

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

КУТИН ЮРИЙ ФЕДOTOВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИДА ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ЗАКОНА
СЩЕПЛЕНИЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В РАСЧЕТАХ СЩЕПЛЕНИЯ
АРМАТУРЫ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ С БЕТОНОМ

Специальность 05.23.01 -

"Строительные конструкции"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск, 1975.

ИПИ

«

Работа выполнена на кафедре железобетонных конструкций
Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Оатул А.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Трифонов И.А.,
кандидат технических наук, доцент
Каширский Ю.А.

Заказное предприятие – Ростовский ПромстройНИИпроект,
г. Ростов-на-Дону.


Автореферат разослан " " марта 1975 г.

Защита диссертации состоится 23 апреля 1975 г., в 15 часов
на заседании Совета по присуждению ученых степеней инженерно-
строительного факультета Челябинского политехнического института
имени Ленинского комсомола (центральный корпус, ауд. 244).

Просим Вас принять участие в заседании Совета или прислать
свой отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью,
по адресу: 454044, г. Челябинск – 44, проспект им. В.И.Ленина, 76,
Челябинский политехнический институт, ученому секретарю Совета
(тел. 39-39-64).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета –
кандидат технических наук,
доцент

 В.В. КАПРАНОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Проектирование и производство надежных и экономичных железобетонных конструкций невозможно без дальнейших углубленных исследований свойств железобетона и развития его теории.

Одним из основополагающих свойств железобетона, и в то же время наименее изученных, является сцепление арматуры с бетоном. Сцепление существенно влияет на прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных элементов. От качества сцепления зависит ширина раскрытия трещин и расстояние между ними, а также характер процесса закрытия (зажатия) трещин после снятия нагрузки. Таким образом, создание надежной теории сцепления арматуры с бетоном является важной и актуальной задачей на пути построения научно обоснованной общей теории железобетона.

Основным вопросом, который необходимо предварительно решить для построения теории сцепления, является выявление из опыта закономерностей, управляющих образованием и развитием взаимных смещений (сдвигов) арматуры и бетона. Многие исследователи описывают эти закономерности при помощи зависимости между смещениями δ и напряжением сцепления σ , которую называют "законом сцепления", "основным законом" или "функцией сцепления".

Автор диссертации также считает эту терминологию удобной.

В связи с этим настоятельная необходимость теоретических и экспериментальных исследований законов сцепления неоднократно подтверждалась отечественными и зарубежными авторами. Предложенные ими различные формы (виды) законов сцепления чрезвычайно разнообразны, не всегда отражают физический смысл явления, часто носят условный характер и, как правило, не согласуются с данными опытов.

Последнее обстоятельство является существенным недостатком, приводящим к тому, что все известные автору варианты теории сцепления, построенные на основе таких законов сцепления, дают результаты, существенно расходящиеся с опытом.

Цель работы. Исследование проводилось с целью получения из опыта достоверных, статистически обоснованных данных для построения законов сцепления арматуры периодического профиля с бетоном и выяснения влияния прочности бетона на вид закона сцепления.

На основании результатов экспериментального исследования была поставлена цель разработать расчетный аппарат в рамках техни-

ческой (феноменологической) теории сцепления арматуры с бетоном, который приводил бы к результатам хорошо согласующимся с опытом по всем главным параметрам.

Методы выполнения исследования. Исследование базируется на экспериментальных данных, полученных при сопоставительном испытании на растяжение коротких и длинных призматических бетонных образцов, центрально армированных стержнями А-Ш_в Ø 20.

Научная новизна. Исследовано напряженно-деформированное состояние блока между смежными поперечными трещинами при статических малоцикловых (до 50 циклов) нагружениях. Получены новые экспериментальные данные о характере процесса взаимного смещения арматуры и бетона в контактном слое. Экспериментально доказано, что характер сцепления арматуры с бетоном определяется законами образования взаимных смещений арматуры и бетона и что эти законы различны вдоль заделки арматуры в бетон. Выявлена зависимость этих законов (семейства кривых $\tau - \delta$, названного "дифференцированным законом сцепления") от прочности бетона. Разработана методика получения аналитического выражения дифференцированного закона сцепления.

На основе применения дифференцированного закона сцепления арматуры с бетоном разработан теоретический расчетный аппарат, который учитывает изменение модуля деформаций бетона по мере роста напряжений в бетоне.

Практическая ценность работы заключается в том, что предлагаемая расчетная модель может служить базой для создания научно-обоснованной теории сцепления арматуры с бетоном и без существенных изменений может быть перенесена на случай вытягивания арматуры из призм и бетонных массивов или опорных узлов балок и ферм, передачи усилия предварительного напряжения с арматуры на бетон, анкеровки, то есть практически на все случаи расчета железобетонных элементов, когда сцепление играет ведущую роль.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на:

1. Всесоюзном совещании по сцеплению арматуры с бетоном в Челябинске в июне 1968 г.

2. XX, XXII, XXV, XXVI и XXVII научно-технических конференциях Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола, проходивших в 1967-1974 г.г.

3. XXX научно-технической конференции Ленинградского ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительного института (г. Ленинград, январь-февраль 1972 г.).

Публикации. По результатам выполненного исследования опубликовано пять работ.

Объем работы. Диссертационная работа объемом 212 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (128 наименований), приложения и содержит 93 страницы машинописного текста, 60 рисунков, 18 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Состояние вопроса по исследованию вида законов сцепления арматуры с бетоном и построению вариантов теории сцепления на основе этих законов

Результаты многочисленных исследований показали, что в механизме сцепления стержней периодического профиля с бетоном фактор зацепления является определяющим. Однако, процесс зацепления выступов арматуры за бетон изучен еще недостаточно и требует дальнейшей тщательной экспериментальной и теоретической проработки. Поэтому, при построении теории сцепления арматуры с бетоном большинство авторов явление зацепления, носящее дискретный характер, представляют непрерывной схемой касательных (τ) и нормальных (ρ) напряжений.

Имеющиеся теоретические и экспериментальные исследования, как правило, относятся к единичному стержню, заделанному в призматический или цилиндрический бетонный образец. Лишь в работах М.М.Холмянского сделана попытка на основе ряда условий и допущений теоретически рассмотреть работу группы стержней.

