

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР**

**БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**На правах рукописи
Инженер А.М.Ковловский**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ
В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМАХ**

(05.480 – строительные конструкции)

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

Минск 1971

Работа выполнена в Институте строительства и архитектуры Госстроя БССР.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
ФРОЛОВ Н.П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук КРЫЛОВ С.М.
(НИИЖБ)

кандидат технических наук ВОРОШИЛОВ И.А.
(БПИ).

Ведущее предприятие - Белорусский государственный проектный институт "Белпромпроект"

Защита диссертации состоится 1971 г.
на заседании Объединенного Совета по присуждению ученых степеней по строительным, гидротехническим, строительству коммунальных сооружений и химико-технологическим специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета или прислать Ваши отзывы и замечания о работе (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) по адресу: г. Минск-27, Ленинский проспект, 65, БПИ, ученому секретарю Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ.
Автореферат разослан мая 1971 года.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук, доцент

И.С.КАЧАН

Директивы пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР на 1971-1975 годы предусматривают увеличение капитальных вложений на 36-40 процентов. Высокими темпами будут развиваться мощности строительных организаций, повысится уровень индустриализации строительства. Первостепенная задача партийных, советских, строительных, проектных и научных организаций страны - разумно, по-хозяйски использовать материальные ресурсы в строительстве, обеспечить экономию строительных материалов за счет наиболее эффективного их использования.

В связи с этим совершенствование методов проектирования и расчета строительных элементов из железобетона становится особенно актуальным.

Связанный с задачей оптимального проектирования строительных конструкций вопрос о распределении усилий в статически неопределимых системах является одним из менее изученных в теории железобетона. Существует мнение, что за счет перераспределения усилий всегда можно повысить несущую способность. Однако при этом упускают из вида то обстоятельство, что развитие неупругих деформаций и значительное раскрытие трещин, отвечающие такому состоянию, способны исключить возможность дальнейшей эксплуатации конструкции.

Распределение усилий в неразрезных конструкциях в последние годы стало предметом многочисленных теоретических и экспериментальных исследований. Несмотря на это инженерные методы оценки влияния неупругих деформаций и расчета статически неопределимых железобетонных конструкций до сих пор разработаны недостаточно.

Обширные теоретические и экспериментальные исследования по железобетону (работы А.Ф. Лолейта, А.А. Гвоздева, Я.В. Столярова, В.И. Мурашова, М.Я. Штаермана, В.М. Келдыша и др.) указывают на целый ряд особенностей в его работе, которые затрудняют чисто аналитический подход к расчету конструкций. Поэтому в большинстве случаев обоснованию и принятию расчетных предпосылок и гипотез предшествует выполнение значительного объема экспериментальных работ. До сих пор основное внимание уделялось исследованию нераз-

резных балок, главным образом двухпролетных, т.е. конструкций с минимальной степенью статической неопределимости. Изучение рамных конструкций также проводилось на простейших образцах — П- и Г-образных рамах. В силу такой ограниченности полученный экспериментальный материал оказывается явно недостаточным для суждения о действительной работе статически неопределимых систем. Поэтому железобетонные рамы все еще продолжают рассчитывать как упругие линейно-деформируемые системы.

В Институте строительства и архитектуры Госстроя БССР было предпринято исследование с целью экспериментальной проверки отдельных установившихся положений относительно характера перераспределения усилий в статически неопределимых системах. Опыты проводились на двухпролетных рамах с шарнирно-неподвижным опиранием стоек. Ранее такие работы, как нам известно, не проводились ни у нас, ни за рубежом, что объясняется сложностью постановки эксперимента. Исследовались предельные состояния по прочности, по деформациям и по раскрытию трещин. При этом анализу работы рам применительно к второму и третьему предельным состояниям уделялось наибольшее внимание, потому что анализ результатов многочисленных испытаний показывает: если требования жесткости и трещиностойкости удовлетворены, то прочность таких конструкций заведомо обеспечена и, наоборот, прочность не гарантирует жесткости и трещиностойкости, требуемых по условиям нормальной эксплуатации. Последнее и следует рассматривать в качестве основного критерия определения предельного состояния. Следовательно, определение несущей способности конструкций за пределами упругости является частным вопросом расчета по предельным состояниям.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, двух приложений и включает 70 рисунков и 8 таблиц.

