

На правах рукописи



**Архипов Василий Анатольевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ГЛУБИННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВЫХ  
ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

05.23.08 –Технология и организация строительства

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

Омск –2005

Работа выполнена в Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ)

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Сиротюк Виктор Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Мосаков Борис Степанович

доктор технических наук  
Пономаренко Юрий Евгеньевич

Ведущая организация – Южно-Уральский государственный университет, „  
кафедра „Технология строительного производства

Защита состоится 26 декабря 2005 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.250.01 при Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ) по адресу: 644080, г. Омск-80, пр. Мира, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СибАДИ.

Отзывы в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета.

Телефон для справок: (3812) 65-01-45; 65-27-00. Факс: (3812) 65-03-23;  
e-mail: info@sibadi.org

Автореферат разослан 25 ноября 2005 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, проф.



В.В. Сиротюк

2006-4  
27401

2250320

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В последние годы наблюдается существенное увеличение объёмов и темпов строительства зданий и сооружений. Строительство в климатических и грунтово-гидрологических условиях России связано с обязательной подготовкой оснований и устройством фундаментов. При этом часто объекты расположены на значительном удалении от баз и предприятий строительной индустрии. Кроме того, во многих регионах отсутствуют местные строительные материалы, недостаточно развита транспортная сеть. Поэтому на сооружение надёжных оснований и фундаментов затрачивается от 15 до 30 % средств, выделяемых на строительство объектов.

Одним из путей, способствующих снижению стоимости строительства, является глубинное термическое укрепление грунтовых оснований. Важным преимуществом термического укрепления является низкая материалоемкость получаемых конструкций и минимальная потребность в транспортных затратах. Этот способ технической мелиорации грунтов известен давно. Однако в традиционном виде он не находит широкого применения из-за значительных ограничений, связанных с грунтово-гидрологическими условиями, структурными, текстурными особенностями сложения, видом, влажностью и генезисом грунтов.

Исследования, проведенные в СибАДИ под руководством В.В. Сиротюка и при участии соискателя, позволили разработать новую, более эффективную плазменную технологию глубинного термического укрепления грунтовых оснований зданий и сооружений.

**Основная идея работы** состоит в повышении эффективности строительства оснований зданий и сооружений с использованием плазменной технологии глубинного термического укрепления грунтов за счёт управления интенсивным высокотемпературным потоком плазмы на разных этапах технологического процесса.

**Объектом исследования** является технология глубинного термического укрепления грунтовых оснований зданий и сооружений.

**Предмет исследования** – параметры технологического процесса термического укрепления грунтовых оснований с помощью модернизированного генератора низкотемпературной плазмы.

**Цель диссертационной работы:** развитие научных положений и повышение практических результатов плазменной технологии глубинного термического укрепления грунтовых оснований зданий и сооружений.

### **Задачи исследования:**

– развить теоретические предпосылки технологии глубинного термического укрепления грунтовых оснований тепловым генератором с управляемым потоком низкотемпературной плазмы

3

РАСЫЛКА
БИБЛИОТЕКА
С.Петербург
99 100 200

953

- проверить теоретические положения и экспериментально обосновать эффективные параметры технологического процесса с использованием модернизированного генератора плазмы;
- апробировать предложения по технологии производства работ на экспериментальной строительной площадке;
- дать энергетическую и экономическую оценку предлагаемых решений.

**Научная новизна** исследования заключается в развитии научных положений плазменной технологии глубинного термического укрепления грунтовых оснований:

- обоснован один из путей повышения эффективности плазменной технологии глубинного термического укрепления грунтовых оснований за счёт управления потоком низкотемпературной плазмы;
- предложены новые конструктивно-технологические решения при строительстве термически укрепленных оснований зданий и сооружений;
- рекомендована конструкция электродов генератора плазмы (основного орудия технологического воздействия), позволяющая реализовать новый технологический приём глубинного термического укрепления грунтовых оснований.

**Автор защищает** совокупность технологических решений и научных положений, на базе которых усовершенствована плазменная технология глубинного термического укрепления грунтовых оснований зданий и сооружений.

**Практическая значимость работы** состоит в расширении возможностей устройства оснований при строительстве и ремонте зданий и сооружений в районах, удалённых от предприятий строительной индустрии, за счёт использования местных грунтов, подвергнутых глубинной плазменной термообработке непосредственно на строительной площадке. С этой целью усовершенствована плазменная технология; определены рациональные технологические приёмы и параметры термической обработки грунтов, обеспечивающие требуемое качество укрепленных оснований.

**Достоверность** основных положений, выводов и рекомендаций обоснована использованием в теоретических исследованиях фундаментальных, достоверно установленных научных положений; соблюдением основных принципов физического и математического моделирования; необходимым объемом экспериментальных данных, полученных с использованием современных приборов и оборудования.

Экспериментально-теоретические положения проверены при изготовлении термогрунтовых свай на опытной строительной площадке. Данные о фактической несущей способности свайных оснований определены путем непосредственных испытаний по ГОСТ 5686, выполненных независимой лицензированной организацией.

**Апробация работы.** Материалы исследования обсуждались на конференциях: I Всероссийская международная научно-техническая конференция «Автомобильные дороги Сибири», СибАДИ (Омск, 1994); Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы строительного материаловедения», КГАСА (Казань, 1996); Международная научно-техническая конференция молодых ученых ГАСУ (Санкт-Петербург, 1996); Международная научно-техническая конференция «Город и транспорт», СибАДИ (Омск, 1996); II Международная научно-техническая конференция «Автомобильные дороги Сибири», СибАДИ (Омск, 1998); Международная научно-техническая конференция «Дорожно-транспортный комплекс как основа рационального природопользования», СибАДИ (Омск, 2005).

**Публикации.** Основные положения диссертационного исследования опубликованы в 12 научных работах (2 журнальные статьи, 6 тезисов докладов, 4 статьи в сборниках научных трудов).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографии. Результаты исследования изложены на 183 страницах машинописного текста, включающего 77 рисунков, 20 таблиц, библиографический список из 172 работ.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*В первой главе* диссертации рассмотрено состояние вопроса, определены цель и задачи исследования.

Исторический анализ позволяет констатировать, что развитие методов глубинного термоукрепления грунтовых оснований шло по пути интенсификации технологического процесса за счёт увеличения плотности теплового потока и температуры теплоносителя. При этом в основном скважина (полость) рассматривалась как своеобразный канал для нагнетания раскалённых газов в поровую структуру обжигаемого грунтового массива.

На первом историческом этапе для получения тепловой энергии сжигали уголь, дрова, а термообработку грунтов вели при температуре до 1000–1200 °С.

На втором этапе (с 20-х годов XX в.) были разработаны теоретические предпосылки и практические методы термоупрочнения грунтовых оснований за счёт тепловых потоков, генерируемых при сжигании жидких и газообразных углеводородных топлив в форсунках и горелках. При этом температуру теплоносителя удалось поднять до 2500 °С. У истоков этого направления технической мелиорации грунтов стояли видные учёные: М.М. Филатов, П.А. Замятченский, В.В. Охотин, К.К. Гедройц, С.С. Морозов, В.М. Безрук, Н.А. Осташев, А.А. Стороженко, А.Ф. Беляков, И.М. Литвинов, П.К. Черкасов, А.П. Юрданов и др. Значительный вклад в раз-

витие методов глубинного термоукрепления грунтов внесли научные коллективы институтов ЮЖНИИГМа, МИСИ, НИИОПС, НИИСК, ГПИФундаментпроект, ПромстройНИИПроект, ХабИИЖТ, ВИА, МГУ и др.

