных решениях пространственного фундамента структурного типа. Фундамент, показанный на рисунке, представляет собой пространственную трехслойную конструкцию, содержащую верхний и нижний пояса с вальцеванием между ними в виде пар наклонных элементов, ориентированных по несущим конструкциям здания. Для опирания несущих конструкций в продольном направлении здания предусмотрены сквозные диафрагмы. При разработке фундамента учитывались требования норм проектирования, опыт создания поверхностных фундаментов, а также обеспечение режима вентилирования грунтов основания, отделение материала фундамента от деятельного слоя грунта, возможность распределения давления на основание, максимальная сборность по технологичным элементам, приспособление конструктивной схемы для различных мерзлотно-геологических условий, снижение объемов земляных работ на строительной площадке и ряд других.

Фундамент приспособлен для зданий, различных по конструктивной схеме: панельной, каркасно-панельной и одноэтажной каркасной. Номенклатура элементов фундамента содержит различные сплош-



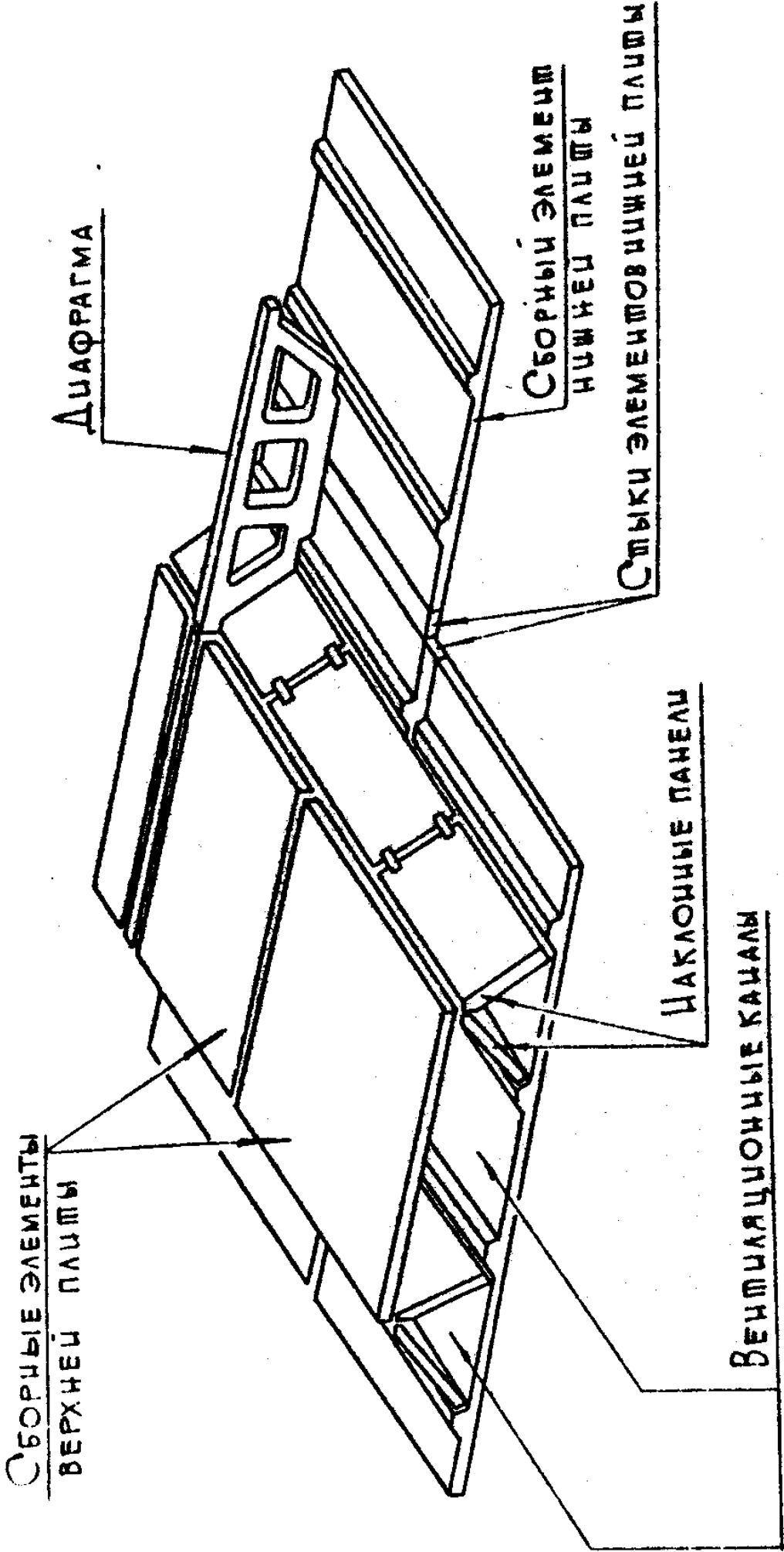


Рис. фрагмент фундамента

ные сборные плиты с ребрами (вугами) в одном направлении, наклонные панели (сплюснутые и с проемами) для пропуска коммуникаций, сквозные диафрагмы жесткости. Номенклатура проработана для одно- и двухсекционных жилых зданий серии III-III2, двух- и пятиэтажных зданий серии 464Вк, одноэтажных сельхоззданий типа коровников и гаражей при пролетах рам до 21м и шаге колонн до 6м, каркасно-панельных зданий из набора конструкций серии ИЮ4. Проработки выполнены на уровне технических решений и рабочих чертежей.

Верхний пояс фундамента формируется из типовых плит, в сборном или сборно-монолитном исполнении. Для жилых зданий фундамент приспособлен в случае разводки сантехнических коммуникаций по теплосюльям или техэтажу.

За счет создания неравномерности верхней плиты и введения промежуточных наклонных элементов могут формироваться четыре типа статических схем фундамента.

Наклонные панели фундамента, плоские, из тяжелого бетона класса В20, толщиной до 160мм, армированы легкими сварными сетками и плоскими монтажными каркасами. На боковых торцах панелей установлены накладные детали, через которые осуществляются расчетные соединения панелей по длине. В отношении проверок прочности наклонные панели рассматриваются как бетонные в поперечном направлении и как армированные внецентренно нагруженные в продольном направлении.