В первой главе излагается состояние вопроса и результаты критического обзора ряда теоретических и экспериментальных работ, относящихся к теме диссертации. Обзор охватывает как отечественные, так и зарубежные исследования статически неопределимых железобетонных конструкций.

В научно-исследовательском институте железобетона на протяжении ряда лет непрерывно ведутся исследования по вопросам распределения усилий в конструкциях с учетом неупругих деформаций и часть полученных результатов обобщено в монографии "Перераспределение усилий в статически неопределимых железобетонных конструкциях" С.М.Крыловым, руководителем и фактическим исполнителем всех этих исследований. Экспериментальные исследования по работе статически неопределимых балок с трещинами до наступления текучести арматуры были впервые тщательно выполнены С.М.Крыловым, С.И.Икрамовым, Ю.В.Зайцевым. Кроме этого следует отметить работы А.А.Гвоздева, А.Р.Ржаницына, А.С.Щепотьева, В.С.Булгакова, В.И.Мурашева, И.И.Улицкого и др.

По предложению А.А.Гвоздева в 1954 году С.М.Крыловым был разработан метод последовательных приближений, который позволяет учесть изменения жесткости конструкции в процессе ее загрузки и на основе расчета упругой системы определить действительное распределение усилий в неразрезных конструкциях. Этот метод был применен Г.А.Красовской для расчета однопролетных рам, А.И.Козачевский произвел расчет таких рам на вычислительных машинах.

Из зарубежных исследований следует отметить работы Г.Казинчи, В.Гленвиля, А.Бекера, И.Гийона, Г.Лина, Г.Ходжа, Л.Чена, Г.Эриста, Р.Гартнера. Заслуживает внимания работа А.Бекера, который, применив метод предельного равновесия, предложил довольно простой прием расчета рамных железобетонных конструкций. Расчет сложных статически неопределимых систем по методу А.Бекера относительно прост, поскольку не требуется решения систем совместных уравнений. Для правильного выполнения расчета необходимо иметь данные о предельной деформации пластических шарниров.

Однако образование пластических шарниров может привести к недопустимой ширине раскрытия трещин и потребует специальной усиленной поперечной арматуры (обоймы), чтобы предотвратить разрушение бетона. Необходимо принимать во внимание и снижение устойчивости, рост пластических деформаций, вызываемых повторными знакопеременными на-

грузками. Кроме того, эти разработки не могут быть нами использованы, так как, исходя из требований эксплуатации, стадию образования шарниров нельзя рассматривать в качестве расчетной.

Работы А.А.Гвоздева и С.М.Крылова дают возможность более успешно анализировать работу железобетонной конструкции с учетом неупругих деформаций. Этими работами установлено, что неупругие деформации в железобетоне существенным образом влияют на перераспределение усилий. Процесс перераспределения носит сложный характер и зависит не только от деформаций арматуры, но и от пластических деформаций бетона, наличия трещин, а при длительных загрузках и от нелинейной ползучести бетона. Однако проблема расчета статически неопределимых железобетонных конструкций все еще далека от своего разрешения и требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

Цель данной работы: 1) опытным путем выявить особенности работы стержневой статически неопределимой системы с более высокой статической неопределимостью при наличии нормальных сил; 2) определить взаимосвязь между изменением армирования пролетных и опорных сечений и изменениями в распределении усилий и деформаций; 3) проверить возможность определения напряженного состояния методом последовательных приближений в стадии работы рам с трещинами и определения разрушающей нагрузки в стадии предельного равновесия; 4) дать рекомендации по расчету, который правильно отражал бы действительную работу железобетонных рам.