Большинство работ, посвященных исследованию сцепления арматуры с бетоном в блоке между смежными трещинами, производились на коротких растянутых образцах. При этом предполагалось, что такой образец хорошо имитирует работу блока между трещинами в длинном образце, а торцевое сечение короткого образца имитирует крайнее сечение блока, образующее трещину. Однако, отсутствуют сведения об экспериментальной проверке этого предположения.

В настоящее время опытами вскрыта качественная картина напряженно-деформированного состояния арматуры и бетона в центрально растянутых образцах: доказано наличие деформации (искривления) поперечных сечений бетона; экспериментально доказано наличие смеще-

ний арматуры относительно бетона, но отсутствуют данные о законах распределения этих смещений по длине арматурного стержня в зависимости от уровня нагружения, прочности бетона и других факторов; установлено, что напряжение сцепления у торцов образца уменьшается с увеличением нагрузки, при этом максимум на эпюре $\tau(x)$ изменяется по величине и перемещается вглубь образца.

Первоначальные исследования законов сцепления проводились, как правило, на торцевом сечении образцов. В работах К.В. Михайлова, М.М. Холмянского, Г. Рема, Р. Эванса и др., было установлено, что кривая закона сцепления имеет четыре характерных участка: начальный линейный участок (упругая стадия); восходящая линия (упруго-пластическая стадия); область постоянного максимального напряжения сцепления (пластическая стадия); ниспадающий участок кривой (стадия разрушения сцепления).

Исследователи предполагали, что кривая закона сцепления, полученная для торца образца, справедлива для всех других сечений и принимали единый (постоянный) закон сцепления для всех сечений образца $\tau = f(\rho)$. Однако, отдельные опыты Л.П. Серовой, Л. Лутца, Д. Уотштейна, И. Гийона, А. Бишара, А. Нильсона, обнаружили несостоятельность такого предположения. Эти опыты натолкнули на мысль о том, что положение сечения оказывает существенное влияние на вид кривой закона сцепления.

Несмотря на усилия многочисленных исследователей как в СССР, так и за рубежом, мы не располагаем в настоящее время удовлетворительной теорией сцепления арматуры с бетоном. Все наиболее результативные попытки построения такой теории опираются на закон сцепления и используют те или иные предпосылки для описания деформированного состояния бетона.

Ряд исследователей не учитывали деформацию и принимали гипотезу плоских сечений. Используя уравнения равновесия и уравнение разрывности деформаций на контакте арматуры с бетоном, они получили дифференциальное уравнение, решить которое в замкнутом виде можно только при наличии зависимости типа $\tau = f(x)$ или $\tau = f(\rho)$. Подробный анализ таких задач проведен в работах Г. Буфлера, В. Куускоски, М.М. Холмянского при принятых ими формах закона сцепления.

Анализ теоретических построений предшественников показал, что использование единого (постоянного) закона сцепления приводит к результатам противоречащим опыту: максимум на эпюрах $\tau(x)$ при увеличении нагрузки остается постоянной величиной.

II. Задачи и методика экспериментальных исследований

Приведенный выше перечень нерешенных, а иногда и спорных вопросов определил задачи и содержание экспериментальных исследований в диссертации:

1. Разработать методику экспериментального исследования взаимных смещений арматуры и бетона в контактном слое. Оценить влияние этой методики на результаты исследования.

2. Сопоставить напряженно-деформированное состояние короткого и длинного растянутых образцов при различных уровнях первого нагружения, при разгрузке и повторных нагружениях с целью выяснения возможности применения короткого образца как модели сцепления арматуры с бетоном.

3. Исследовать закон сцепления арматуры периодического профиля с бетоном на растянутых коротких образцах при первом нагружении и подобрать соответствующие аналитические выражения.

4. Исследовать влияние прочности бетона на вид закона сцепления.

Для выполнения поставленных задач были запроектированы "короткие" и "длинные" образцы (рис. I) в виде призм сечением 140 x 140 мм, центрально армированных одним стержнем. "Длинные" образцы, длина которых в 2+3 раза превышала l_T (в смысле СНиП II-B. I-62*) и составляла 400 + 750 мм, при испытании нагрузкой делились сквозными трещинами на блоки длиной 220 + 240 мм. В связи с этим, длина "коротких" образцов была принята 240 мм.

Всего было изготовлено и испытано десять серий образцов общим количеством 42 шт.

Все образцы были армированы стержнями А-Шв \varnothing 20 мм.

На образцах первой серии производили отработку методики замера деформаций арматуры и бетона. Деформации арматуры замеряли по показаниям датчиков, расположенных внутри стержня, а взаимные смещения арматуры и бетона замеряли с помощью микроскопа по перемещению реперов, расположенных на дне колодцев (рис. I). Использование такой методики потребовало выполнения контрольных опытов для оценки влияния ослаблений в арматуре, бетоне и на контакте между ними (серия III).

Образцы второй серии были предназначены для проведения предварительных исследований вида законов сцепления и дальнейшей отработки методики замера деформаций арматуры и бетона.

Продольное сечение бетонной призмы в плоскости расположения колодцев было ослаблено на 15% (рис. I). Для определения степени

влияния этого ослабления на результаты опытов образцы IU и У серий были изготовлены трех видов: с колодцами, без колодцев, с колодцами и арматурой усиления в виде сеток; площадь арматуры усиления назначили из условия равнопрочности бетонного не ослабленного сечения.

Короткие и длинные образцы серий UI и УП, УШ и IX были изготовлены с целью сопоставления работы длинного и короткого растянутых образцов. Построение законов сцепления производили по результатам испытания IU, У, UI, УШ серий образцов.

Применяли бетоны двух составов с соотношением компонентов по весу (цемент, песок, щебень, вода) I : 2,5 : 4,49 : 0,65 для состава А и I : 0,98 : 2,33 : 0,35 для состава Б. Коэффициент раздвижки зерен щебня раствором был принят 1,5. Использовали шлакопортландцемент Еманжелинского завода.