Сборные элементы нижних плит из тяжелого бетона класса В20, толщиной до 160мм армированы двумя плоскими сетками с рабочей арматурой в двух направлениях, плоскими монтажными каркасами и легкими гнутыми сетками у поверхностей вугов.

Сквозные диафрагмы содержат продольные пояса и стойки прямоугольного сечения, которые рассчитаны и запроектированы как растянутые или сжатые элементы. Армирование представлено пространственными каркасами, а также накладными деталями для расчетных соединений с наклонными панелями и нижними плитами.

Нижние плиты соединяются через выпуски рабочей арматуры внахлестку или петлями с последующим замоноличиванием. Наклонные панели опираются на вуги нижних сборных плит через слой раствора. Верхний стык наклонных панелей выполнен через слой раствора и бетонные шпонки, образованные в нишах для строповочных петель, которые при монтаже панелей соединяются на стальных пластинах. В верхнем стыке наклонных панелей образуются провады, достаточные для опирания сборных элементов верхней плиты.

По расходу материалов фундамент структурного типа на рассмотренных жилых и промышленных объектах строительства сопоставим или превосходит свайный, плитно-структурный и пространственный складчатый.

Третья глава посвящена разработке алгоритма и программного комплекса расчета пространственных фундаментов, составленных из пологих ребристых оболочек, имеющих дискретные связи конечной жесткости.

Железобетонная пологая ребристая оболочка представляется как многослойная. Оболочечный элемент, подкреплённый ребрами произвольного направления, моделируется как набор слоев бетона и арматуры. Жесткостные характеристики бетонных слоев принимаются как для ортотропных. Для армирующих слоев жесткостные характеристики вычисляются с приведением к базисным осям, с использованием преобразований С.Г. Дехницкого. Коэффициент Пуассона для армирующих слоев принят равным нулю. Стержни, не входящие в регулярную арматурную сетку, учитываются дискретно. Используя положения теории железобетона с трещинами Н.И. Карпенко, жесткостные характеристики всего сечения представлены суммой жесткостных характеристик слоев с учетом их расположения относительно базисной поверхности.