Во второй главе дано описание экспериментального исследования двухпролетных рам с шарнирно-неподвижным опиранием строек. Высота стойки опытных образцов рам 62,5 см, пролет ригеля в осях - 150 см. Размеры поперечного сечения ригеля 15х10 см, стойки - 12х10 см. Выбор опытных образцов объясняется возможностью наиболее просто раскрыть статическую неопределимость в процессе испытания и выявить особенности работы стержневой системы с более высокой степенью статической неопределимости при наличии нормальных сил. Все рамы в зависимости от процен-

та армирования пролетных и опорных сечений ригеля подразделялись на 5 видов. Сечения рамы Р-I армировались исходя из упругой стадии работы при действии сосредоточенной нагрузки в середине каждого пролета. Среднее опорное сечение ригеля имело несколько больше арматуры, что было вызвано конструктивными соображениями. В раме Р-II армирование средней опоры ригеля было преднамеренно ослаблено, в этом сечении предполагалось появление первых трещин и образование первого пластического шарнира. Второй шарнир должен был образоваться в одном из пролетов. В раме Р-III, наоборот, ослаблено армирование пролетов. В раме Р-IV процент армирования пролетных и опорных сечений одинаков. В раме Р-V значительно ослаблено армирование средней опоры ригеля при частичном увеличении арматуры в пролете. Стойки рам Р-III, Р-IV, Р-V одинаково армировались 4-мя стержнями диаметром I4, рамы Р-I диаметром I0, рамы Р-II диаметром I2. Арматура всех образцов гладкая горячекатаная класса А-I.

Принятое армирование образцов определяло как место, так и порядок образования пластических шарниров и дало возможность проследить перераспределение усилий в больших пределах.

Расчет рам производился методом сил, исходя из предположения, что жесткость всех сечений постоянна (расчет упругой системы) на две схемы загрузки. По первой схеме сосредоточенная нагрузка прикладывалась в середине каждого пролета ригеля; по второй - 4 сосредоточенные силы прикладывались в каждом пролете.

После конструирования рам производился их перерасчет с учетом принятого армирования. Жесткости приведенных сечений определялись при отсутствии трещин в соответствии с СНиП П-В.1-62.

Опорные реакции и эпюры изгибающих моментов, полученные в результате такого расчета, в последующем сопоставлялись с опытными значениями. Изменение жесткости элементов рамы, ведущее фактически к перераспределению усилий, отражается на величине опорных реакций и значениях этих реакций в процессе испытаний позволяют воспроиз-