Кроме основных образцов готовили и испытывали вспомогательные образцы для определения свойств бетона. Прочность бетона определяли испытанием кубов 100x100x100 мм. Модуль упругости бетона определяли на бетонных призмах 100x100x400 мм. Для состава А (по шести призмам) получили $E_{\xi} = 219000 \text{ кг/см}^2$ и $R_{pp} = 145 \text{ кг/см}^2$. Для состава Б, соответственно, $E_{\xi} = 335000 \text{ кг/см}^2$, и $R_{pp} = 314 \text{ кг/см}^2$.

Для замера продольных деформаций бетона на поверхности образца устанавливали две цепочки тензометров системы Н.Н. Аистова (рис.2). В некоторых образцах использовали для этой цели датчики с базой 50 мм и 20 мм, наклеенные на поверхность образца. Съем информации со всех датчиков осуществляли с помощью прибора АИД-1.

Искривление торца призмы измеряли индикаторами часового типа с ценою деления 0,001 мм. Индикаторы крепили на специальных рамках к стержню на расстоянии 20 мм от торца образца (рис.2).

Для замера взаимных смещений δ арматуры и бетона на уровне условной поверхности контакта применяли реперы в виде металлических шайб диаметром 12 мм, толщиной 1 мм, при внутреннем диаметре 6 мм.

К шайбе припаивали навстречу друг другу полоски отожженных бритвенных лезвий. Просвет между полосками составлял $1,2 + 1,5$ мм. Репер располагался непосредственно на поверхности ребра арматурного стержня так, чтобы ось полосок была параллельна оси стержня, а просвет между ними располагался перпендикулярно этой оси. Диаметр колодца в непосредственной близости у репера был равен внутреннему диаметру шайбы репера и репер надежно закреплялся в бетоне (рис.1).

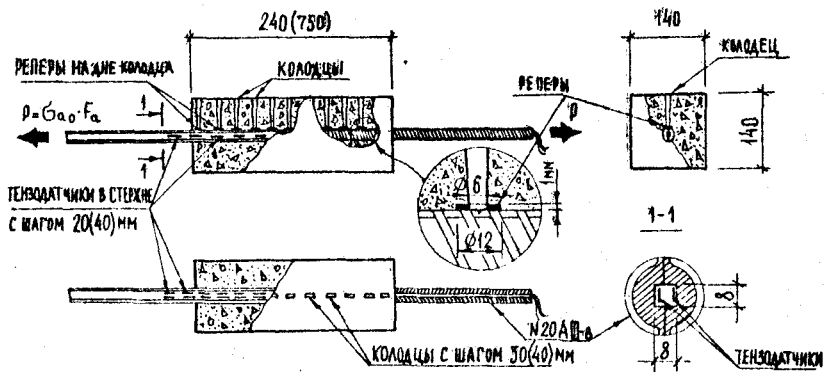


РИС. 1

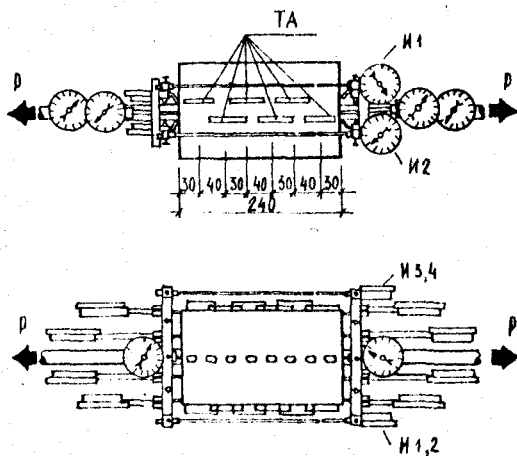


РИС. 2

В процессе испытания образца, используя оптическую систему, измеряли изменения расстояния между метками на арматуре и на репере, что соответствовало величинам взаимных смещений арматуры и бетона для данного сечения.

Образцы серий I + III испытывали при одном цикле нагружения-разгрузки.

Образцы серий IV + IX испытывали при повторных нагружениях по следующей схеме нагружения: первые 20 циклов нагружения вели ступенями $\Delta \sigma_{a_0} = 500 \text{ кг/см}^2$ до $\sigma_{a_0} = 3000 \text{ кг/см}^2$, затем нагрузку повышали до $\sigma_{a_0} = 5000 \text{ кг/см}^2$.

Все образцы серий VI + IX после циклов повторных испытаний нагружали до $\sigma_{a_0} = 3000 \text{ кг/см}^2$ и в таком состоянии со стержней удаляли бетонную оболочку. Затем стержень разгружали. Отсчеты по датчикам вели как после удаления бетона, так и после полной разгрузки стержня.

III. Анализ результатов экспериментальных исследований

В работе выполнена оценка влияния на полученные результаты ослабления поперечного сечения арматурного стержня и ослабления бетонной оболочки образца колодцами.

Анализ показал, что применяемая в данной работе методика замера деформаций арматурного стержня датчиками и взаимных смещений арматуры и бетона реперами - шайбами не вносит существенных искажений при оценке напряженно-деформированного состояния образцов. Результаты проведенных исследований достоверно характеризуют напряженное состояние сплошных арматурных стержней в бетонных призмах при растяжении.

До момента выхода сквозных поперечных трещин на боковую поверхность длинных образцов зарождение и развитие этих трещин внутри бетона фиксировали с помощью описанных выше реперов на дне колодцев. При этом взаимные смещения арматуры и бетона справа и слева от трещины были разного знака и близкие по величине (рис.3б).

После образования сквозных поперечных трещин в длинном образце и распада его на ряд блоков, напряженно-деформированное состояние блока и короткого образца были достаточно близки на всех уровнях первого нагружения (рис.3а,б). Эпюры $\epsilon_a(x)$ и $\eta(x)$, полученные при испытании коротких образцов, и по характеру и в количественном отношении были достаточно близки к соответствующим эпюрам в блоках

длинных образцов; с увеличением нагрузки соответствие в эпюрах $\epsilon_a(x)$ и $q(x)$ сохранялось.

Искривление торцевых поверхностей коротких образцов и блоков оценивали мерой деформации η . После появления сквозных трещин в длинных образцах мера деформации торцевых сечений и сечений с трещинами была практически одинакова и составляла $\eta = 3 + 3,5$.