Третий этап развития технологии термоукрепления грунтовых оснований (с 50-х годов XX в. по настоящее время) характеризуется замещением топливосжигающих устройств электротермическими генераторами, что интенсифицировало технологические процессы за счёт увеличения температуры теплоносителя до 5000 °С и более. Появились приборы, использующие СВЧ-энергию термического воздействия. В этом направлении работали учёные: Д.С. Слободин, А.С. Трегуб, В.М. Сырых, И.В. Степура, В.С. Шибаева, Ю.И. Спектор, Л.А. Бабин, М.М. Валеев и др.

40 лет назад начаты поисковые исследования по использованию в строительных технологиях генераторов низкотемпературной плазмы. Значительный вклад в развитие плазменного оборудования внесли учёные ИТФ СО РАН под руководством М.Ф. Жукова, А.С. Аньшакова, А.Н. Тимошевского. В 80-е годы XX в. появились первые публикации об использовании генераторов низкотемпературной плазмы для глубинной термообработки грунтов. Г.А. Задворнев и Б.М. Зарубин предлагали заменить топливосжигающие устройства на струйные электродуговые плазмотроны, размещённые в устье скважины, то есть без изменения ранее известных технологических приёмов. Более 35 лет ведутся исследования по плазменным строительным технологиям. В ТГАСУ под руководством Г.Г. Волокитина, В.Н. Ефименко, Н.К. Скрипниковой разработана технология обжига гранулированных связанных грунтов в специальном реакторе с использованием струйных электродуговых плазмотронов для получения зернистых керамических материалов.

В СибАДИ поисковые исследования по плазменным строительным технологиям начались в 1987 г. при консультациях учёных ТГАСУ, ИТФ СО РАН, ОмГУ. В 1992 г. В.В.Сиротюк предложил новую плазменную технологию глубинного термического укрепления грунтовых оснований (Патент № 2062831). Соискатель принимал непосредственное участие в экспериментальных работах по этой технологии.

*Вторая глава* посвящена моделированию технологического процесса термического воздействия на грунтовое основание. Кроме того, в данной главе представлены закономерности изменения фазового состава, структуры и свойств грунтов в процессе их термической обработки.

В основе термического укрепления лежат физико-химические процессы, происходящие в грунтах под воздействием положительного температурного поля. Главными факторами, определяющими глубину и необратимость физико-химических процессов, являются величина температуры, до которой нагревается грунт, и продолжительность изотермического состояния. Управлять этими факторами можно за счёт изменения параметров ис-

точника термического воздействия, параметров грунта и параметров взаимодействия орудия и предмета труда. Математическое моделирование даёт возможность исследовать и прогнозировать рациональное сочетание элементов рассматриваемой технологической системы и принимать эффективные конструктивно-технологические решения при термическом укреплении грунтовых оснований зданий и сооружений.

В предлагаемой плазменной технологии глубинного термоукрепления грунтов выделено два основных этапа: активный и пассивный.

Активный этап технологического процесса включает два периода. Во-первых, грунт в массиве, окружающем скважину, нагревается мощным источником термического воздействия. Во-вторых, этот источник нагревает грунт, подаваемый в скважину (зону реактора), дозатором.

Во время пассивного этапа тепловая энергия, аккумулированная в силикатном расплаве, находящемся в скважине, передаётся в грунтовый массив.

В теплофизической постановке первый период активного этапа термического воздействия на грунтовый массив может быть представлен следующим образом. Температурное поле в любой точке технологического слоя, расположенного вблизи цилиндрической полости с радиусом  $R$ , находящейся в грунтовом массиве, формируется под влиянием положительного теплового источника  $q$  (плазмотрона). Начальная температура  $T_0$  в полости и массиве одинакова. На бесконечном удалении от цилиндрической полости температура не изменяется и равна начальной.

Вектор теплового потока, порождённый тепловым источником, действует в радиальном направлении. Точечный тепловой источник равномерно движется вдоль оси цилиндрической полости со скоростью  $v$  и воздействует на каждое элементарное сечение  $\Delta h$  в течение времени  $t = \Delta h / v$ .

В этом случае наиболее корректна постановка задачи с граничными условиями второго рода при заданной интенсивности теплового потока.

Задача распределения температурного поля по текущему радиусу  $r$  за время действия  $t$  теплового потока  $q$  сводится к решению известного дифференциального уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

при начальных и граничных условиях

$$T|_{t=0} = T_0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = q, \quad T|_{r=\infty} = T_0. \quad (2)$$

Решение этой задачи сведено к решению известного уравнения

$$\frac{\lambda(T-T_0)}{qR} = 2\sqrt{\frac{Fo}{\eta}} \left[ \operatorname{ierfc} \frac{\eta-1}{2\sqrt{Fo}} - \frac{(3\eta+1)\sqrt{Fo}}{4\eta} \right], \quad Fo \equiv \frac{at}{R^2}, \quad \eta \equiv \frac{r}{R}. \quad (3)$$

Величина теплофизических показателей грунта существенно зависит от температуры. Поэтому при численном моделировании использовались эффективные теплофизические показатели: температуропроводность  $a$  и теплопроводность  $\lambda$ , полученные на основе экспериментальных данных. Корректность данного подхода существенно возрастает, если эффективные теплофизические характеристики рассматриваются как функции физического состояния объекта.

В результате наших исследований установлено, что радиальный тепловой поток нагревает грунт стенки скважины до температуры плавления в течение нескольких минут. Силикатный расплав стекает на дно скважины, образуя уширение лидерной скважины, которое впоследствии заполняется грунтовым расплавом. Наличие уширения в теле набивных свай является позитивным фактором, увеличивающим их несущую способность.

Для более эффективного выполнения данного технологического приема целесообразно управлять направлением и интенсивностью термического плазменного потока. Для этого в диссертационном исследовании предлагается изменить форму внутреннего электрода плазмотрона и изготавливать его в виде втулки Т-образной формы (рис. 1).

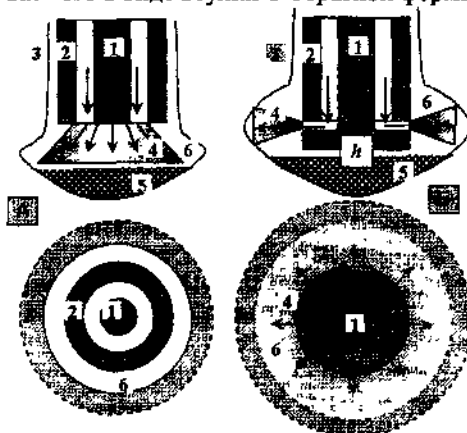


Рис 1 Схемы формирования плазменного факела при обычном (А) и модернизированном (Б) электродах погружного плазмотрона. 1 – внутренний электрод, 2 – внешний электрод, 3 – грунтовой массив, 4 – плазменный факел; 5 – силикатный расплав; 6 – скважина с выплавляемым уширением;  $h$  – толщина Т-образного элемента

По нашим расчетам, это изменение конструкции электрода плазмотрона позволяет увеличить плотность теплового потока, передаваемого в радиальном направлении, в течение первого периода активного этапа термической обработки в 1,3...1,5 раза, что, в свою очередь, способствует увеличению диаметра уширения без существенного увеличения времени термообработки и величины энергетических затрат.