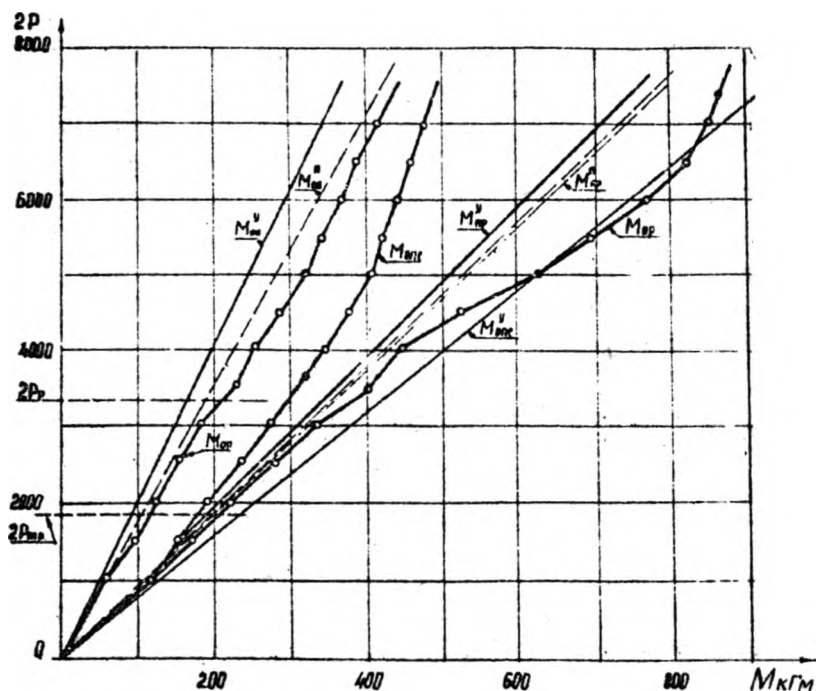


Рис.2.

График изменения значений опорных и пролетных моментов в ригеле рамы Р-УА.

Характерно, что выравнивание моментов в большей или меньшей степени произошло во всех рамах, независимо от вида нагрузки и армирования. Например, напряжения в арматуре крайней опоры рамы Р-ПА фактически достигли расчетных значений при нагрузке, равной $2P = 5140$ кг, а по расчету упругой системы такое состояние достигается при нагрузке, равной $2P = 6030$ кг, в то время как на средней опоре расчетный момент был достигнут при нагрузке $2P = 5700$ кг по расчету же упругой системы при нагрузке $2P = 4750$ кг. Таким образом, перераспределение усилий улучшило условия работы среднего опорного сечения и одновременно ухудшило

условия работы крайнего опорного сечения по отношению к расчетным. Опытами не подтверждено положение, согласно которому увеличение моментов должно было происходить только в более прочном (пролетном) сечении. Увеличение момента крайней опоры ограничило расчетную нагрузку на раму в целом величиной 5140 кг, пролетный же момент достиг своего расчетного значения при нагрузке, равной $2P = 6150$ кг.

При расчетной нагрузке $2P = 5140$ кг относительные деформации арматуры в пролете и на опоре составили соответственно $\epsilon_a = 750 \times 10^{-6}$ и $\epsilon_a = 950 \times 10^{-6}$, что значительно ниже относительного удлинения арматуры $\epsilon_a = 1050 \times 10^{-6}$, соответствующего расчетному напряжению, выявленному по контрольным испытаниям.

Таким образом, оказывается, что в статически неопределимой железобетонной раме в процессе загрузки может произойти увеличение усилий в сечении, где это начальным расчетом не предусматривалось и где значение изгибающего момента по расчету упругой системы является наименьшим. При этом несущая способность такого сечения оказывается недостаточной и расчетное состояние рамы не обеспечено. В этом сечении рано образуется пластический шарнир и как результат этого – раскрытие трещин, недопустимое для нормальной эксплуатации. В то же время изгибающие моменты в других сечениях оказываются ниже своих расчетных значений.

В проведенном анализе за расчетную была принята нагрузка, вызывающая в арматуре наиболее нагруженного сечения напряжения равные расчетным, полученные по опытным значениям предела текучести арматуры, умноженным на коэффициент однородности.

В результате испытаний выяснилось, что произвольное изменение армирования отдельных сечений рам не вызывает пропорционального изменения усилий. Например, при уменьшении армирования средней опоры на 39% и увеличении сечения арматуры в пролете опорный момент уменьшился только на 16,5%. При уменьшении армирования в пролете на 30% и увеличении арматуры на крайней опоре в 2 раза момент в пролете практически не изменился (2,2%), в то время как соотношение сечения арматуры на этой опоре и в пролете

изменилось в 2,84 раза по отношению к исходному. при уменьшении армирования средней опоры на 60% момент уменьшился на 29%.

Отмеченное явление можно объяснить, очевидно, тем, что перераспределение усилий, связанное с изменением жесткостей элементов в процессе трещинообразования, не соответствует во времени стадии истощения несущей способности арматуры, а ширина раскрытия трещин не пропорциональна сечению арматуры.