Сопоставление коротких и длинных образцов показало, что короткий растянутый образец достаточно хорошо имитирует напряженно-деформированное состояние блока между смежными поперечными трещинами в длинном образце при первом нагружении. При разгрузке и повторных нагружениях эпюры $\epsilon_a(x)$ и $q(x)$ в коротких образцах существенно отличались от соответствующих в блоках длинного образца, что объясняется взаимодействием блоков в длинном образце.

Поэтому далее в работе подробный анализ взаимодействия арматуры и бетона был произведен по результатам лишь первого нагружения коротких образцов.

Опираясь на графический анализ результатов опытов автора диссертации (рис. 3б) и ряда предшествующих работ (Л.С. Шакарян, Т. Гарян, В. Куускоски) можно считать, что форма эпюры $\epsilon_a(x)$ близка к косинусоидальной. Для обработки результатов измерения величины ϵ_a было принято выражение

$$\epsilon_a = \epsilon_{a_0} - A \cdot \left(\cos \frac{\pi \cdot x}{l_T} \right)^b \quad (1)$$

или после умножения на E_a

$$\sigma_a = \sigma_{a_0} - \alpha \cdot \left(\cos \frac{\pi \cdot x}{l_T} \right)^b, \quad (2)$$

где σ_a, ϵ_a - напряжения и соответствующие им деформации в сечении арматуры с абсциссой x ;

$\sigma_{a_0}, \epsilon_{a_0}$ - напряжения и соответствующие им деформации в сечении арматуры на торце образца (в сечении с трещиной);

α, b - опытные коэффициенты ($A = \alpha \cdot E_a$);

l_T - длина образца (блока между трещинами);

x - абсцисса, измеряемая от оси симметрии образца (блока).

Логарифмируя выражение (2), мы получаем линейную функцию и методом наименьших квадратов определяем значения коэффициентов α и b .

По указанной схеме была произведена обработка результатов измерения величины ϵ_a на каждом этапе нагружения. Раздельно рассматривались две группы образцов, отличающихся прочностью бетона: образцы серий IV и VI из бетона состава А и образцы серий V и VII из бетона состава Б.

Так как эпюры $\epsilon_a(x)$ симметричны относительно оси, проходящей через середину образца, то при статистической обработке результатов наблюдений количество учитываемых измерений составило в серии из 6-и образцов по 12 измерений в одной точке. Всего было вычислено до двадцати значений каждого из параметров a и b .

По результатам обработки эпюр $\epsilon_a(x)$ были построены графики изменения коэффициентов a и b в зависимости от уровня нагружения образцов. Отношение величины a к корню квадратному из кубиковой прочности бетона R_b оказалось достаточно близким для разных прочностей бетона. Обработка методом наименьших квадратов показала, что зависимость между $\frac{a}{\sqrt{R_b}}$ и уровнем нагружения G_{a_0} может быть принята в виде

$$\frac{a}{\sqrt{R_b}} = \frac{25 \cdot G_{a_0}}{200 + G_{a_0}} \quad (3)$$

Коэффициент b , как показал анализ, практически не зависит от прочности бетона образцов, а зависит только от уровня нагружения. Наличие линейной зависимости b от G_{a_0} подтверждается высоким значением экспериментального коэффициента корреляции $r = 0,89$. Методом наименьших квадратов установлено, что для коэффициента b можно принять следующее выражение

$$b = 1 + \frac{G_{a_0}}{G_{a_0}^{\text{МАКС}}} \quad (4)$$

где $G_{a_0}^{\text{МАКС}}$ - максимальный уровень нагружения ($G_{a_0}^{\text{МАКС}} = 5000 \text{ кг/см}^2$).

Учитывая установленные таким образом зависимости (3) и (4), выражение (2) принимает вид

$$G_a = G_{a_0} - \frac{25 \cdot \sqrt{R_b} \cdot G_{a_0}}{200 + G_{a_0}} \cdot \left(\cos \frac{\pi \cdot x}{l_T} \right) \left(1 + \frac{G_{a_0}}{G_{a_0}^{\text{МАКС}}} \right) \quad (5)$$

Максимальные отклонения опытных данных от вычисленных по формуле (5) для первых этапов нагружения составляли $\pm 12\%$, а с увеличением уровня нагружения существенно уменьшались.

Выражение для напряжений сцепления τ получено дифференцированием выражения (5) по параметру x

$$\tau = \frac{25 \cdot x \cdot \sqrt{R_s} \cdot F_a \cdot \sigma_{a0}}{\mu \cdot l_r (200 + \sigma_{a0})} \cdot \left(1 + \frac{\sigma_{a0}}{\sigma_{a0}^{\text{макс}}}\right) \cdot \sin \frac{\pi x}{l_r} \cdot \left(\cos \frac{\pi x}{l_r}\right)^{\frac{\sigma_{a0}}{\sigma_{a0}^{\text{макс}}}}, \quad (6)$$

где F_a - площадь поперечного сечения арматуры ($F_a = 2,5 \text{ см}^2$);
 μ - периметр поперечного сечения арматуры ($\mu = \pi \cdot d = 6,28 \text{ см}$);

R_s - прочность бетона, в кг/см^2 ;

$\sigma_{a0}^{\text{макс}}$ - максимальный уровень нагружения ($\sigma_{a0}^{\text{макс}} = 5000 \text{ кг/см}^2$).

Результаты исследования образцов с различной прочностью бетона показали, что прочность бетона практически не влияет на величину смещений g : эпюры $g(x)$ были близки у образцов, прочность бетона в которых различалась существенно.

Для подтверждения этого вывода был выполнен дисперсионный анализ, который доказал, что фактор прочности бетона не оказывает существенного влияния на распределение взаимных смещений арматуры относительно бетона в контактном слое. Этот вывод подтверждается результатами исследований А. Нильсона.

Учитывая этот вывод, дальнейшая обработка результатов измерений величины g была произведена совместно для образцов с различной прочностью бетона.

Из факторов, влияющих на распределение величины g , выделены два: x - координата поперечного сечения, в котором происходит измерение, и σ_{a0} - уровень нагружения образца.