По прошествии определённого времени, вследствие электротермической эрозии графита, нагреваемого до  $(5...6) \cdot 10^3$  °С, Т-образный электрод



постепенно превращается в обычный стержневой и плазменный факел направляется вниз, т.е. плазмотрон работает по обычной схеме (см. рис.1, А). Продолжительность эрозии Т-образного электрода зависит от величины тока, вида и расхода плазмообразующего газа, длины электрода, стойкости графита и толщины насадки.

Только с этого периода в скважину с помощью дозатора подаётся грунт, т.е. начинается второй период активного этапа технологического процесса. Будем считать, что рассматриваемый процесс является непрерывным, равномерным и стационарным. Весь подаваемый грунт проходит стадию плавления. Тогда интенсивность подачи грунта в зону реактора  $\Pi_n$  должна соответствовать интенсивности его плавления  $\Pi_{пл}$ :

$$\Pi_n = \frac{m_n}{t_n} = \frac{m_{пл}}{t_{пл}} = \Pi_{пл}, \quad (4)$$

где  $m_n$  и  $m_{пл}$  – соответственно масса подаваемого и плавленого грунта,  $t_n$  и  $t_{пл}$  – время подачи и плавления данного грунта

Производительность технологического процесса определяется плотностью теплового потока от плазмотрона и свойствами грунта. Энергию, затрачиваемую при этом,  $Q$  можно представить как произведение энергетической мощности плазмотрона  $P$  на время его работы  $t$ . Указанная энергия тратится на испарение воды, термическую модификацию грунта, теряется на нагрев воды в системе охлаждения плазмотрона и уходит с отработанным плазмообразующим газом (воздухом). В расчётах учтено, что термической модификации подвергается не только грунт, подаваемый из дозатора, но и грунтовый массив на некотором расстоянии от стенки скважины. Вокруг неё образуется ряд слоёв с различным уровнем термической модификации: зона аморфизации образуется по радиусу  $R_a$ , зона спекания  $R_c$ , зона дегидроксиляции  $R_o$ , зона осушения  $R_o$ . Зона, в которой грунт проходит стадию плавления, имеет радиус  $R_{пл}$ . Суммарная величина расходуемой тепловой энергии складывается из восьми составляющих:

$$\begin{aligned} Q_1 &= m_1(C_1\Delta T_1 + q), & Q_2 &= m_2(C_2\Delta T_2 + q), & Q_3 &= m_3C_3\Delta T_3, \\ Q_4 &= m_4C_4\Delta T_4, & Q_5 &= m_5C_5\Delta T_5, & Q_6 &= m_6C_6\Delta T_6, & (5) \\ Q_7 &= Wm_1(C_W\Delta T_7 + q_W) + m_7(C_W\Delta T_7 + q_W), & Q_8 &= m_8C_W\Delta T_8, \end{aligned}$$

где  $m_1$  .  $m_5$  и  $C_1$  .  $C_5$  – массы и удельные теплоёмкости плавленого грунта и грунта каждой из четырёх стадий термической модификации, кг и Дж/(кг·град);  $\Delta T_1$  .  $\Delta T_5$  – величины приращения температуры каждого из рассматриваемых тел, град;  $C_6$  и  $C_W$  – удельные теплоёмкости отходящих газов и воды, Дж/(кг·град);  $q$  и  $q_W$  – скрытая теплота фазового перехода при плавлении грунта и испарении воды, Дж/кг;  $m_6$  – масса нагреваемого газа, кг,  $m_7$  и  $m_8$  – массы воды, нагреваемой в грунте и в системе охлаждения плазмотрона, кг;  $W$  – влажность грунта в долях единицы.

Исходя из уравнения теплового баланса, после некоторых преобразо-

ваний производительность технологического процесса изготовления термобрунтовой сваи во время второго периода активного этапа технологического процесса можно определить из уравнения

$$\begin{aligned}
 P_{нн} = & \{Pk - \pi v\{(R_a^2 - R_{нн}^2)\delta_2(C_2\Delta T_2 + q) + (R_c^2 - R_a^2)\delta_3C_3 + \\
 & + (R_d^2 - R_c^2)\delta_4C_4\Delta T_4 + (R_o^2 - R_d^2)\delta_5C_5\Delta T_5 + W(C_w\Delta T_7 + q_w) \times \\
 & \times [(R_a^2 - R_{нн}^2)\delta_2 + (R_c^2 - R_a^2)\delta_3 + (R_d^2 - R_c^2)\delta_4 + (R_o^2 - R_d^2)\delta_5] \} - \\
 & - Y_e\delta_eC_e\Delta T_e - Y_w\delta_wC_w\Delta T_w \times [C_1\Delta T_1 + q + W(C_w\Delta T_7 + q_w)]^{-1}.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Численные значения параметров, необходимых для определения производительности технологического процесса по вышеприведённой формуле, определены по результатам экспериментальных работ, выполненных на лабораторных стендах и в натуральных условиях, по справочным данным, путём расчётов.

Уравнение (6) справедливо при граничных условиях:

$$W \leq 0,77W_m, \quad 2D_n \geq R_{нн} \geq 1,15D_n, \quad d_{max} \leq 0,01m,$$

где  $W_m$  – влажность грунта на границе текучести;  $D_n$  – диаметр погружного плазмотрона,  $d_{max}$  – максимальный размер фракции грунтовых агрегатов, подаваемых в скважину

Во время этапа термообработки, который условно назван нами пассивным, происходят остывание грунтоплавленого тела и передача аккумулированной в нём тепловой энергии в окружающий массив. Учитывая высокую начальную температуру (2200...2700 °С) и плотность силикатного расплава (до 2,8 г/см<sup>3</sup>), количество аккумулированной энергии значительно. Эта энергия нагревает грунт, окружающий скважину, что приводит к термической модификации грунта в массиве и увеличению размеров термостолба без дополнительной затраты тепловой энергии.

При решении этой задачи исследуемый теплофизический процесс рассматривался как нестационарный. Численное моделирование выполнялось в трёхмерной нелинейной постановке. В качестве инструмента для расчётов использован программный комплекс TEMPER-3D, который был разработан в СибАДИ для расчётов нестационарных нелинейных температурных полей в трёхмерной постановке с переменными граничными условиями различных типов методом конечных элементов (КЭ).