Перераспределение усилий значительной величины имеет место в рамках, армирование которых выполнено с резким отклонением от расчета упругой системы. Следовательно, перераспределение зависит главным образом от количества растянутой арматуры в наиболее напряженных сечениях. Отсюда, казалось бы, появляется возможность регулирования усилий в статически неопределимых системах путем изменения процента армирования отдельных сечений. Действительно, теоретически регулирование возможно, однако нельзя им практически воспользоваться, в связи с тем что изменением армирования не удастся достигнуть пропорционального изменения усилий, то есть неизвестна количественная сторона явления.

Рассмотрены вопросы применения метода последовательных приближений для расчета статически неопределимых железобетонных рам. Жесткость элементов рам определялась по формуле СНиП, но с заменой F_a на F_s , как это следует делать, применяя принцип эквивалентного изгиба.

$$B = \frac{h_0 z_1}{\frac{\psi_a}{E_a F_s} + \frac{\psi_s}{(\gamma' + \frac{1}{3}) b h_0 E_s \gamma}}$$

где F_s - эквивалентная площадь сечения растянутой арматуры

$$F_s = F_a + \frac{N}{\sigma_a}$$

Напряжение σ_a в растянутой арматуре получаем из условия равенства моментов внешних и внутренних сил относительно точки приложения равнодействующей усилий сжатой

зоны бетона

$$N(\ell, -z_1) = \bar{\sigma}_a F_a z_1; \quad \bar{\sigma}_a = \frac{N(\ell, -z_1)}{F_a z_1}$$

Отсюда

$$F_s = F_a + \frac{N}{F_a z_1} = F_a + \frac{N F_a z_1}{N(\ell, -z_1)} = F_a \left(1 + \frac{z_1}{\ell, -z_1}\right)$$

Причем, коэффициент ψ_a в данном случае определяем как для изгибаемого элемента по формуле

$$\psi_a = 1,3 - S \frac{M_{\text{кр}}}{N(\ell, -z_1)} = 1,3 - S \frac{M_{\text{кр}}}{M_s - N z_1},$$

где $N(\ell, -z_1)$ — момент внешних сил относительно оси, нормальной к плоскости изгиба и проходящей через точку приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне.

Такие упрощения позволяют построить алгоритм расчета рам с применением ЭВМ. По разработанному нами алгоритму первоначально производится статический расчет однородной упругой системы методом сил. Элементы рамы разбиваются на участки, в пределах которых изгибающие моменты на основании полученной расчетом эпюры могут рассматриваться постоянными. Определяются приведенные геометрические характеристики каждого участка элемента рамы:

$F_{\text{сн}}, J_n, W_{\text{сн}}, W_{\text{тр}}, z_s$, значения моментов $M_{\text{тр}}^*$ и $M_{\text{кр}}$, значения жесткости B_k . При этом изгибающие моменты на каждом участке последовательно сравнивают с моментом трещинообразования. При $M_n < M_{\text{тр}}^* - R_p^* W_{\text{тр}}$ трещина в сечении нет и его жесткость принимается по формуле

$B_k = 0,85 E_s J_n$, при $M_n > M_{\text{тр}}^*$ трещины есть и жесткость определяется по формуле

$$B = \frac{h_0 z_1}{\frac{\psi_a}{E_a F_s} + \frac{\psi_s}{(\gamma' + \bar{\gamma}) b h_0 E_s \gamma}}$$

Вычисленные значения жесткостей учитываются при повторном определении значений коэффициентов и свободных членов канонических уравнений. Решая уравнения, получаем зна-

чения лишних неизвестных и изгибающих моментов по участкам. Значения моментов используются для уточнения жесткостей на участках рамы во втором приближении и так далее, до получения заданной точности (рис.3).

