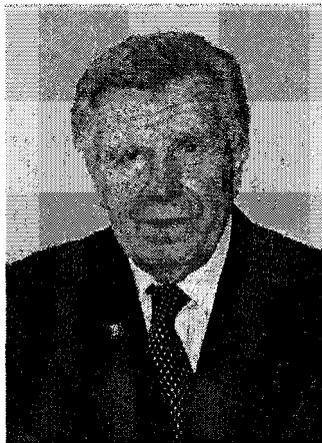


# О РАЗВИТИИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ГИБКИХ ФУНДАМЕНТОВ И ИХ ОСНОВАНИЙ

В.И. Соломин



Соломин Виталий Иванович  
Челябинск, д.т.н., профессор, каф.  
стр. механики ЮУрГУ

Описываются результаты научно-исследовательских работ, выполненных сотрудниками и аспирантами кафедры строительной механики.

После открытия кафедры сложилась группа преподавателей, решивших посвятить себя разработке методов расчета фундаментных конструкций. Выбор этого направления был обусловлен тем, что в конце 50-х, начале 60-х годов в отечественном гражданском

строительстве возникло новое направление – строительство зданий повышенной этажности. Это были высокие (до двадцати и более этажей) сооружения, где несущей частью конструкции был каркас. Нагрузки на колонны сильно выросли и в качестве фундаментов появились гибкие железобетонные плиты. Методы расчета таких плит не были в полной мере разработаны. Существующие аналитические решения охватывали лишь узкий круг частных задач. Не сразу стало ясно, что решение проблемы надо искать в применении численных методов, а также ЭВМ, которые в то время были еще весьма несовершенны и для строительной отрасли трудно доступны.

*Поэтому, основным научным направлением кафедры было избрано построение математических моделей и алгоритмов расчета гибких фундаментных конструкций и их грунтовых оснований.*

Мы начинали не на пустом месте, первые результаты исследований в этом направлении были получены и опубликованы В.И. Соломиным еще в 1960 и 1963 годах в статьях [1, 2]. В них впервые с помощью ЭВМ методом конечных разностей были решены задачи об изгибе прямоугольной плиты, опирающейся на упругое полупространство.

Эти решения открывали пути для построения расчетных моделей не только фундаментов, но и оснований. В развитие работ [1, 2] аспирантами Э.А. Комаровым и В.Н. Широковым была решена задача о расчете прямоугольной плиты, опирающейся на упругий изотропный слой. Для этого потребовалось найти численную реализацию решения проф. К.Е. Егорова для линейно упругого изотропного слоя, который в то время считался лучшей моделью грунтового основания [3].

При расчете конструкций, опирающихся на полупространство или слой, существенной являет-

ся проблема погрешностей расчетов, поскольку на краях конструкций функция реактивных давлений имеет разрывы. В статье В.И. Соломина и Г.В. Трегулова [4] была предложена оценка этих погрешностей путем приближения к точному решению «сверху» и «снизу», что позволило обоснованно назначать шаг сетки при решении задач методом конечных разностей или другим подобным методом.

*Решение задачи расчета плит на слое было темой работы аспиранта Э.А. Комарова, который успешно с ней справился и в 1971 году защитил кандидатскую диссертацию. Им были разработаны алгоритм и программа для ЭВМ, позволившие предложить метод расчета фундаментной плиты гостиницы «Интурист» в Москве, проектирование которой осуществлялось под патронатом НИИ оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова Госстроя СССР (НИИОСП).*

Результаты этих работ были доложены на III Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (1968 г, Москва) и опубликованы в журнале «Основания, фундаменты и механика грунтов».

По этой программе были рассчитаны также фундаменты двух гостиниц, построенных на Смоленской площади, здания Главного вычислительного центра и некоторых других объектов в Москве. Позже были разработаны другие версии этой программы по заказам, главным образом, институтов НИИОСП и Моспроект-1.

На основе решения [3] по заказу института Промзернопроект (Москва) Э.А. Комаровым была решена задача и разработана программа расчета фундаментов силосных корпусов, которая использовалась в проектной практике Московского Промзернопроекта.