Указанный программный комплекс базируется на определённой методике расчёта. Температурное поле трёхмерного тела описывается дифференциальным уравнением

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (7)$$

с граничными условиями:  $T = T_1(x, y, z, t)$  на части границы  $S_1$  (граничное условие первого рода);  $\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} L_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} L_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} L_z = q(x, y, z, t)$  на части границы  $S_2$  (граничное условие второго рода);  $\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} L_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} L_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} L_z = \alpha(T_c - T_s)$  на части границы  $S_3$  (граничное условие третьего рода),

где  $x, y, z$  – декартовы координаты;  $T$  – температура,  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – коэффициенты теплопроводности материала в направлениях  $x, y, z$ ;  $q(x, y, z, t)$  – плотность распределения источников тепла;  $S_1, S_2, S_3$  – непересекающиеся части, образующие всю границу массива;  $T_1$  – температура, которая поддерживается на поверхности  $S_1$ ;  $q$  – тепловой поток через поверхность  $S_2$ ;  $T_c$  – температура среды на  $S_3$ ;  $T_s$  – температура тела на  $S_3$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на  $S_3$ ;  $L_x, L_y, L_z$  – направляющие косинусы нормали к границе

На рис.2 представлено графическое отображение результатов численного моделирования в виде изолиний температурного поля, сформировавшегося в скважине, заполненной остывающим расплавом, и в слоях грунтового массива на определённых промежуток времени.

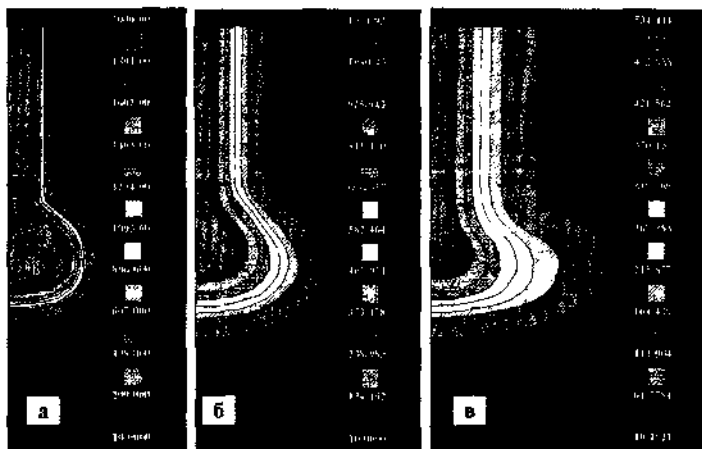


Рис 2. Динамика температурных возмущений в грунтовом массиве через: а – 2 часа; б – 12 часа, в – 24 часа после заполнения скважины силикатным расплавом

Сопоставление закономерностей формирования изолиний температурного поля, полученных расчётным путём с экспериментальными данными, свидетельствует об их хорошей сходимости ( $\pm 15\%$ ). Окончательное формирование термостолба завершается через 10...14 часов после заполнения скважины силикатным расплавом. Общий объём термостолба в 2..3 раза превышает объём грунтоплавленного тела.

Вторая часть главы посвящена изучению закономерностей изменения фазового состава, структуры и свойств грунтов в процессе их термической обработки.

Мы выделяем шесть основных стадий изменения свойств грунтов в процессе термического воздействия низкотемпературной плазмой: первая (50...250 °С) – осушение (дегидратация) грунтов; вторая (200...700 °С) – нагрев минеральной части (дегидроксиляция); третья (600...1200 °С) – обжиг минеральной части (спекание); четвертая (1100...1650 °С) – плавление минеральной части (аморфизация); пятая (1500...2500 °С) – нагрев силикатного расплава (вплоть до начала его испарения); шестая (2500...20 °С) – охлаждение и твердение расплава. Границы стадий изменяются и зависят от длительности нагрева, скорости повышения (снижения) температуры и вида обрабатываемого грунта. На протяжении всех стадий меняется тип структурных связей в грунтах – от коагуляционных к конденсационным и криптокристаллизационным. С повышением температуры воздействия строительные свойства грунтов улучшаются сначала обратимо, а затем, после спекания, коренным образом и необратимо (рис.3).

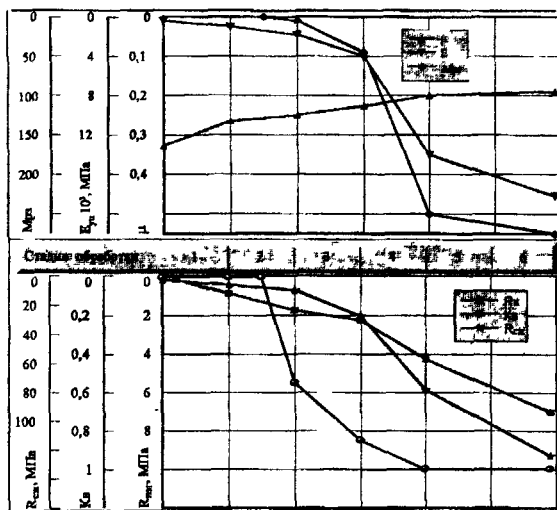


Рис.3 Изменение физико-механических свойств грунта по стадиям термической обработки:  $E_{упр}$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $K_v$  – коэффициент водостойкости,  $R_{сж}$  – предел прочности при сжатии,  $R_{из}$  – предел прочности при растяжении при изгибе;  $M_{рз}$  – морозостойкость, циклы

После пятой стадии вид и состав грунта уже не играют решающего влияния на физико-механические свойства получаемого материала.

На различных стадиях плавления пористость грунта может изменяться от 1 до 40 %. Плотность плавленого грунта может иметь большой разброс по абсолютной величине – от 2,8 (при минимальной пористости) до 1,2 г/см<sup>3</sup> (при максимальной). Закрытая пористость и водонепроницаемость предопределяют низкое водопоглощение плавленого грунта – не более 0,1 % по массе. Управляя процессом пориза-

пии, можно повышать производительность глубинного плазменного термоупрочнения грунтов.

Наиболее значима для формирования требуемых качеств термогрунта шестая стадия – охлаждение и твердение расплава. В зависимости от состава силикатного расплава и режима его охлаждения можно получать материал с разным уровнем закристаллизованности. Предел прочности при сжатии материала тесно связан с режимом охлаждения и может меняться на порядок – от 10 до 200 МПа. Реальная прочность, достигнутая нами на строительной площадке, составляет 100...130 МПа. Испытания показали, что получаемый материал имеет высокую коррозионную стойкость не менее 95 % и морозостойкость более 300 циклов.

*В третьей главе* представлены методики экспериментальных исследований с использованием методов планирования эксперимента, дисперсионного и регрессионного анализов. Основным критерием эффективности технологических режимов выбраны показатели – интенсивность плавления грунта ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) и удельные энергозатраты ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ ).

Технологические задачи включали три группы факторов: вид и параметры грунтов, режимы работы плазмотрона, параметры взаимодействия. Термической обработке подвергали двадцать видов и разновидностей грунтов (от мелкого песка до тяжёлой глины). Основная часть экспериментальных исследований велась на лабораторных стендах, оборудованных измерительной аппаратурой и плазмотронами МПГ и МПГ-П.