Этот алгоритм был апробирован предварительно при расчете двухпролетных опытных рам. Практически, если процесс сходиллся медленно, приходилось выполнять до II приближений, значения неизвестных (X_1 и X_2) принимались равными полусумме двух последних приближений. По значениям X_1 и X_2 определены изгибающие моменты в сечениях I-I2, которые сопоставляли с опытными моментами.

Алгоритм был запрограммирован для расчетов на ЭВМ "Минск-22" в двух вариантах. По первому варианту при определении NZ принимали $NZ = 0$, во втором $NZ \neq 0$. Сравнение результатов расчета по обоим вариантам показало незначительное расхождение в величине изгибающих моментов. Это объясняется тем, что в ригелях опытных рам продольные силы сравнительно невелики и, следовательно, не могут оказывать существенного влияния на окончательные результаты расчета. Однако в общем случае второй вариант расчета при $NZ \neq 0$ следует считать более правильным. Как показал расчет, отклонения значений моментов при эксплуатационных нагрузках, определенных на ЭВМ, от их экспериментальных значений составляют менее 6% (рис.4).

Определение расчетной нагрузки на раму в процессе испытания встретило некоторые трудности: напряжения в арматуре в пролетных и опорных сечениях достигали расчетных значений одновременно и при разных нагрузках. Таким образом, оставалось неясным, какая из этих нагрузок может рассматриваться в качестве расчетной. В этом плане нами проанализированы опыты С.М.Крылова (балка ГК-2) и Т.А.Красовской (рамы Р-Ш и Р-У). Результаты подтвердили, что значительное отклонение армирования от определенного по огИБающим эпюрам усилий в ряде случаев может привести к ухудшению работы статически неопределимых железобетонных систем. Для уточнения этого явления с применением приведенного выше алгоритма на ЭВМ был отсчитан ряд рам, запроек-

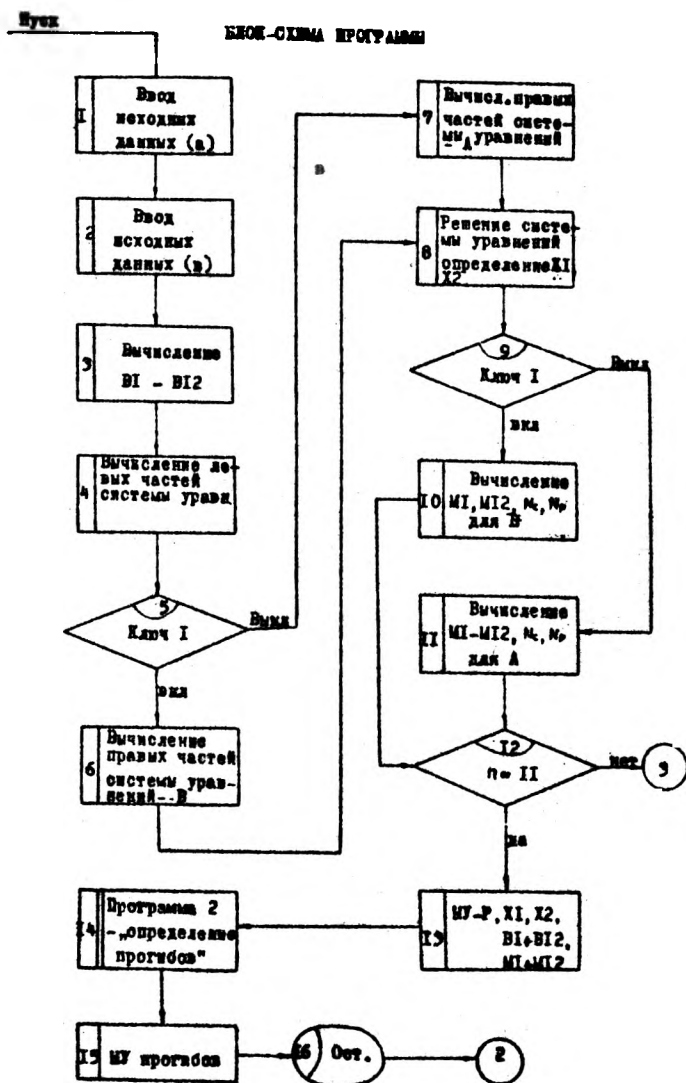


Рис.3.