Рассматривая торцевое сечение образца (при $x = 120 \text{ мм}$), установлено, что смещения арматуры g_0 (рис. 3) в этом сечении прямо пропорционально зависят от уровня нагружения σ_{a0} и могут вычисляться по формуле

$$g_0 = S \cdot \frac{\sigma_{a0}}{\sigma_{a0}^{\text{макс}}}. \quad (7)$$

Методом наименьших квадратов определена величина коэффициента $S = 0,0847 \text{ мм}$. Коэффициент корреляции между смещениями g_0 и уровнем нагружения σ_{a0} составил величину $\tau = 0,82$.

Графический анализ показал, что аналогичная зависимость характерна и для всех остальных сечений образца. Поэтому логично было

предположить, что относительная величина смещения $\frac{g(x)}{g_0}$ будет существенно зависеть только от координаты x , или, другими словами, форма эпюры $g(x)$ на разных этапах нагружения не зависит от уровня нагружения и может быть представлена в виде

$$\frac{g}{g_0} = f(x), \quad (8)$$

где g_0 определяется по формуле (7).

Для проверки этого предположения результаты опытов были представлены в виде отношения g/g_0 .

Обработка методом наименьших квадратов показала, что зависимость между отношениями g/g_0 и $2x/l_T$ близка к параболической и для любого уровня нагружения может быть принята в виде

$$\frac{g}{g_0} = \left(\frac{2x}{l_T}\right)^2, \quad (9)$$

или, после подстановки (7) и преобразования, в виде

$$g = S \cdot \frac{G_{a_0}}{G_{a_0 \text{ макс}}} \cdot \left(\frac{2x}{l_T}\right)^2. \quad (10)$$

Полученные в данной работе аналитические выражения для напряжений сцепления (6) и взаимных смещений арматуры и бетона (10) на уровне условной поверхности контакта являются основой для построения зависимости $\tau - g$. Графическое построение законов сцепления по предварительным опытам автора показало, что эти зависимости качественно изменяются при переходе от сечения к сечению по длине заделки стержня в бетоне и могут быть объединены в одно семейство в виде дифференцированного закона сцепления.

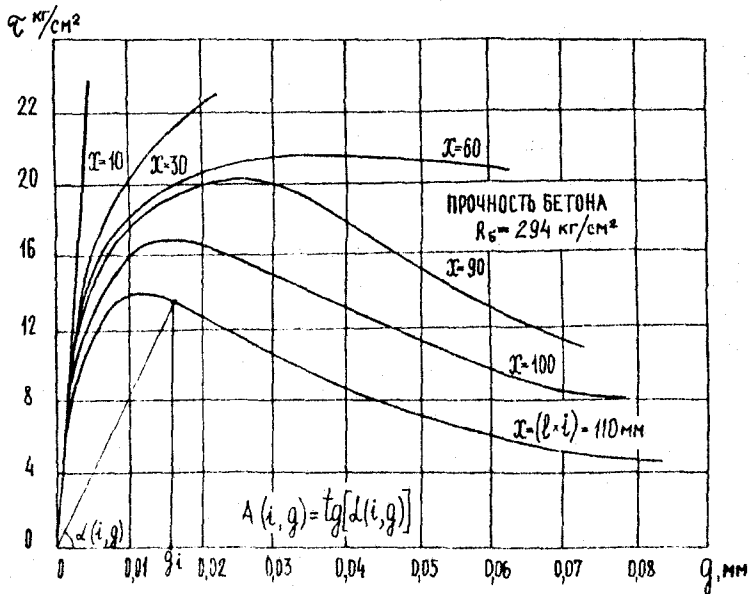
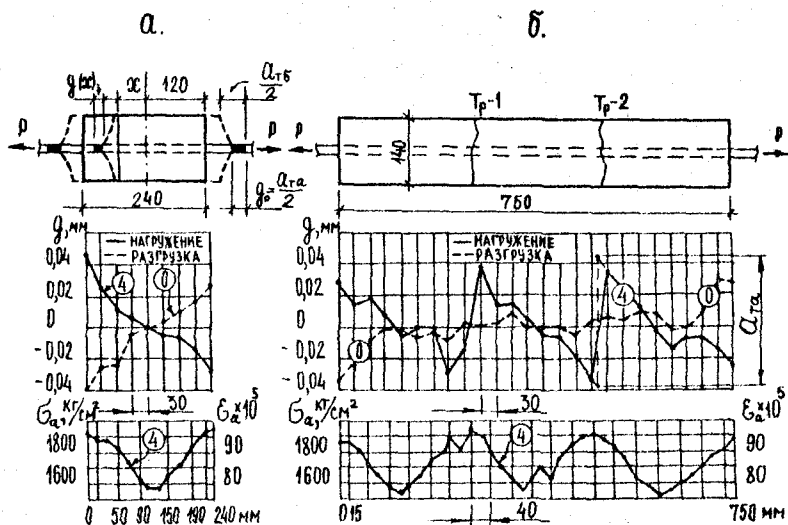
IV. Построение аналитического выражения дифференцированного закона сцепления арматуры с бетоном

Выражение (6) и (10) для τ и g есть функции вида

$$\tau = f_1(x; G_{a_0}), \quad (11)$$

$$g = f_2(x; G_{a_0}), \quad (12)$$

где G_{a_0} играет роль параметра.



0329419

Для получения дифференцированного закона сцепления этот параметр необходимо исключить. С этой целью, из выражения (10) получаем

$$\sigma_{a_0} = \frac{\sigma_{a_0}^{\text{МАКС}} \cdot l_T^2 \cdot g}{4 \cdot S \cdot X^2} \quad (13)$$

и вносим в выражение (6). После некоторых преобразований имеем

$$\tau = \frac{25 \cdot \pi \cdot \sqrt{R_S} \cdot F_a \cdot \sigma_{a_0}^{\text{МАКС}} \cdot l_T \cdot g}{u(800 \cdot S \cdot X + \sigma_{a_0}^{\text{МАКС}} \cdot l_T \cdot g)} \cdot \left(1 + \frac{l_T \cdot g}{4 \cdot S \cdot X}\right) \sin \frac{\pi X}{l_T} \cdot \left(\cos \frac{\pi X}{l_T}\right) \frac{l_T^2 \cdot g}{4 \cdot S \cdot X} \quad (14)$$

Аналитическое выражение дифференцированного закона сцепления (14) является семейством кривых $\tau - g$ (в него входит независимая переменная X) и включает в себя постоянные величины F_a , u , $\sigma_{a_0}^{\text{МАКС}}$, l_T , S , а также числовые коэффициенты, определяющие конкретные условия опыта (конкретные свойства образца).