Стендовые испытания позволили проверить достоверность теоретических предпосылок и установить ряд корреляционных зависимостей и закономерностей, например:

- плавление верхнего слоя грунта наступает через 20...30 с; наиболее эффективна термообработка с непрерывной подачей грунта на горячий расплав; длительный нагрев грунтов плазмотроном не эффективен;

- термической обработке плазмотроном можно подвергать любые виды и разновидности грунтов; с увеличением числа пластичности грунта эффективность термообработки возрастает; наиболее эффективно обрабатывать рыхлый грунт с размером агрегатов до 20 мм; увеличение влажности грунта снижает эффективность его термической обработки;

- при определённых режимах термообработки можно получать пористый материал, что существенно (до 50 %) повышает производительность технологического процесса и снижает удельные энергозатраты; за счёт управления технологическими режимами пористость и прочность материала могут меняться по длине термогрунтового тела;

- с увеличением расстояния до обрабатываемой поверхности более чем 3...4 см эффективность термического воздействия значительно снижается;

- параметры работы плазмотрона существенно влияют на интенсив-

ность плавления грунта (рис.4); повышение мощности плазмотрона пропорционально увеличивает интенсивность термической обработки.

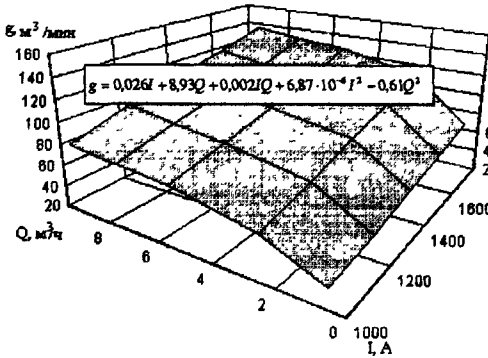


Рис 4 Зависимость интенсивности плавления грунта  $g$  от силы тока  $I$  при изменении расхода плазмообразующего газа  $Q$

При замене центрального электрода на модернизированный (см. рис.1) диаметр уширения скважины увеличивается быстрее (рис.5).

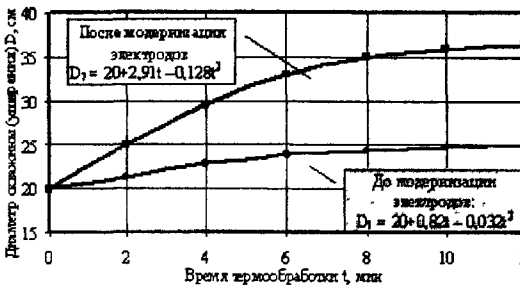


Рис.5 Изменение диаметра скважины  $D$  (уширения) в зависимости от времени термообработки  $t$

Расчёты, основанные на экспериментальных данных, позволили определить размер  $h$

T-образного электрода при использовании графита БСГ-30 (рис.6)

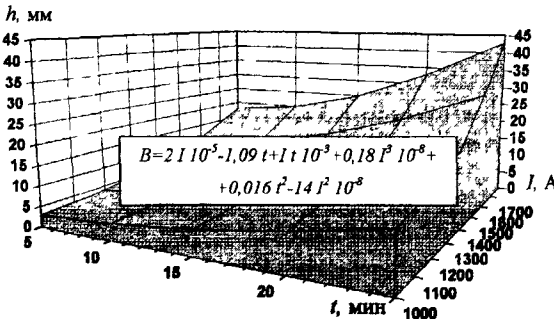


Рис 6 Зависимость размера  $h$  электрода от силы тока  $I$  и требуемого времени  $t$  работы плазмотрона с радиальным направлением факела

После работы плазмотрона свыше времени, указанного на графике, центральный электрод постепенно приобретает стержневую форму вследствие сублимации (эрозионного износа) графита.

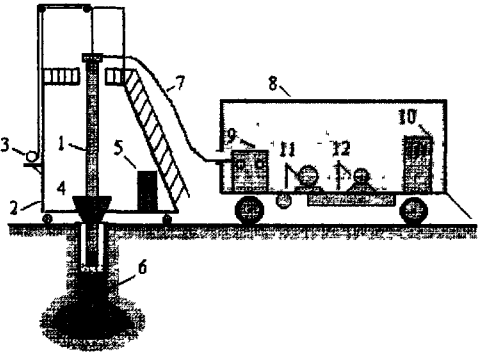
Уширение сваи можно устраивать в любом сечении по высоте, приурочивая его к слою грунта с наибольшей несущей способностью. Диаметр

уширения может составлять 3...3,5 диаметра лидерной скважины

При остывании силикатного расплава до 1000...1200 °С в голову сваи можно погружать стальные арматурные стержни диаметром не менее 12 мм. После остывания сваи эти стержни прочно удерживаются в теле из плавленого грунта. Данное конструктивно-технологическое мероприятие позволяет улучшить сопряжение грунтоплавленной сваи с насадкой из цементабетона.

**Четвертая глава.** Теоретические и экспериментальные исследования позволили составить техническое задание и изготовить комплект механизмов для опытной проверки полученных результатов в условиях строительной площадки (рис.7).

Рис 7 Схема установки для глубинной термообработки грунтов: 1 – погружной плазмотрон; 2 – передвижная рама; 3 – система подъема плазмотрона; 4 – дозатор грунта; 5 – выносной пульт управления; 6 – скважина с уширением и грунтовым расплавом; 7 – водоохлаждаемые кабели; 8 – плазмообразующая станция; 9 – блок питания; 10 – силовой шкаф; 11 – компрессор с ресивером; 12 – гидронасос с резервной емкостью



На опытной площадке были изготовлены термогрунтовые и цементобетонные буронабивные сваи (для сравнения). Статические испытания свай проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 5686-94 (рис.8).

Рис 8 Статические испытания свай

Испытания показали, что несущая способность термогрунтовых свай в 2...2,5 раза превышает этот показатель цементобетонных свай.

После завершения статических испытаний опытных конструкций было выполнено шурфование, которое позволило установить, что вокруг силикатного расплава тела свай образовались слои грунта с различной степенью термической модификации. Сдвиг грунта при статическом нагружении свай проходит по границе раздела периферийных термогрунтовых слоев и грунта в массиве.



Высокая несущая способность термогрунтовых свай объясняется не только прочностью материала, но и увеличенным диаметром, наличием уширений и силами сцепления с массивом грунта по боковой поверхности

*В пятой главе* представлены конструктивно-технологические решения, рекомендации по технологии работ на строительной площадке, а также дана оценка эффективности предлагаемых решений.

В исследуемой технологии термогрунтовое тело (свая, столб) формируется непосредственно на строительной площадке. Геометрические параметры укрепленного основания неразрывно связаны с режимом работы плазменной установки и её технической оснащённостью

Если расстояние между сваями меньше, чем диаметр уширений, то происходит объединение этих свай посредством сплавления в местах уширений в одном или нескольких уровнях по высоте.

Данный эффективный конструктивно-технологический приём позволяет получать кусты объединённых свай с высокой несущей способностью. Можно получать различные формы термогрунтового тела: цилиндрическую, цилиндрическую с одним или несколькими уширениями, коническую с увеличением диаметра в верхней или в нижней части скважины.

Для работы на строительной площадке нами предложено размещать комплект плазменного оборудования на базе грузового автомобиля с удлиненной платформой. Плазменный агрегат на базе автомобиля может оперативно перебазироваться на объекты. Технологический процесс обеспечивают два оператора, а для изготовления свайного основания используется только местный грунт и топливо (дизельное или газообразное).