К этому же направлению относится и работа аспиранта Р.М. Каримова, защитившего диссертацию в 1987 году. Эта работа, выполнявшаяся по плану важнейших НИР Госстроя СССР, была посвящена разработке метода и программы расчета фундаментных плит зданий, проектируемых для строительства в карстоопасных районах. Место и размеры карстового провала рассматривались как случайные величины. Достоинство проекта оценивалось по соотношению «цена-вероятность аварии». Рассматривались вероятности двух типов: здание непригодно к эксплуатации, но не разрушилось (жертв нет), и здание разрушилось (вероятность этого в любом случае не равна нулю). Эта программа нашла применение в НИИОСП при

проектировании ряда зданий в Москве, поскольку территория Москвы является карстоопасным регионом. Результаты, полученные Р.М. Каримовым, были опубликованы в отечественных изданиях и в трудах VI-й Международной конференции в Инсбруке [5].

Завершением работ этого направления явились программы «ПОРТИК» и «ПОРТИК-S» [6], которые учитывали влияние каркаса здания на распределение усилий и перемещений в фундаментной плите. В разработке их принимали участие аспиранты А.С. Сытник, Н.И. Наумова, доцент В.Л. Высоковский.

Эти программы нашли (особенно «ПОРТИК-S») широкое применение в проектных институтах не только Москвы, но и многих других городов СССР от Кишинева до Хабаровска и от Мурманска до Ставрополя. Ее внедрение в Челябинске (первые здания на плитах по инициативе В.И. Соломина были построены здесь в начале 70-х годов) способствовало существенному прогрессу в области фундаментостроения на Южном Урале. Аспиранты А.С. Сытник и Н.И. Наумова, защитили диссертации соответственно в 1981 и 1984 годах.

Результаты работ этого направления были опубликованы не только в ряде центральных журналов, но нашли отражение в *Руководстве по проектированию плитных фундаментов каркасных зданий и сооружений башенного типа* [7].

Проделанная нами работа была важной для практики и потому, помогала лучше понять проблему, повысить квалификацию сотрудников, но мы видели, что *пути совершенствования расчетных моделей фундаментов и оснований лежат за пределами возможностей аппарата линейной теории упругости, поскольку и железобетон, и грунт - нелинейно деформирующиеся материалы.*

Аспиранту В.Н. Широкову была поставлена задача разработать математическую модель для исследования поведения и несущей способности грунтового основания при нелинейных уравнениях состояния грунта.

Такие уравнения к тому времени были получены в Московском инженерно-строительном институте им. В.В. Куйбышева (МИСИ) в результате проводившихся там трехосных (стабилометрических) испытаний грунтов. Это были уравнения деформационной теории пластичности, выражающие модули объемной и сдвиговой деформаций через компоненты тензоров напряжений и деформаций.

В рамках этих уравнений *В.Н. Широковым, по-видимому, впервые в СССР, было получено решение о круглом штампе на грунтовом основании, где были вскрыты качественные явления, наблюдавшиеся ранее только в экспериментах* [8], а именно: нелинейная зависимость между осадкой штампа и нагрузкой на него, трансформация эпюры реактивных давлений от «седлообразной» к

«параболической», образование под штампом жесткого ядра.

В последующем В.Н. Широковым и его помощниками, среди которых большую роль сыграл доцент Э.Л. Толмачев, была создана она из лучших в стране лаборатория стабиллометрических испытаний грунтов.

Вскоре к этому направлению подключились аспиранты: А.К. Мурашев, А.В. Зеленин, Г.Г. Тугубьев, А.А. Гейнц, В.С. Копейкин, А.Н. Алехин (заочник из УПИ, Свердловск), В.А. Черемных, стажеры из МИСИ им. Куйбышева, Москва.

Понимая, что находимся у истоков нового научного направления в механике грунтов, мы предложили 60-ти ученым страны, наиболее близким к этой проблеме, провести научный семинар по исследованию поведения грунтовых сред под нагрузкой. Предложения были приняты, семинар «Нелинейные проблемы механики грунтов» состоялся в 1978 году на Ильменской турбазе. В нем приняли участие виднейшие специалисты по механике грунтов, представлявшие АН СССР, вузы, отраслевые НИИ и проектные институты 10-ти городов страны. Сосотались выступления многих участников семинара, в том числе В.И. Соломина и доклад В.Н. Широкова, подготовленный им вместе с В.И. Соломиным и аспирантами В.С. Копейкиным и С.Б. Шматковым.