Физические зависимости для нелинейной задачи используются в форме полной матрицы "обобщенные усилия - деформации базисной поверхности" как для анизотропных оболочек.

$$N = A^* \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где  $N = (N_x, N_y, S_{xy}, M_x, M_y, 2H_{xy})'$ ,

$$\varepsilon = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}, \alpha_x, \alpha_y, \chi_{xy})'$$

$$A^* = |a_{ij}|, \quad \begin{matrix} i = 1, 2 \dots 6, \\ j = 1, 2 \dots 6, \end{matrix}$$

$a_{ij}$  - нелинейные интегральные функции, зависящие от напряженно-деформированного состояния конструкции.

Для бетонных слоев используется обобщенная диаграмма двухосного напряженного состояния в осях главных напряжений  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ , полученная Г. Купфером, Г. Хильсдорфом, Г. Ривем. В растянутой зоне бетон работает упруго до разрушения, в сжатой после достижения деформации  $\varepsilon / \varepsilon_c = 0.3$  бетон работает нелинейно. Нисходящая ветвь не учитывается. Коэффициент Пуассона вычисля-

ется по зависимости, предложенной Н. И. Карпенко.

В качестве критерия прочности выбраны условия Купфера-Герстля, позволяющие использовать стандартные характеристики бетона ( $R_b, R_{sk}$ ). Для армирующих слоев принимается гипотеза Мизеса, допуская, что они работают в условиях малых упруго-пластических деформаций. К ним применима деформационная теория пластичности Г. Генки-А. А. Ильшина с использованием диаграммы деформирования Прандтля. Геометрические зависимости приняты по теории Кирхгофа-Лява.

В качестве модели основания принята смешанная модель с переменными жесткостными коэффициентами по полю конструкции. В ее основу положена гипотеза В. З. Бласова. Для учета трения по подошве фундамента введены дополнительные коэффициенты. В случае расчета конструкции на основании, не обладающем распределительной способностью, обнуляется коэффициент постели на сдвиг.

Распределение коэффициентов постели по полю конструкции определяется на основании геологических изысканий и данных расчета теплового взаимодействия системы "основание - фундамент", определенных по методике Н. Б. Кутвицкой или по методике, разработанной на Игарской мерзлотной станции ИМЗ СО АН СССР.

Просадочность грунта при оттаивании учитывается переменностью условий контакта и величинами коэффициентов постели, с помощью дельта-функций и приближений, предложенных В. И. Обозовым. Физическая зависимость " $P - S$ " для основания описывается билинейным законом.

Пространственный фундамент структурного типа рассмотрен как многоконтактная система. Формулировка статической задачи для данной системы представлена вариационным уравнением Лагранжа с включением в него дополнительных граничных условий на линиях сопряжения элементов фундамента и связей:

$$\mathcal{E}_s(\bar{u}) = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i(\bar{u}) - \sum_{i=1}^m \int Q(\bar{u} - \bar{u}^*) ds - \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left( \frac{EF}{l} \right)_s (u_i^* + u_s^*)^2. \quad (2)$$

Наличие дополнительных граничных условий по линиям стыка:

$$\begin{aligned} N_{k+1} &= \hat{T} N_{k+1}, \\ u_{k+1} &= \hat{T} u_{k+1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $u_k = (\partial W / \partial n, w, u, v)'$ ,  $T$  - матрица поворота, накладывающая ограничения на вариационную задачу. Приведение ее к свободной выполняется с использованием метода общих решений,

показанного в работах Н. П. Абовского, Л. В. Енджиевского, А. П. Деруги:

$$\mathcal{E}_2(u_2) = \mathcal{E}[u, (u_1), u_2] \quad (4)$$

Нелинейный функционал Лагранжа линеаризуется по методу переменных параметров упругости. Решение выполняется шаговым методом с шагом по нагрузке и (или) по просадке основания. На шаге нагружения в осях главных напряжений ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) постоянно определяются границы упругой работы материалов в сечениях и глубина проникновения трещин. После вычисления интегральных нелинейных функций  $A_j$  методом Симпсона в точке, выполняется их поворот к базовым осям координат. В точке проверяется условие контакта конструкции с основанием и отслеживается диаграмма "P - S". Ширина раскрытия трещин определяется по формулам А. С. Залесова с учетом положений теории Н. Н. Карпенко.