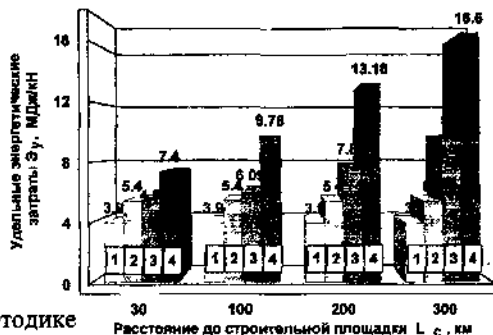
Оценка эффективности предлагаемых решений проведена по энергозатратам, трудозатратам, приведенным затратам на единицу объема материала и на условную величину удельной несущей способности. Для сравнения выбраны традиционные забивные железобетонные и буронабивные цементобетонные сваи.

Структура затрат при плазменной технологии отлична от традиционных технологий устройства свайных фундаментов из цементобетона. При устройстве термогрунтовых свай более 95 % всех затрат сосредоточено на строительной площадке. У конкурирующих вариантов затраты распределены во времени и пространстве – начиная от добычи и переработки сырья (щебень, цемент, металлы и т.п.), приготовления полуфабрикатов и изделий и кончая работами на строительной площадке.

Для объективного сравнения конкурирующих вариантов по удельным энергетическим затратам рассчитывался показатель энергетической цены несущей способности  $\mathcal{E}$ , (рис.9), численно равный суммарным энергетическим затратам (МДж) на всех этапах изготовления свай и фундаментов, необходимых для обеспечения единицы несущей способности (кН).



Рис.9. Величина удельных энергозатрат  $\Sigma$ , при устройстве:  
 1 – термогрунтовых свай по предлагаемому методу;  
 2 – термогрунтовых свай;  
 3 – забивных ж/б свай; 4 – буронабивных цементобетонных свай



По аналогичной методике определялись удельные денежные затраты на единицу несущей способности свай.

Расчеты показали, что при удалении строительной площадки от баз строительной индустрии термогрунтовые основания получают всё большие преимущества по сравнению с традиционными типами свайных оснований.

Область рационального применения свайных фундаментов зависит от инженерно-геологических условий, района строительства, величины и характера нагрузок, наличия подземных сооружений и т.п. Применение плазменной технологии и термогрунтовых свай наиболее эффективно в связных грунтах твёрдой и полутвёрдой консистенций, для зданий и сооружений с малыми и средними нагрузками. При этом не требуется обрубка свай, уменьшается расход арматуры, обеспечивается высокая точность их расположения в плане и точность высотных отметок (отметки могут корректироваться термическим воздействием). При устройстве термогрунтовых свай можно достичь равенства несущей способности по грунту и по материалу, не требуются мощности железобетонных заводов, сокращаются транспортные затраты. Длину, диаметр свай и уширения можно уточнять непосредственно на строительной площадке по результатам пробных испытаний. Зачастую чрезвычайно важна высокая стойкость плавленого грунта к агрессивным воздействиям. Применение термогрунтовых свай на площадках с высоким уровнем грунтовых вод возможно, но требует дополнительных затрат на водопонижение в период производства работ.

Мобильность, автономность и компактность плазменной установки повышают конкурентоспособность термогрунтовых свай при рассредоточенности малых объектов, при значительном расстоянии доставки материалов и слабо развитой дорожной сети. Не вызывают принципиальных затруднений круглогодичное производство работ, работа на площадках с плотной застройкой. Возможно комбинированное устройство свай: уширенная пята выплавляется при плазменном воздействии, а тело свай устраивается из цементобетона. Капитальные затраты на изготовление и приобретение плазменной установки окупаются за один год её эксплуатации.

## Общие выводы и заключение

1. В результате диссертационного исследования теоретически установлен и экспериментально подтвержден новый способ повышения эффективности плазменной технологии глубинного термического укрепления грунтовых оснований зданий и сооружений. Способ основан на управлении направлением и интенсивностью плазменного теплового потока при выполнении технологической операции по устройству уширения тела термогрунтовых свай, что повышает их несущую способность.

2. Получила развитие математическая модель технологического процесса термического укрепления грунтового основания. При моделировании технологический процесс не только разделён на два этапа – активный и пассивный, выделено два периода активного этапа технологического процесса. Во время первого периода (устройство уширения скважины) моделируется нагрев грунта в массиве мощным радиальным источником термического воздействия. Во время второго – моделируется воздействие плазменного генератора, нагревающего грунт, подаваемый в скважину (зону реактора), из дозатора.

Во время пассивного этапа технологического процесса, длящегося 14 и более часов, тепловая энергия передаётся от грунтоплавленого тела в окружающий грунтовый массив, вызывая термическую модификацию и упрочнение грунта на расстоянии более трёх диаметров лидерной скважины.

Усовершенствованная математическая модель, реализованная в виде компьютерных программ, позволяет более достоверно прогнозировать рациональные параметры и результаты технологического процесса термического укрепления грунтовых оснований.

3. Предложено новое техническое решение, позволившее усовершенствовать технологический процесс. Суть его заключается в изменении формы и размера электрода погружного плазмотрона, дающего возможность управлять направлением и величиной термического потока низкотемпературной плазмы, что, в свою очередь, позволило повысить эффективность выплавления уширения ствола скважины и всего технологического процесса в целом. При этом определено, что форма и размер внутреннего электрода генератора плазмы должны назначаться в зависимости от свойств графита и параметров технологического процесса.

4. Изготовлена и испытана в летний и зимний периоды на открытой опытной строительной площадке плазменная установка для глубинного плазменного термического укрепления грунтовых оснований. При этом апробированы и подтверждены основные экспериментально-теоретические положения диссертационного исследования. Созданная установка может служить базовой моделью для промышленного образца мобильной, более

мощной и производительной автономной автоматизированной машины для изготовления термогрунтовых свайных оснований.

5. На базе усовершенствованного технологического процесса рекомендовано конструктивное решение, которое должно повысить несущую способность укрепленного основания за счёт объединения соседних термогрунтовых свай в один куст через пояса уширений, соединённых между собой силикатным расплавом.

6. Разработаны рекомендации по технологии производства работ по термическому укреплению грунтовых оснований установкой с погружным генератором низкотемпературной плазмы.

7. Установлено, что применение термогрунтовых оснований эффективно при строительстве объектов, удалённых от баз строительной индустрии, при строительстве малых рассредоточенных объектов в районах со слабо развитой транспортной сетью. Кроме того, термогрунтовые основания могут быть эффективны на площадках с грунтами, имеющими повышенную природную или техногенную агрессивность, при работе на площадках с плотной застройкой, наличием подземных сетей, при реконструкции сооружений. Эффективность термического укрепления существенно снижается при увеличении показателя текучести (коэффициента консистенции) грунтов в массиве свыше 0,5.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Сиротюк В.В., *Архипов В.А.*, Люзе В.Л. Изготовление термогрунтовых конструкций для транспортного строительства //Тезисы докл. Всерос. Междунар. науч. технич. конф. «Автомобильные дороги Сибири». – Омск: Изд-во СибАДИ, 1994. – С.60 (вклад соискателя 30 %).

2. Сиротюк В.В., *Архипов В.А.* Плазменная технология получения мелкосвайных оснований //Изн. вузов. Строительство и архитектура. –1995. –№5–6. –С.125–127 (вклад соискателя 20 %).