Графически дифференцированный закон сцепления (14) для случая $R_S = 294 \text{ кг/см}^2$ и $X = 10, 30, 60, 90, 100, 110$ мм представлен на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что для глубинных сечений (при X близком к нулю) зависимость $\tau - g$ приближается к линейной, а для сечений, лежащих вблизи торца образца (сквозной поперечной трещины), имеет отмеченные выше четыре характерных участка.

Структура выражения (14) является общей для центрально армированного растянутого образца, а значения 3-х числовых коэффициентов (25; 800; 4), значение коэффициента S и констант F_a , u , $\sigma_{a_0}^{\text{МАКС}}$, l_T отражают физические и геометрические свойства данного образца и условия его нагружения.

Применение выражения (14) для всех характерных наиболее часто встречающихся на практике случаев сцепления арматуры с бетоном при растяжении требует проведения большого объема целенаправленных исследований, в которых для каждого случая нужно определить из опыта значения 3-х числовых коэффициентов и коэффициента S .

У. Предложения к построению расчетной модели сцепления в растянутом образце (на основе дифференцированного закона сцепления)

Моделирование процессов, происходящих в бетоне, в арматуре и на их контакте при растяжении короткого образца, чрезвычайно затруд-

нено следующими обстоятельствами. Под выступом арматурного стержня бетон претерпевает пластические деформации. Вблизи арматурного стержня бетон уже на ранних ступенях нагружения пронизывается контактными трещинами. Описать свойства бетона в таких условиях не представляется сегодня возможным. Поэтому при выработке расчетной модели приходится прибегать к существенным упрощениям и условиям и для нужд практического расчета строить техническую (феноменологическую) теорию сцепления арматуры с бетоном. Автор диссертации при разработке расчетного аппарата принял следующие допущения:

1. Радиус силового взаимодействия $R_{\text{в}}$ арматуры с бетоном во всех сечениях образца при любых значениях силы P_m равен или меньше радиуса образца ($R_{\text{в}} \leq R$).

2. Связь между арматурой и бетоном принята дискретной в отдельных точках $1, 2, 3, \dots, i, \dots, N$ (рис.5); при этом координата x измеряется от оси симметрии образца $x = i \cdot l$, где l - длина участка дискретизации. Напряжения сцепления в пределах этого участка считаются постоянными.

3. Допускается, что все связи по длине образца включаются в работу одновременно при приложении силы P_m .

4. Мера включения связей и их деформативность определяются дифференцированным законом сцепления (I4), представленным в форме, удобной для решения задачи в дискретной постановке

$$\tau_i = A(i, g) \cdot g, \quad (15)$$

где

$$A(i, g) = \frac{11 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{R_{\text{в}}} \cdot [0,034(l \cdot i)^2 + 576 \cdot g]}{68(l \cdot i)^4 + 288 \cdot 10^4 (l \cdot i)^2 \cdot g} \cdot \sin \frac{\pi \cdot l \cdot i}{24} \cdot \left(\cos \frac{\pi \cdot l \cdot i}{24} \right)^{\frac{17000 \cdot g}{(l \cdot i)^2}} \quad (16)$$

Здесь $A(i, g)$ - секущий модуль сцепления (рис.4).

5. Бетон рассматривается как сплошное упруго-пластически-вязкое тело. Его деформации описываются при помощи модуля деформации бетона $E_{\text{б}}$ и модуля сдвига бетона $G_{\text{б}}$, величины которых принимаются в зависимости от напряженного состояния сечения образца по формулам, аналогичным тем, которые предложены Г.К.Евграфовым

$$E_{\text{б}i} = E_{\text{б}} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\text{б}i}}{C_{\text{б}} R_{\text{б}}^n} \right), \quad (17)$$

$$G_{\delta i} = \frac{E_{\delta i}}{1 + C_2 \cdot \nu} \quad (18)$$

где E_0 - начальный модуль упругости бетона;
 R_p - нормативное сопротивление бетона на растяжение;
 $\sigma_{\delta i}$ - напряжение в бетоне в i -м сечении;
 ν - коэффициент поперечной деформации бетона;
 C_1, C_2 - константы (подбираются в результате численного эксперимента).

6. Уравнение кривой деформации принимается по С.Е.Фрайфельду:

$$\sigma_{\delta}(i, \rho) = \sigma_{\delta}(i, R) + \frac{\sigma_i}{G_{\delta i} \cdot l} \cdot \left(\frac{\rho^2}{2R} - \rho + \frac{R}{2} \right), \quad (19)$$

где ρ - текущий радиус в поперечном сечении цилиндрического образца (рис.5);

$\sigma_{\delta}(i, R)$ - относительное равномерное удлинение по всему сечению бетона.

Форма кривой деформации принимается неизменной от сечения к сечению. В формуле (19) принята квадратная парабола. Экспериментальные исследования автора диссертации и других исследователей показали, что такая кривая хорошо описывает деформацию торцевых сечений растянутых образцов.

Основываясь на перечисленных выше допущениях, принята расчетная схема, показанная на рис.5. Учитывая симметрию, рассматривается только половина образца.