Разработанный программный комплекс SNO5 позволяет рассчитывать составные конструкции с наличием дискретных связей и опор. Оболочечные ребристые элементы конструкции могут иметь вырезы и отверстия.

Программа состоит из модулей, выполняющих следующие функции: формирование исходной информации для решения задачи; вычисление коэффициентов шаблона уравнений равновесия; решение системы уравнений методом неполной релаксации; вычисление интегральных характеристик; определение ширины раскрытия трещин; вычисление внутренних усилий, напряжений и деформаций; вывод исходной информации на печать. Программный комплекс ориентирован на ЭВМ типа ЕС-1052. Исходная информация описывается с помощью входного языка.

Достоверность численных результатов доказывается сравнением с решениями Н. Н. Карпенко и экспериментальными данными о работе балки-стенки и плиты на изгиб; экспериментальными данными Ю. М. Гончарова для фундамента в виде складчатой оболочки. Получено хорошее качественное и удовлетворительное количественное совпадение результатов.

В четвертой главе приведены описание методики исследований на полкомасштабных моделях, результаты испытаний и основные выводы.

Исследования проводились на моделях пространственного фундамента структурного типа, выполненных из оргстекла СТ-1 в масштабе 1:20. Нагружение осуществлялось доикратно через распределительную систему. Моделировалась нагрузка от зданий: панель-

ного (464-ВМ), каркасно-панельного (ИИ-01) и каркасного одноэтажного (серия 1.822-1-2/82). Величина нагрузки контролировалась динамометром. При испытании моделировались однородное и два типа неоднородных. Основание первого типа характеризуется повышенной деформативностью краевых областей модели, второго типа - средней части.

Критерии подобия и условия моделирования определялись на основе теории расширенного подобия и методики, разработанной в НИИСКе Госстроя СССР В.Г.Тарасенком и Г.Б.Шараповым. Исходные данные для моделирования определялись по результатам стандартных испытаний материалов моделей конструкции и основания, по данным исследований В.М.Гончарова и геологических изысканий площадки (с. Бердигестях Якутской АССР).

Модель основания состоит из оттаивающей части, ограниченной снизу бетонным основанием определенной формы, и прослойки воздушно-сухого песка ( $E = 44.8$  МПа,  $\lambda = 10$  см). Оттаивающая часть основания моделировалась с помощью песчано-парафиновой смеси с подобранным соотношением 1:6.5. Такой состав смеси не деформируется в твердом состоянии и деформируется с относительной осадкой 0.063, близкой к постоянной в диапазоне давлений 15-35 кПа, при оттаивании. Форма бетонного основания и толщина слоя смеси определялась по данным расчета теплового взаимодействия основания со зданием и характеристиками грунта по геологическим изысканиям. Расчет теплового взаимодействия выполнен по методике, разработанной на Игарской научно-исследовательской мерзлотной станции.

Конструкция модели, нагрузка и основание симметричны относительно двух осей. Измерение перемещений модели осуществлялось 21 индикатором часового типа с ценой деления 0.01 мм. Деформации элементов определялись по показаниям 376 тензорезисторов с помощью тензометрической станции СНИТ-3М. Приборы расположены, в основном, на четверти модели. Обработка показаний тензорезисторов проводилась на ЭЭВМ согласно обобщенному закону Гука для изотропных пластин.

Проведено сравнение с результатами испытаний модели полносборного фундамента-оболочки, выполненных под руководством В.М.Гончарова. Оно показало меньшую деформативность разработанной конструкции и снижение усилий, что является следствием большей степени статической неопределенности.

Конструкция фундамента обладает значительной жесткостью. Верхняя плита во всех испытаниях находилась в плоском напря-

женно-деформированном состоянии, а ее разрезка на элементы и шарнирное соединение с наклонными элементами позволили избежать возникновения в них значительных по величине изгибающих моментов.