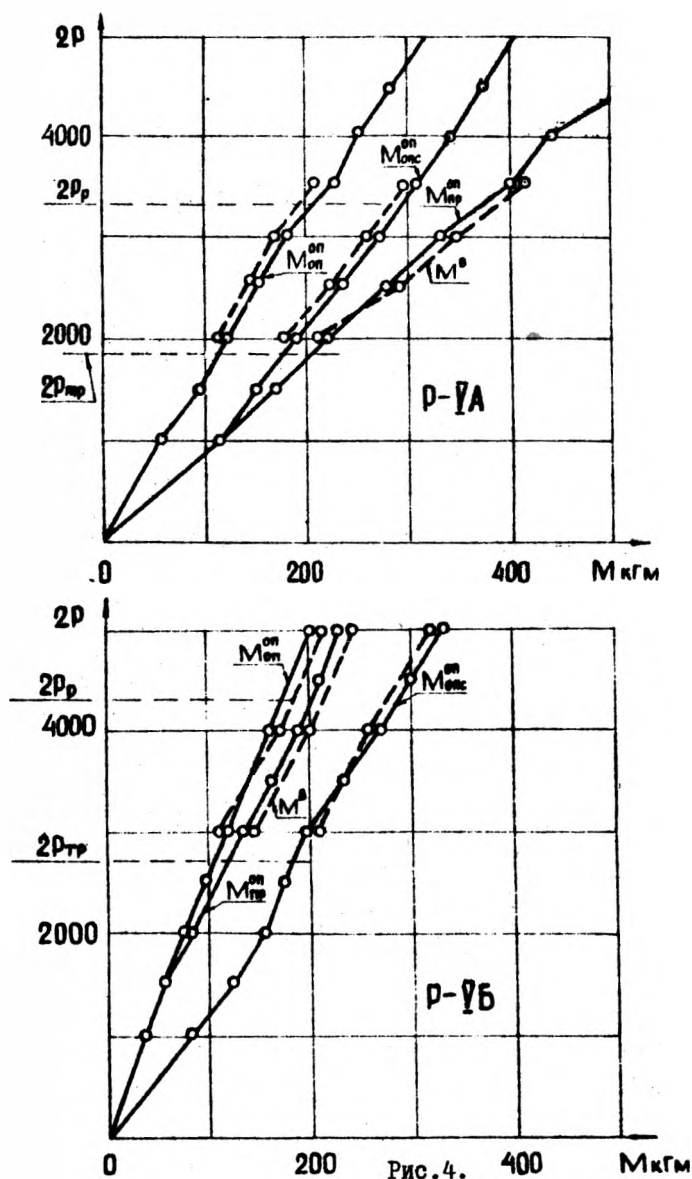


График изменения моментов в ригеле рам Р-7А и Р-7Б.
 M_{on} , M_{mpr} , M_{onc} — опытные значения моментов;
 M^p — то же, полученное из расчета на ЭВМ.

тированных согласно "инструкции по расчету статически неопределимых железобетонных конструкций с учетом перераспределения усилий". В частности, для основной части рам армирование пролетных или опорных сечений отличалось на 30% от армирования, требуемого по расчету упругой системы, для других - на 15%. Эталонные рамы (РТ-I) армировались в соответствии с усилиями, полученными из упругой стадии работы. Для этого рама РТ-I рассчитывалась как упругая система методом сил на действие единичной нагрузки и для нее определено соотношение изгибающих моментов на опорах и в пролете. Наибольший возможный момент на средней опоре определялся из условия полной реализации перераспределения усилий ($S_s \leq 0,6 S_o$) $M_{max} = 0,3 R_u b h_o^2$. В соответствии с максимальной величиной момента была принята арматура ($F_a = 3,08 \text{ см}^2$), а в пролете и на крайней опоре в зависимости от отношения моментов. Так армировались рамы РТ-IA и РТ-IB, остальные - с учетом перераспределения.