Основное уравнение в точке i на уровне поверхности контакта имеет вид

$$y_i - \Delta_{\delta i}(0) - q_i = 0 \quad (20)$$

После необходимых преобразований и учитывая выражение (15), уравнение (20) приобретает вид:

$$\sum_{j=1}^i \sum_{k=\frac{j}{2}}^N A_k \cdot q_k + M \cdot \sum_{j=1}^i n_{1j} \sum_{k=\frac{j}{2}}^N A_k \cdot q_k + B \cdot \sum_{j=1}^i n_{2j} \cdot A_j \cdot q_j + C \cdot q_i = i \cdot m \cdot D, \quad (21)$$

где $M = \frac{F_a}{\pi \cdot d \cdot l^2}$; $B = \frac{5}{12} \cdot R \cdot M$; $C = E_a \cdot M$; $D = l \cdot \Delta \delta_{a0} \cdot M$;

$$n_{1i} = \frac{E_a}{E_{\delta i}}; \quad n_{2i} = \frac{E_a}{G_{\delta i}}; \quad M = \frac{F_a}{F_0}.$$

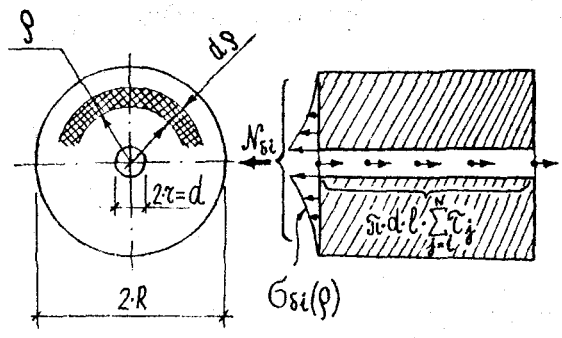
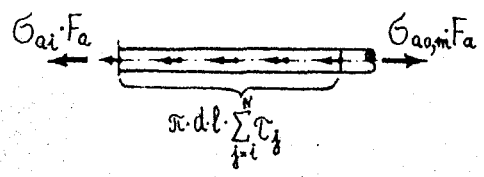
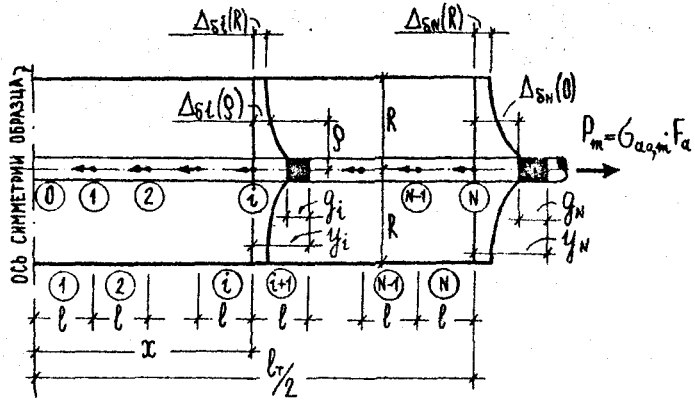


РИС. 5

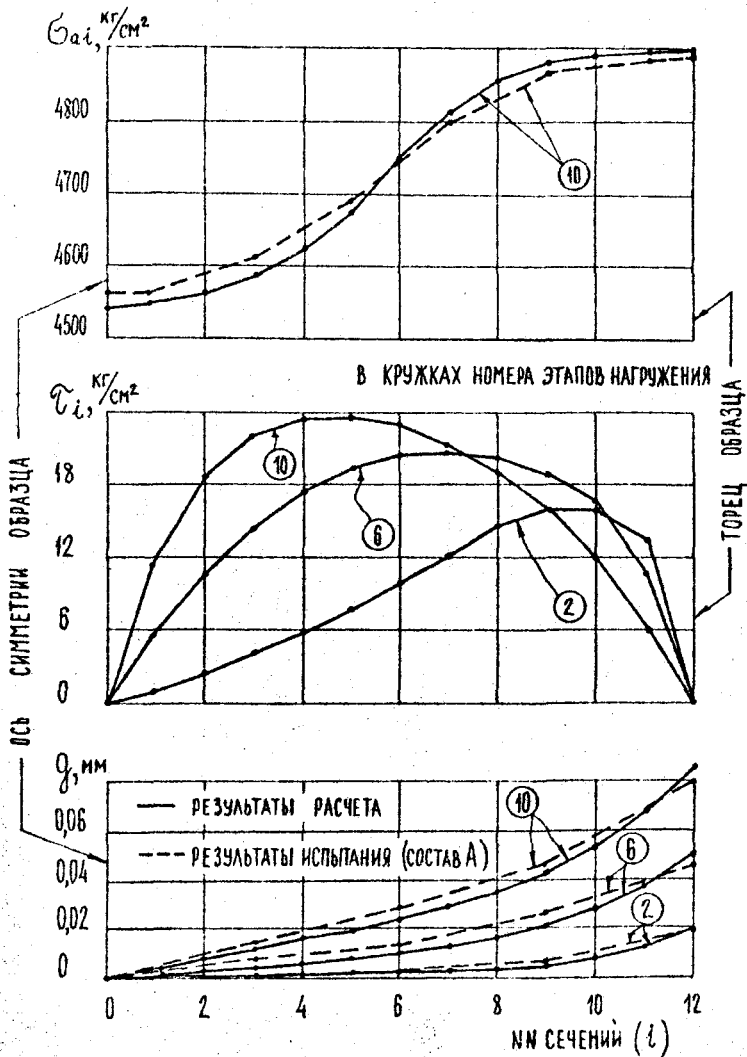


РИС. 6

Положив в выражении (2I) $i = 1, 2, 3, \dots, N$, получаем систему N уравнений.

Коэффициенты при неизвестных в уравнениях системы (2I) зависят от A_i , $E_{\delta i}$ и $G_{\delta i}$, то есть зависят от напряженного состояния сечения i . Значения модулей A_i , $E_{\delta i}$ и $G_{\delta i}$ меняются от сечения к сечению и в каждом сечении от этапа к этапу роста нагрузки $P_m = G_{a_0, m} \cdot F_a = m \cdot \Delta G_{a_0} \cdot F_a$. Поэтому системе (2I) необходимо решать на каждом этапе m роста нагрузки, корректируя значения модулей A_i , $E_{\delta i}$ и $G_{\delta i}$ по сечениям образца в зависимости от напряженного состояния в каждом сечении, то есть применить шаговый метод с необходимыми последовательными приближениями на каждом шаге.

Значение модуля A_i на первом этапе нагружения ($m=1$) вычисляется по формуле (I6) при $g_i=0$, а модули $E_{\delta i}$ и $G_{\delta i}$ - по формулам (I7) и (I8) при $G_{\delta i}=0$. При этом модуль деформаций бетона принимает начальное значение $E_{\delta i}=E_0$. Процесс последовательных приближений продолжается до тех пор пока в каждом сечении не выполняется условие

$$g_i^{(k)} - g_i^{(k-1)} \leq \omega_0 \cdot g_i^{(k)}, \quad (22)$$

где K - номер приближения;

ω_0 - малое, наперед заданное число (например $\omega_0 = 0,05$).