Достижения кафедры строительной механики ЧПИ в области теоретических исследований, возможности созданной на кафедре лаборатории стабиллометрических испытаний послужили основанием к проведению *первой Всесоюзной конференции «Современные проблемы нелинейной механики грунтов» в Челябинском политехническом институте* [9]. Ее организаторами, кроме ЧПИ, были АН СССР, Национальный комитет международной организации по механике грунтов и фундаментостроению СССР (НКМГиФ), НИИОСП. В конференции приняли участие около 200 специалистов из 47 городов страны. Было заслушано 158 докладов, в том числе 3 обзорных, 15 пленарных, 138 стендовых и 2 лекции. В.Н. Широков прочитал обзорный доклад «Лабораторные и полевые методы определения параметров нелинейных моделей грунтов». В.И. Соломиным была прочитана лекция «Учет нелинейных деформаций грунта и железобетона при расчете фундаментов». В числе докладчиков были также аспиранты кафедры: А.Н. Алехин, В.С. Копейкин, А.К. Мурашев, в последствии успешно защитившие кандидатские диссертации.

Наибольших успехов в этом направлении достигли В.Н. Широков, защитивший докторскую диссертацию в 1990 году и В.С. Копейкин, который, продолжая исследования, начатые в Челябинске, стал доктором технических наук позже, уже работая в г. Балаково. Сейчас он профессор, рабо-

тает в Саратовском государственном техническом университете.

Результаты работ этого направления были опубликованы в трудах международных конференций в Будапеште [10], Москве [11], Токио [12], Ахене [13], где В.И. Соломин выступал с секционным докладом на английском языке, Стокгольме [14], Эдмонтоне [15], Гамбурге.

Эти работы направлены были главным образом на совершенствование методов определения осадок сооружений, хотя в некоторых из них рассматривалось взаимодействие фундаментов и оснований и работа собственно фундаментов.

*Вместе с тем следовало заняться и другой проблемой.*

Современные фундаменты все чаще представляют собой гибкие железобетонные конструкции: перекрестные ленты, плиты, оболочки. В таких конструкциях уже в эксплуатационной (допредельной по несущей способности) стадии допускается раскрытие трещин в растянутых зонах, что позволяет использовать прочностные свойства арматуры. При этом ширина трещин ограничивается Нормами, так чтобы они не были опасны для конструкции.

*Как показали эксперименты, изгибные деформации концентрируются в зонах с трещинами, вследствие чего в этих зонах значительно уменьшается жесткость конструкции, что, естественно, должно повлиять на распределение усилий в фундаменте. Прикидочные расчеты показали, что это явление заслуживает серьезного внимания [16].*

Первой кандидатской диссертацией на эту тему была работа В.Ф. Тутьнина, успешно завершенная им в 1972 году. О практической важности полученных им результатов говорит, например, публикация [17].

Обобщению полученных результатов и путям дальнейшего развития этого направления была посвящена статья В.И. Соломина [18].

Дальнейшим развитием этого направления явилась кандидатская диссертация И.И. Шишова, защищенная им в 1974 году. Она была посвящена круглым осесимметрично деформируемым плитам, опирающимся на полупространство [19].

К этому же направлению относится диссертационная работа Г.В. Трегулова, защищенная в 1971 году.

В это время произошло событие, явившееся определенной вехой в развитии методов расчета фундаментных конструкций. Институту НИИОСП и проектному институту Фундаментпроект (Москва) было поручено запроектировать фундамент дымовой трубы, высотой 270 метров для Запорожской ГРЭС. Впервые было решено построить столь высокую трубу на «сжимаемом» основании, т.е. не на сваях и не на скале. Это сделало расчет плиты чрезвычайно ответственным этапом всего проекта. Главный инженер проекта из нескольких, предложенных ему специалистами вариантов расчета,

отдал предпочтение нашему расчету, выполненному И.И. Шишовым. Его результаты и были положены в основу проектирования рабочей арматуры фундаментной плиты запорожской ГРЭС.

Однако *И.И. Шишов* не ограничился разработкой модели плиты и исследованием явления перераспределения усилий и деформаций, он *предложил простой и очень эффективный алгоритм оптимального подбора рабочей растянутой арматуры*. Этот алгоритм позволял во многих случаях достигать значительной экономии стали при улучшении качества расчетов.