Наклонные элементы внецентренно-сжаты с эксцентриситетом, находящимся в пределах сечения, в коротком направлении. В продольном направлении наклонные элементы подвержены как сжатию, так и растяжению в соответствии с деформациями конструкции в целом.

Нелинейное распределение продольных внутренних усилий по высоте наклонного элемента свидетельствует о наличии сдвиговых деформаций.

Нижняя плита находится в "оболочечном" напряженно-деформированном состоянии. Плоское НДС формируется из-за передачи вертикальной нагрузки от наклонных элементов и деформирования фундамента в целом. Изгибное НДС имеет местный характер и зависит от величины и расположения вертикальной нагрузки.

Неравномерное деформирование основания практически не меняет качества НДС элементов фундамента.

Локальность нагрузки способствует закручиванию пар наклонных элементов при неравномерном деформировании основания.

При компоновке фундамента необходимо стремиться к равномерному распределению нагрузки на наклонные элементы.

При действии локальной нагрузки на фундамент структурного типа главную роль в формировании НДС элементов играют деформации конструкции в целом, а не отдельных элементов. В этом случае возможно появление растягивающих усилий в коротком направлении в наклонных элементах, стоящих на крайней оси.

Для снижения деформативности контурных зон необходимо создавать "затяжку" в верхнем поясе за счет верхних плит или диафрагм.

Распределение нагрузок на фундамент в соответствии с деформативными свойствами неоднородного основания способствует проявлению пространственного характера работы конструкции.

В пятой главе содержатся методики и результаты испытаний крупномасштабных фрагментов фундамента. В данных экспериментах проверена технология приготовления, транспортирования и монтажа элементов, изучено поведение образцов при статическом осевом и внецентренном действии вертикальной нагрузки, выявлены предельные состояния для всех элементов, изучены особенности работы наклонных панелей с ослаблениями в виде проемов, получены данные

о податливости соединений, дана оценка трещиностойкости и запасам прочности фрагментов фундамента.

Подготовлено и испытано 10 образцов, запроектированных на расчетную нагрузку 360 кН. Каждый из фрагментов включал нижнюю плиту и два наклонных элемента шириной 1 м. Армирование образцов и размеры сечений полностью соответствовали принятым в натурных конструкциях. Испытания проводились в условиях лаборатории, образцы помещались в стальной лоток на песчаное основание, нагрузки передавались от гидравлических домкратов, установленных на площадке верхнего стыка. Измерялись осадки образцов и перемещения в стыках, относительные деформации и ширина раскрытия трещин в бетоне элементов, реактивные давления основания.

При различных схемах загрузки в испытаниях достигнуты максимальные нагрузки 970 - 1310 кН. Предельные состояния фрагментов фундамента определяются достижением предела текучести в продольной арматуре нижних плит при чрезмерной раскрытии трещин. Разрушений стыков и наклонных панелей, в том числе ослабленных проемами, не обнаружено. Трещины, нормальные к продольной оси нижних плит, образовывались при нагрузках 260 - 480 кН.

Осадки фрагментов свидетельствуют об активном взаимодействии конструкции с основанием, сопровождающемся перераспределением внутренних усилий в нижних плитах.

Стыки наклонных элементов с нижней плитой испытывают сжатие с малыми эксцентриситетами. Верхний стык наклонных элементов при двух соединениях способен передать односторонние монтажные нагрузки.

По деформациям краевых волокон теоретически рассчитаны внутренние усилия в элементах образцов. При расчете приняты предположки плоского напряженного состояния, связь деформаций и напряжений устанавливалась по диаграммам, аппроксимирующим поведение бетона и арматуры в условиях одноосного растяжения или сжатия.