3. Сиротюк В.В., *Архипов В.А.* Плазменная технология получения свайного фундамента для зданий //Стр-во в нов. хозяйственных условиях: Сб. науч.тр. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1995. –С.45–47 (вклад соискателя 50 %).

4. *Архипов В.А.* Экономико-энергетическое сравнение свайных фундаментов //Тез. докл. Междунар. науч. технич. конф. «Современные проблемы строительного материаловедения». – Казань: Изд-во КГАСА, 1996. –С.56.

5. *Архипов В.А.* Сравнительный анализ применения грунтоплавленных свай //Тезисы докл. Междунар. науч. технич. конф. молодых ученых ГАСУ. – СПб.:Изд-во ГАСУ, 1996. – С.67.

6. Сиротюк В.В., *Архипов В.А.* Эффективность применения грунтоплавленных свай //Материалы Междунар. науч. технич. конф. «Город и транспорт». – Омск: Изд-во СибАДИ, 1996. –Ч.2. –С.7–9 (вклад соискателя 50 %).

7. Сиротюк В.В., *Архипов В.А.* Оценка эффективности изготовления грунтоплавленных свай //Сб.науч. тр. –Омск:Изд-во СибАДИ, 1997. –С.13–15(вклад соискателя 50 %).

8. Сиротюк В.В., *Архипов В.А.* Моделирование устройства грунтоплавленных свай //Сб. науч. тр. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1997. –С.70–75 (вклад соискателя 50 %).

9. Сиротюк В.В., *Архинов В.А.*, Острась И.В., Александров А.С. Результаты испытаний грунтоплавленных свай //Материалы II Междунар. науч. технич. конф. «Автомобильные дороги Сибири».- Омск: Изд-во СибАДИ,1998. –С.98–100(вклад соискателя 25 %).

10. Сиротюк В.В., *Архинов В.А.* Технология изготовления термогрунтовых свай на строительной площадке с помощью генератора низкотемпературной плазмы // Основания, фундаменты и механика грунтов. –1999. –№ 6. –С.24–27 (вклад соискателя 30 %).

11. *Архинов В.А.*, Сиротюк В.В. Совершенствования плазменной технологии глубинного термоукрепления грунтовых оснований //Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – Омск: Изд-во «ЛЕО», 2004. – Вып. 1. –С 235–237 (вклад соискателя 50 %).

12 *Архинов В.А.* Совершенствования плазменной технологии глубинного термоукрепления грунтовых оснований зданий и сооружений // Дорожно-транспортный комплекс как основа рационального природопользования. Кн. 1 : Тез. докладов Материалов Международной научно-технической конф. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2005. –С.200–202.

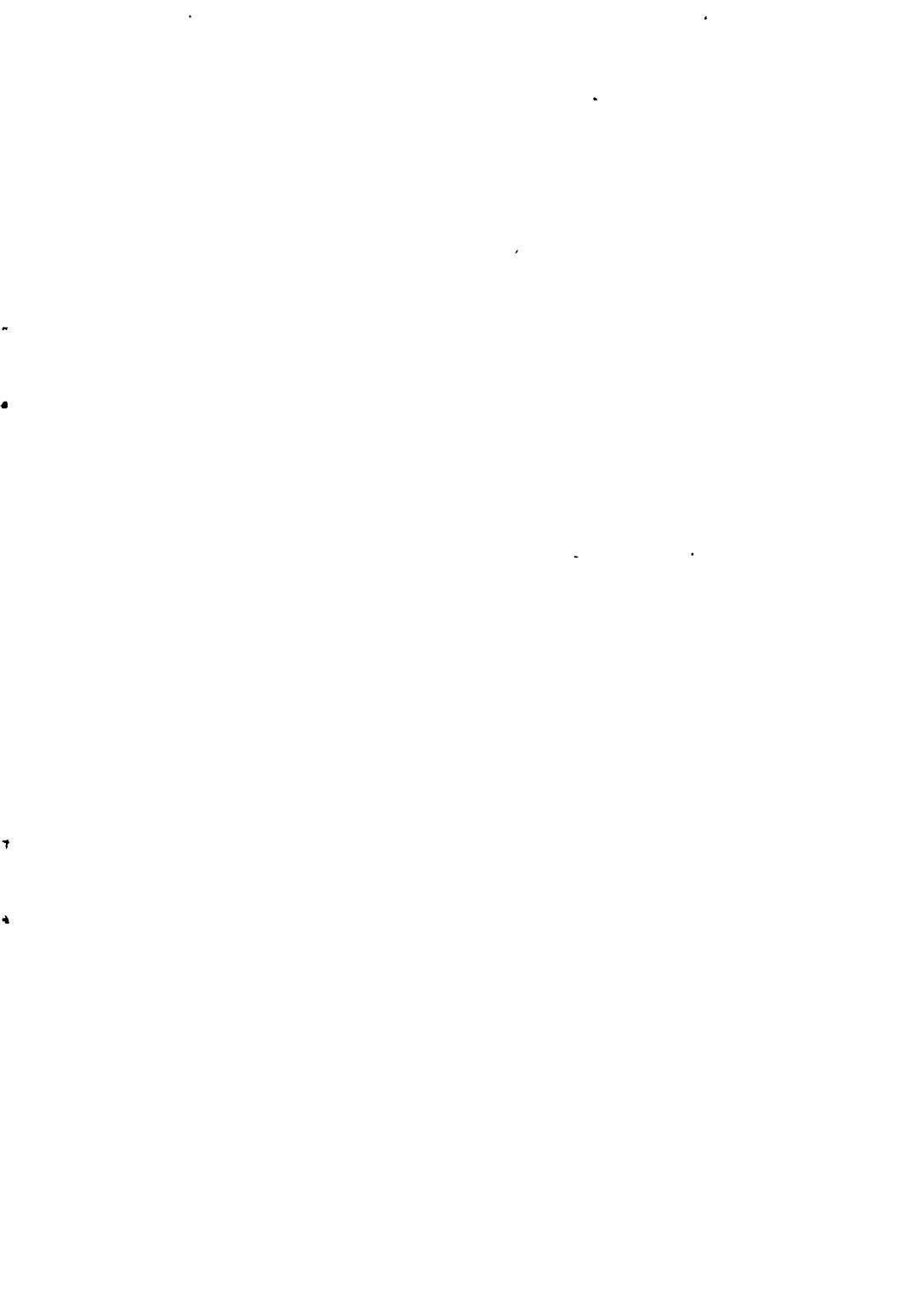
Подписано к печати 24 ноября 2005 г.