Позже в этой же области, но в более строгой математической постановке было выполнено исследование аспирантом М.И. Климовым [20], защитившим диссертацию в 1981 году.

Эти работы вызвали интерес у института ВНИПИ Теплопроект Минмонтажспецстоя СССР, с которым в дальнейшем установились многолетние деловые контакты.

*Теперь, когда мы имели результаты работ В.Н. Широкова и И.И. Шишова, можно было приступить к новому этапу в разработке моделей фундаментных конструкций, учитывающих нелинейные свойства и железобетона, и грунта.*

Это новое направление было поручено разрабатывать аспиранту С.Б. Шматкову. Он должен был разработать метод расчета железобетонной осесимметрично деформируемой круглой плиты, опирающейся на податливое основание. При этом учесть: особенности деформирования железобетона, наличие вертикальных и касательных напряжений на подошве фундамента, нелинейные деформации грунта в рамках усовершенствованной им модели, описанной в [8]. С.Б. Шматков успешно справился с этой задачей. Им было получено решение и составлена программа АРПОС-2, которые вобрали в себя основные научные результаты, полученные предшественниками В.Н. Широковым, И.И. Шишовым и другими.

Благодаря тщательно продуманным исследованиям С.Б. Шматков впервые очертил области применения нелинейных моделей при проектировании фундаментов.

*Кроме этого им был разработан алгоритм оптимального проектирования круглых фундаментных плит сооружений башенного типа, в котором в качестве управляемых параметров были приняты не только коэффициенты армирования растянутой арматурой, но и опалубочные размеры фундамента.*

Эта работа получила высокую оценку практических инженеров. По заказам ВНИПИ «Теплопроект» и его Свердловского филиала по программе АРПОС-2 ее автором были рассчитаны десятки наиболее ответственных фундаментов дымовых труб, высота которых достигала иногда 400 метров. При этом всегда повышалось качество проекта и, как правило, достигался значительный экономический эффект.

Как пример, приведем результаты оптимального проектирования фундамента трубы (высотой 420 м) Чигиринской ГРЭС. Исходные геометрические размеры фундамента и армирование были заданы ВНИПИ Тешюпроект. Оптимальный проект, по которому были изменены и размеры фундамента, и армирование, привел к следующим результатам: объем бетона был уменьшен на 1030 м<sup>3</sup> (10,3%), вес рабочей арматуры на 55 т (29,7%).

Другой пример - фундамент дымовой трубы, высотой 210 м, Челябинской ТЭЦ-3, где применение метода оптимального проектирования позволило, по сравнению с первоначальным проектом, более чем на 60% уменьшить количество рабочей арматуры. Фундамент построен по оптимальному варианту, труба эксплуатируется уже много лет.

*Некоторые результаты этой работы вошли в Рекомендации по оптимальному проектированию железобетонных конструкций, изданные НИИЖБ Госстроя СССР [21].*

С.Б. Шматков защитил диссертацию в 1980 году.

Аспиранты А.А. Дуженков, Е.Ю. Казанцев и А.И. Пелипенко продолжили исследования поведения и прочности гибких железобетонных фундаментов.

Объектом исследований А.А. Дуженкова были фундаментные плиты силосных корпусов. Он разработал решение, в котором учитывались нелинейные деформации и осуществлялась процедура оптимального проектирования арматуры плиты. Кроме того, им была усовершенствована существовавшая в то время расчетная схема, поскольку при определении воздействий на плиту он учитывал податливость силосной части корпуса и колонн, соединяющих корпус с фундаментной плитой. Эта работа нашла применение в некоторых проектах, разрабатывавшихся институтами Промзернопроект в городах Москве и Алма-Ате.

Дуженков успешно защитил диссертацию в 1987 году. В настоящее время работает в одной из проектных организаций Челябинска.

Е.Ю. Казанцев впервые решил задачу о расчете железобетонной плиты с учетом сил распора, возникающих вследствие появления пластических деформаций. Он защитил диссертацию в 1990 году. После защиты диссертации несколько лет преподавал строительную механику, сейчас является руководителем группы расчетчиков в институте «Челябинскгражданпроект».