Для оценки достоверности разработанного программного комплекса проведено сравнение опытных и расчетных данных. В расчетной схеме элементы образцов, испытанных на осевое нагружение, разбиты сеточной областью с шагом 10 см по ширине и 16,5 см по длине, шаг по нагрузке начинался с момента образования трещин и был равен 100 кН. При качественном совпадении результатов расчета и испытаний отмечены количественные расхождения по осадкам до 10%, по давлению под подошвой в среднем до 30%, по продольным усилиям до 25%, по изгибающим моментам до 12%. Наибольшие



расхождения характерны для краевых участков нижних плит (в зоне анкеровки арматуры) и для наклонных панелей (из-за низких уровней напряжений и связанных с этим погрешностями измерений деформаций). В целом на расхождение результатов повлияла идеализация расчетной схемы применительно к стыкам элементов образцов фундамента. Сопоставление данных по ширине раскрытия трещин нижней плиты на участках стыков с наклонными элементами показало удовлетворительное совпадение результатов.

В шестой главе сформулированы рекомендации по проектированию пространственных фундаментов структурного типа, содержащие основные положения по компоновке фундамента из разработанных элементов, выбору расчетной схемы, конструированию и расчету на прочность элементов фундамента и узлов.

Приведены результаты технико-экономического сравнения фундамента структурного типа с традиционным (свайным) и аналогичным конструктивным решением (фундамент-оболочка).

Сравнение себестоимости и трудоемкости заводского изготовления выполнено для элементов фундамента: наклонных элементов (сплошного, с прямоугольным отверстием, с круглым отверстием), нижней плиты, свай СМЗ-30 и фундамента-оболочки.

Наиболее низкая себестоимость заводского изготовления 1 куб. м железобетона у свай и наклонного элемента с круглым отверстием. Средняя себестоимость железобетона на 1 куб. м по всем типам элементов фундамента ниже себестоимости фундамента-оболочки в 1.23-1.32 раза. При этом трудозатраты меньше на 39-56%. В сравнении со сваями снижение трудозатрат незначительное.

Сравнение технико-экономических показателей проведено на ряде объектов с различной этажностью и конструктивной схемой. Для зданий с нагрузкой на обреш фундамента более 50 кН/кв. м применение фундамента структурного типа эффективнее свайного длиной свыше 6-8 м. При нагрузке от здания менее 25 кН/кв. м предлагаемый фундамент эффективнее свайного при длине свай свыше 12 м. Применение поверхностных фундаментов (фундамента-оболочки и разработанной конструкции) в сравнении со свайным снижает себестоимость монтажных работ по нулевому циклу в 1.33-2.56 раза для рассматриваемых объектов. Сокращается расход основных материалов: арматуры - на 21-57% по сравнению со свайными фундаментами и на 8-20% в сравнении с фундаментом-оболочкой; цемента - на 12-45% в сравнении со свайным, на 5-22% в сравнении с фундаментом-оболочкой.

Использование пространственного фундамента структурного

типа позволяет получить экономический эффект до 140 руб/кв.м в сравнении со свайными и до 10 руб/кв.м в сравнении с фундаментом-оболочкой (Гончарова Ю.М.). Эффект от его применения взамен свайных фундаментов будет увеличиваться при повышении стоимости разработки грунта до 2,43 раза для грунтов жесткой категории.

### Основные результаты и выводы

1. На основе анализа существующих конструкций пространственных фундаментов разработаны принципы компоновки и конструирования пространственных фундаментов структурного типа. Разработана номенклатура элементов, позволяющая компоновать фундаменты под панельные здания с шагом поперечных стен 2,6-4,5м различной этажности, рамно-связевые здания пролетом 9, 12, 15, 18, 21 м с шагом несущих конструкций здания 6м и каркасно-панельные с сеткой колонн 3x3, 6x6 м.

Использование разработанных конструкций в строительстве дает возможность сократить расход основных материалов на фундаменты: арматуры в 1,2-2,3 раза, цемента в 1,33-1,72 раза.

2. Для проведения численного анализа и проектирования пространственных составных фундаментов с дискретными связями разработан алгоритм расчета и программный комплекс ЭН05. Алгоритм расчета основан на вариационно-разностном методе в форме метода конечных разностей. В программе реализована модель основания, позволяющая учесть появление зон отсутствия контакта между основанием и конструкцией, неоднородность основания. Предложенная модель позволяет отразить физическую нелинейность по билинейному закону.