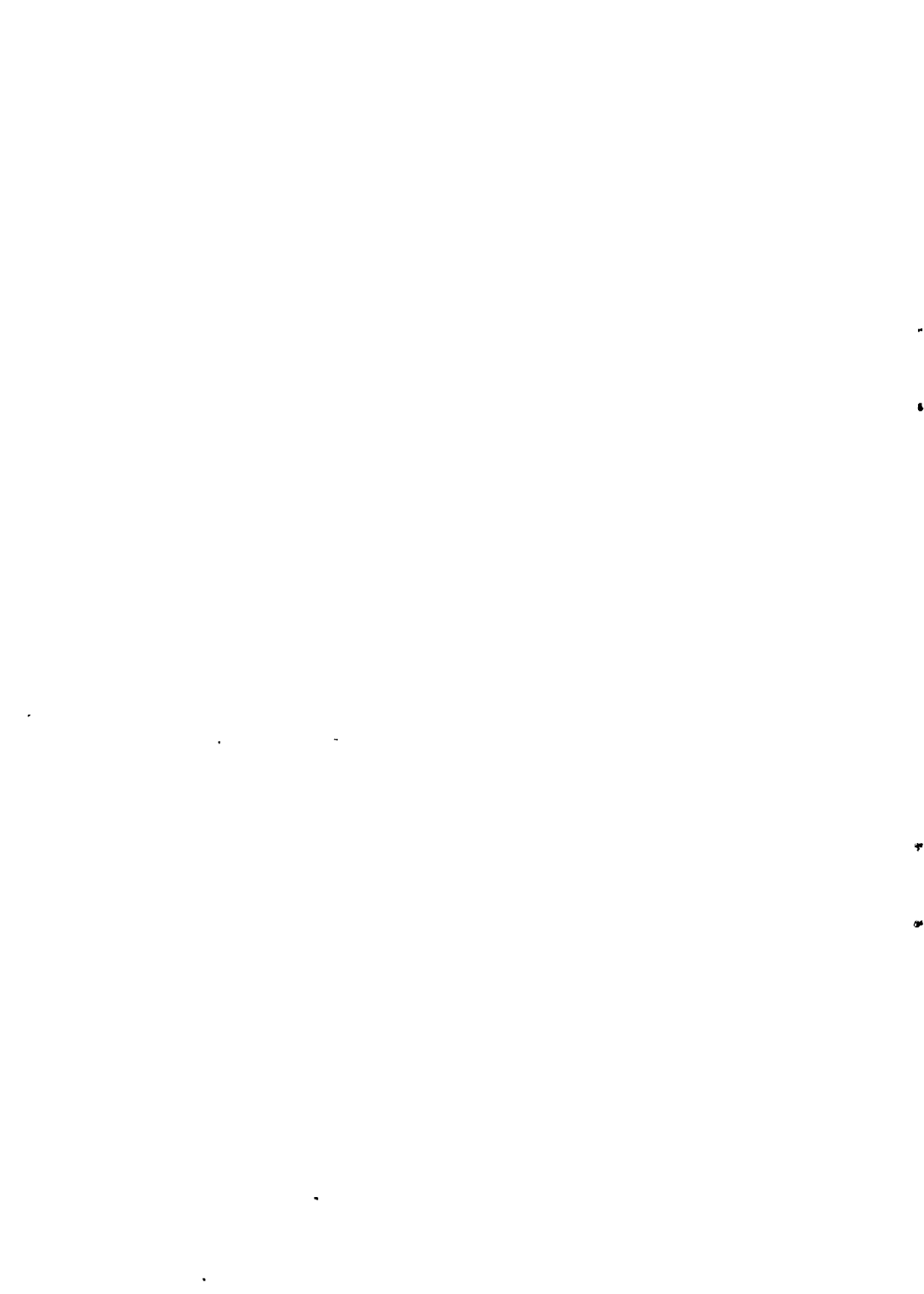
Формат 60x90 1/16. Бумага писчая

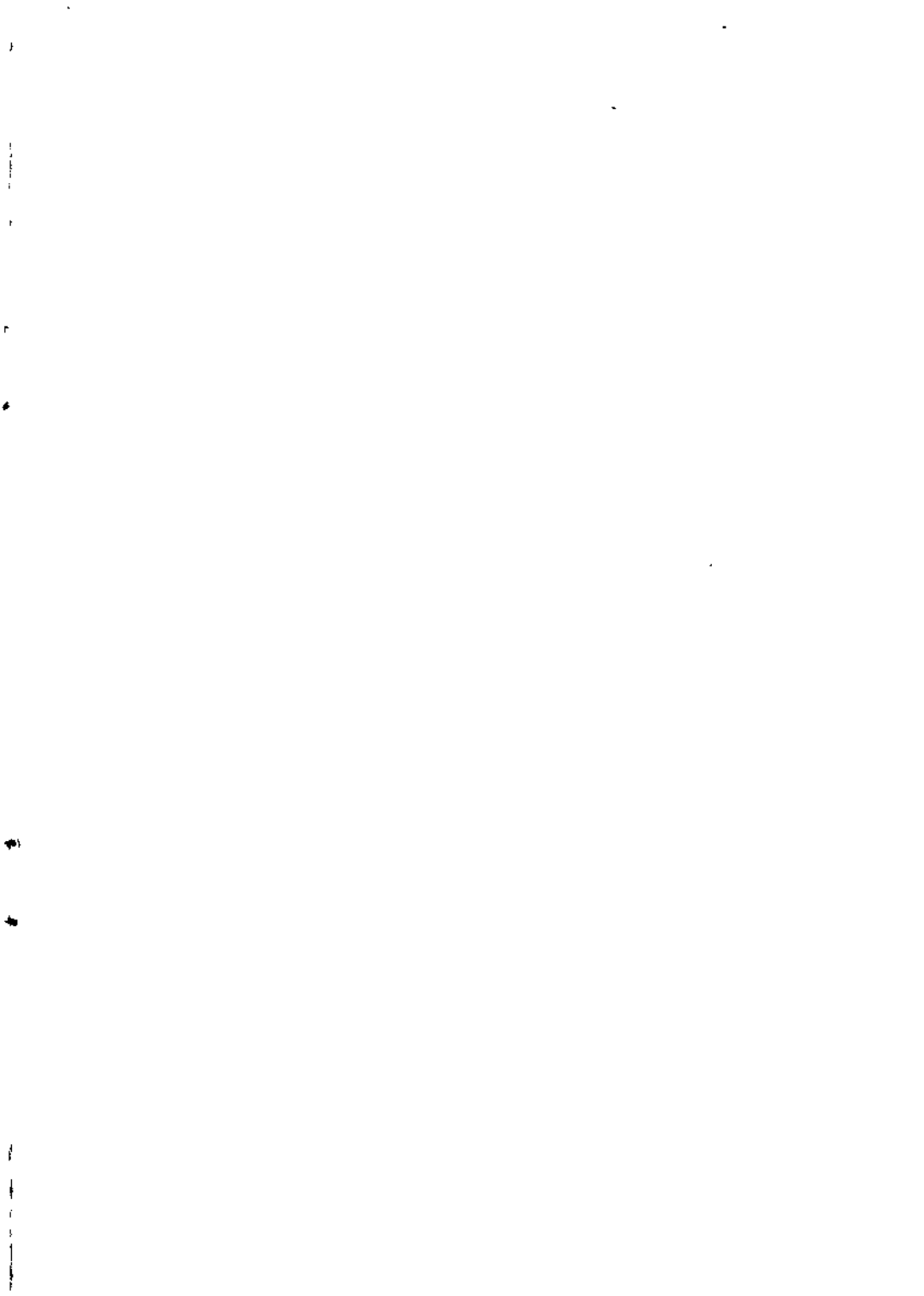
Оперативный способ печати.

Уч.-изд. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Заказ № 104







№ 2 4 5 6 2

РНБ Русский фонд

2006-4

27401