А.И. Пелипенко была поставлена задача разработать номенклатуру оптимальных по стоимости плит ленточных фундаментов, приняв в качестве управляемых параметров опалубочные размеры и коэффициенты армирования растянутой арматурой. Эта задача была успешно решена [22]. Плиты сейчас широко применяются на строительных объектах Челябинска. А.И. Пелипенко защитил диссертацию в 1990 году. Сейчас живет и работает в Канаде.

Свидетельством признания вклада Челябинской школы в развитие методов расчета фундаментов и оснований было приглашение В.И. Соломина прочитать одну из лекций, открывавших Международную конференцию «Численные методы в геомеханике» в Праге. Эта лекция была прочитана на английском языке [23].

На основании выводов С.Б. Шматкова, упоминавшихся выше, все последующие решения, относящиеся к железобетонным фундаментам, были получены в рамках известных линейных моделей оснований (полупространство, слой, Винклера модель). Однако, практика проектирования требовала создания модели более универсальной, чем перечисленные выше. Такая модель была разработана автором, она позволяет учесть:

неоднородность основания в плане и по глубине основания,

возрастание реактивных давлений в краевых зонах фундамента [24].

Реализована эта модель в программе для ЭВМ, составленной аспирантом Рыжковым А.Ю. Программа успешно применяется в реальном проектировании.

Рыжков защитил диссертацию в 1996 году в настоящее время возглавляет одну из строительных фирм Челябинска.

Коллектив, о котором речь шла выше, создавался более четверти века. Это была пирамида, основанием которой являлись студенческие научные кружки. Следующей ее ступенью были стажеры и молодые преподаватели. Далее шли аспиранты, которые, как правило, занимались научной работой со студентами. На следующей ступени были доценты - консультанты и помощники аспирантов. Это была среда, в которой всем было комфортно, и работа каждого продвигалась споро. Тому способствовали и наши тесные научные связи с головными научными институтами Госстроя и Минмонтажспецстия СССР, международными организациями. Основными источниками финансирования наших работ были Государственные научно-технические программы, которые разрабатывал Госкомитет по науке и технике СССР, а также институты Госстроя СССР.

### *Литература*

1. Соломин, В.И. Расчет прямоугольных плит на упругом полупространстве методом сеток / В.И. Соломин // Строительная механика и расчет сооружений. - 1960, — №6 — С. 12-17
2. Соломин, В.И. Расчет железобетонных фундаментных плит на действие нагрузок, приложенных вблизи угла / В.И. Соломин // Строительная механика и расчет сооружений. - 1963. - №2. - С. 6-11.
3. Соломин, В.И. Расчет прямоугольных плит, опирающихся на упругий слой конечной мощности / В.Н. Широков, Э.А. Комаров // Осно-

вания, фундаменты и механика грунтов- 1968.- № 4.- С. 34-36.

4. Соломин, В.И. О точности решения Б.Н. Жемочкина для круглых плит на упругом полупространстве/В.И.Соломин, Г.В. Трегулов // Основания, фундаменты и механика грунтов.- 1970- №1 - С: 5-7.

4. Соломин, В.И. Расчет прямоугольных плит, опирающихся на упругий слой конечной мощности / В.И. Соломин, В.Н. Широков, Э.А. Комаров // Основания, фундаменты и механика грунтов.- 1968.- № 4.- С. 34-36.

5. Solomin, V.I. Designing of Spread Footing on Karst-Prone Sites / T.A. Malikova, R.V Karimov // Proc. 6th Int. Conf. On Numerical Methods in Geomechanics. Innsbruck. -1988.-P 1157-1159.

6. Соломин, В.И. К расчету фундаментных плит сложной конфигурации и переменной жесткости / В.И. Соломин, А.С. Сытник / Основания, фундаменты и механика грунтов- 1974- № 5- С. 16-19.

7. Руководство по проектированию плитных фундаментов каркасных зданий и сооружений башенного типа. Стройиздат-М.: 1984.-263 с.

8. Широков, В.Н. Напряженное состояние и перемещения висячего нелинейно деформируемого грунтового полупространства под круглым жестким штампом / В.Н. Широков, В.И. Соломин, М.В. Малышев, Ю.К. Зарецкий // Основания, фундаменты и механика грунтов- 1970-№1. — С. 2-5.