После того, как условие (22) выполнится для всех N неизвестных, задача считается решенной на данном этапе нагружения и приступаем к решению ее на следующем этапе.

По данному алгоритму автором была составлена программа для ЭВМ "Минск 22", рассчитанная на произвольное количество участков дискретизации ($N \leq 40$). Код-программа приведена в приложении диссертации.

Результаты расчетов, выполненных по данной программе, показали хорошую сходимость с результатами опытов (рис.6).

Анализ расчетной модели при помощи машинного эксперимента показал, что результаты расчетов, описывающие напряженное состояние образца, близки к результатам опытов при значениях $C_1 = 4$, $C_2 = 2$ и $\nu = 0,15$. Повышение точности в условии (22) значительно увеличивает число приближений, но слабо оказывается на конечном результате расчета. Изменение числа участков дискретизации N (при

$N > 12$) значительно сказывалось на времени решения задачи, но практически не влияло на результаты решения.

Во всех случаях решения итерационный процесс происходил гладко с примерно равным числом приближений на равных ступенях нагружения. Расхождения в итерационном процессе не наблюдали.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Экспериментально доказано, что характер сцепления определяется законами образования взаимных смещений арматуры и бетона на уровне условной цилиндрической поверхности контакта и что эти законы существенно изменяются при переходе от сечения к сечению по длине заделки арматуры в бетоне, образуя семейство кривых $\tau - \eta$. Выяснена зависимость этих законов от прочности бетона.

Разработана методика получения аналитического выражения дифференцированного закона сцепления, обобщающего все это семейство кривых. Дифференцированный закон сцепления $\tau = f(R_b; \eta; X)$ включает в себя параметры: X - координату поперечного сечения, R_b - прочность бетона. Его общая структура может быть представлена в виде выражения (I4) (рис.4). Конкретные значения коэффициентов отражают условия эксперимента.

2. Установлено, что теория сцепления арматуры с бетоном, опирающаяся на единый для всех сечений закон сцепления, не может точно описать все особенности напряженно-деформированного состояния арматуры и бетона при их взаимодействии.

Предлагаемый расчетный аппарат, основанный на применении дифференцированного закона сцепления арматуры с бетоном, дает результаты хорошо согласующиеся с опытом и может быть использован в исследованиях сцепления арматуры с бетоном, а также при разработке общей теории железобетона.

3. Экспериментально обосновано, что короткий растянутый образец достаточно хорошо имитирует напряженно-деформированное состояние блока между смежными поперечными трещинами в длинном образце при первом нагружении. При разгрузке и повторных нагружениях между ними появляется существенное отличие, определяемое взаимодействием блоков.

4. Статистической обработкой экспериментальных данных установлено, что при первом нагружении (после образования сквозных поперечных трещин в бетоне центрально-армированного растянутого

образца) напряжения в арматурном стержне (σ_a) и смещения арматуры (δ) могут быть вычислены соответственно по формулам (5) и (10). Значения входящих в эти формулы параметров должны быть определены для групп одностипных случаев на основе развернутых экспериментальных исследований.

5. Влияние прочности бетона существенно сказывается на величине напряжений в арматуре $\sigma_a(x)$ и практически не сказывается на величине смещений арматуры в бетоне.

6. По результатам испытания образцов повторной малоцикловой нагрузкой установлено, что в зоне, прилегающей к арматуре, бетон претерпевает при нагружении необратимые деформации удлинения, в связи с чем при разгрузке происходит обжатие призмы арматурным стержнем, втягивание арматурного стержня на торцах образца и закрытие поперечных трещин (на уровне поверхности арматуры) уже при нагрузках, составляющих 0,2 + 0,25 от уровня максимального нагружения.

7. В сечениях с поперечными трещинами величина смещения арматуры относительно бетона δ_0 практически не зависит от количества повторных (до 50 циклов) нагружений.

По материалам диссертации опубликованы следующие статьи:

1. Предложения по построению технической теории сцепления арматуры с бетоном (с учетом длительных процессов). "Вопросы сцепления арматуры с бетоном", сборник научных трудов ЧПИ, № 56, Челябинск, 1968 (Совавторы: Ивашенко Ю.А., Пасешник В.В., Пыльнева Т.М., Оатул А.А., Цехмистров В.М.).

2. Предложения по построению технической теории сцепления арматуры с бетоном (с учетом длительных процессов). "Сцепление арматуры с бетоном", Краткое изложение сообщений на конференции по проблемам сцепления арматуры с бетоном (25-27 июня 1968 г.), Челябинск, 1968 (Совавторы: Ивашенко Ю.А., Пасешник В.В., Пыльнева Т.М., Оатул А.А., Цехмистров В.М.).

3. Экспериментальное определение дифференцированного закона сцепления стержневой арматуры с бетоном. "Исследования по бетону и железобетону", Сборник научных трудов ЧПИ № 73, Челябинск, 1969 (Совавтор Оатул А.А.).

4. Предложения к построению технической теории сцепления арматуры с бетоном (с учетом длительных процессов). "Сцепление арматуры с бетоном", сборник по материалам Всесоюзного научно-технического совещания в Челябинске, Москва, 1971 (Совавторы: Ивашенко Ю.А., Пасешник В.В., Пыльнева Т.М., Оатул А.А., Цехмистров В.М.).

5. Исследование сцепления с бетоном стержней периодического профиля в центрально армированных растянутых образцах. "Исследования по бетону и железобетону", сборник научных трудов ЧПИ № 149, Челябинск, 1974.

К у т и н Юрий Федорович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИДА ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ЗАКОНА
СЦЕПЛЕНИЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В РАСЧЕТАХ СЦЕПЛЕНИЯ
АРМАТУРЫ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ С БЕТОНОМ

Техн. редактор Н. В. Бортникова

ФЕ 04709. Подписано к печати 13/II-75 г. Сдано в печать 14/II-75 г.
Формат бумаги 60x90 1/16. Объем 1,5 п.л. Отпечатано на ротатпри-
те ЧПИ. Тираж 120 экз. Заказ 102/286.