Достоверность результатов, получаемых по программе, подтверждается сопоставлением с экспериментальными и теоретическими данными, полученными автором и другими исследователями.

3. Подобраны параметры песчано-парафиновой смеси, моделирующей оттаивающее основание. На мелкомасштабных моделях исследовано:

- напряженно-деформированное состояние конструкции фундамента и ее элементов при действии нагрузок с различными схемами приложения;

- выявлены тенденции изменения напряженно-деформированного состояния конструкций и их элементов при двух формах чашки оттаивания модели основания.

4. Испытания десяти крупномасштабных фрагментов фундаментом позволили:

- показать возможность изготовления элементов на действующих предприятиях железобетона без изменения технологических схем и транспортирования на автомобильном транспорте;

- изучить поведение конструкции при различных нагрузках, оценить податливость стыков и соединений;

- оценить трещиностойкость и характер разрушения в предельном состоянии;

- исследовать наклонные элементы с ослаблениями, возможность применения которых доказана испытаниями;

- изучить взаимодействие фрагмента фундамента с песчаным основанием;

- подтвердить достоверность расчетов, выполненных по разработанному программному комплексу, получив удовлетворительную сходимость результатов расчета с экспериментальными данными.

5. По результатам экспериментально-теоретических исследований сформулированы рекомендации по расчету и конструированию фундаментов структурного типа и их элементов. Проведена технико-экономическая оценка конструкций в условиях заводского изготовления и строительства. Определены конструктивные схемы зданий, для которых фундаменты структурного типа эффективны. В сравнении со свайным фундаментом определена эффективность фундамента в зависимости от мерзлотно-геологических условий. Экономический эффект от применения разработанной конструкции пространственного фундамента составляет 8-70 руб. на 1 кв. м площади плана здания.

6. Предлагаемые конструкции и программный комплекс нашли применение при проектировании фундаментов зданий в районах Крайнего Севера Красноярского края и Якутской АССР.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Марионов А.А., Попович А.П. Вариационно-разностный метод расчета конструкций на упругом основании // Пространственные конструкции в Красноярском крае /КПИ. - Красноярск, 1985. - С. 152-158.

2. Попович А.П. Пространственный фундамент структурного типа // Пространственные конструкции в Красноярском крае /КПИ. Красноярск, 1986. - С. 119-126.

3. Попович А.П., Колдышев В.П. Эффективная конструкция пространственного вентилируемого фундамента для вечнотерральных

грунтов //Актуальные проблемы строительства: В 2-х ч., ч.2. -Воронеж, 1987. -С.57-59.

4. Попович А.П., Ларионов А.А., Колдыря В.И. Эффективность пространственных вентилируемых фундаментов на подсыпках //Пространственные конструкции в Красноярском крае /КТИ. Красноярск, 1987. -С. 137-140.

5. Попович А.П. Испытания моделей пространственного фундамента структурного типа на оттаивающем основании //Прогрессивные методы строительства и разработка высокоэффективных промышленных конструкций в Красноярском крае. - Красноярск, 1988. - С.74-77.

6. Бердичевский Ю.В., Попович А.П. Исследования поверхностных вентилируемых фундаментов на вечномёрзлых грунтах // Исследования мерзлых толщ и криогенных явлений. -Якутск, 1988. - С.115-122.

7. Енджиевский Л.В., Ларионов А.А., Попович А.П. Расчет железобетонных ребристых оболочек с учетом физической нелинейности и трещинообразования //Нелинейные методы расчета пространственных конструкций. -М., 1988. - С.69-80.

8. Попович А.П., Колдыря В.И., Ларионов А.А., Гончаров Ю.М. Пространственный вентилируемый фундамент на подсыпке: Информационный листок о научно-техническом достижении И 89-15 /Красноярский межотр. территор. ЦНТИ. - Красноярск, 1989. - 3с.



Подписано к печати 27.02.90 г. АЛ 00167 Объем 1.0 п. л.  
Тираж 100 экз. Заказ № 11915 Бесплатно

Полиграфическое объединение "Сибирь"  
г. Красноярск, пр. Мира, 93