9. Современные проблемы нелинейной механики грунтов. Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Челябинск.. 1985.-180 с.

10. Shirokov, V.N. Circular Rigid Plate on a Non-Linear Deforming Base. / V.N. Shirokov, V.I Solomin, V.A Cheremnikh, M.V Malishev//Proc. 4th. Int. Conf. on Soil Mechanics.- Budapest: 1971 -P. 757-764.

11. Solomin, V.I. Results of Solution of non-Linear Problems of Soil Mechanics and Calculation of Foundations / V.I. Solomin / Proc. 8th Int. Conf On Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow.: 1973. v. 4.3.-P 78.

12. Kryzhanovsky, A.L. Prediction of Soil Base Deformation / A.L Kryzhanovsky, A.S. Chevikin, A.K. Bugrov, V.I. Solomin // Proc. 9th Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering.- Tokyo.. 1977-v. 1.-P. 719

13. Solomin, V.I. Numerical Solution for Non-Linear Problems of Relationship between Foundations and Soil Bases / V.I. Solomin, V.S. Kopeikin, S.B. Shmatkov // Proc. 3th Int. Conf on Numerical Methods in Geomechanics. Aachen.. 1979. v 3.-P 1033-1039.

14. Bugrov, A.K, Non-Linear Calculation for Bases and Foundations / A.K. Bugrov, S.B Shmatkov., V.I.Solomin, V.L. Visokovsky // Proc. 10th Int. Conf.

on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm.: 1981 -v. 2.-P 67-68.

15. Kopeikin, V.S. Stress-Strain Relationship of Cohesionless Soil Based on the Nonassociated Flow Rule / V.S.Kopeikin, V.N. Shirokov, V.I Solomin // Proc. 4th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics. Edmonton.: Canada.- 1989-P 243-245.

16. Соломин, В.И. О расчете железобетонных балок на упругом основании с учетом специфических свойств железобетона / В.И. Соломин, В. П. Чирков, В.Ф. Тутьнин // Сб. трудов ЧПИ «Исследования по бетону и железобетону ».- 1969.-№7.-С.2-5.

17. Соломин, В.И. О расчете железобетонных фундаментных балок / В.И. Соломин, В.Ф. Тутьнин / Основания, фундаменты и механика грунтов.- 1971-№2.- С. 16-18.

18. Соломин, В.И. О расчете железобетонных плит и балок, опирающихся на упругое основание / В.И. Соломин // Строительная механика и расчет сооружений.- 1974-№1 -С. 19-21

19. Соломин, В.И. О расчете круглых фундаментных плит с учетом особенностей деформирования железобетона / В.И. Соломин, И. И. Шишов // Строительная механика и расчет сооружений. 1972.- №1 -С. 19-23.

20. Соломин, В. И. Оптимальное армирование круглых и кольцевых фундаментов / В.И.Соломин, И.И. Шишов, М.И. Климов // Бетон и железобетон.-1972.-№1 -С. 19-23.

21. Рекомендации по оптимальному проектированию железобетонных конструкций.-М.. НИИЖБ Госстроя СССР - 1981.- 170 с.

22. Соломин, В.И. Оптимизация стоимости плит ленточных фундаментов / В.И. Соломин, В.Л. Высоковский, А.И. Пелипенко // Основания, фундаменты и механика грунтов.- 1991 - № 6. — С. 9-11.

23. Solomin, V.I. Non-linear Analysis of soil-foundation interaction. Main lecture / V.I. Solomin // Proc. 2" Czechoslovak conference with international participation-IACMAG co-sponsored meeting on numerical Methods in Geomechanics.- 1992- P 109-115.

24. Соломин, В.И. Обобщенная математическая модель осадок поверхности грунтового основания / В.И. Соломин // Третьи Уральские Академические чтения.. Екатеринбург.-1997 -С. 65-69

25. Горбунов-Посадов, М.И. Расчет конструкций на упругом основании / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Малжова, В.И. Соломин.-М.: Стройиздат, 1984.- 679 с.

26. Соломин, В.И. Методы расчета и оптимальное проектирование железобетонных фундаментных конструкций / В.И. Соломин, С.Б. Шматков.- М. Стройиздат, 1986.-208 с.