В результате обсчета установлено, что изменения армирование отдельных сечений в пределах 30% не удастся повысить расчетную нагрузку на раму, которая в конечном счете определяется несущей способностью менее прочного сечения. Более того, она оказалась меньшей, чем это вытекает при армировании, выполненном в соответствии с расчетом упругой системы. За счет распределения арматуры конструкция превращается в неравнонапряженную. Перераспределение усилий в стадии эксплуатации несколько сглаживает различие в напряжениях по сечениям. Однако, несмотря на относительно замедленный темп роста моментов, достижение расчетного напряжения в ослабленных сечениях происходит ранее, чем в более прочных. Изменение армирования в пределах 15% оказалось более эффективным. При увеличении армирования крайней опоры на 15% расчетная нагрузка оказалась выше нагрузки для всех вариантов распределения арматуры.

В четвертой главе излагаются вопросы, связанные с определением деформаций статически неопре-

делимых железобетонных конструкций. Анализируются прогибы опытных рам. Дано описание процесса составления алгоритма для определения прогибов рам. Освещается исследование влияния изменения армирования ригеля в пределах 30 и 15% на деформативную способность рам в стадии эксплуатации.

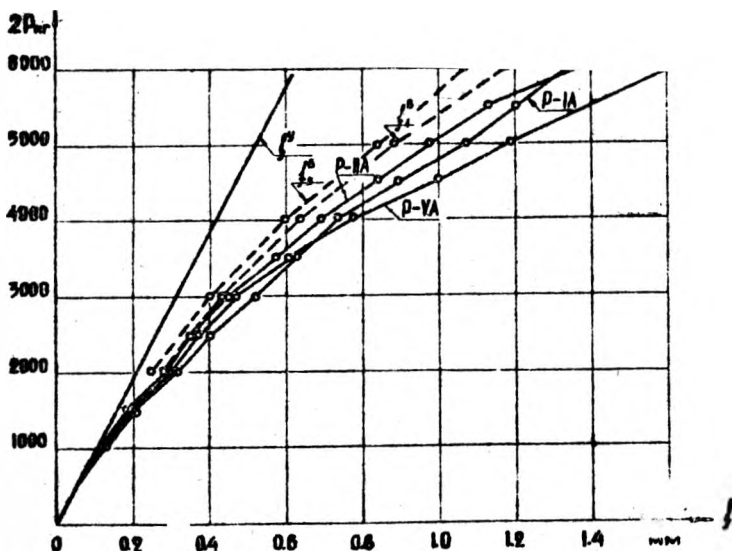


Рис.5

График изменения прогибов середины ригеля рам Р-1А, Р-ПА и Р-УА с ростом нагрузки.

f^y - прогибы упругой системы;

f^m - прогибы, полученные из расчета на ЭВМ.

На рис.5 приведены графики прогибов. Сравнение опытных значений прогибов f^m с прогибами из расчета упругой системы f^y показывает, что полное их совпадение имеет место только в начальный период нагружения. Далее, с возрастанием нагрузки в зависимости от армирования расхождение между f^m и f^y значительно увеличивается и при расчетной нагрузке доходит до 40-50%.

Определение деформаций статически неопределимых железобетонных конструкций может быть выполнено двумя путями, в зависимости от принятых допущений:

1. Жесткость по длине изгибаемого элемента принимается изменяющейся непрерывно соответственно изменению сечения арматуры и изгибающих моментов.

2. Жесткость элемента на каждом участке, где момент не изменяет своего знака, принимается постоянной и равной жесткости наиболее напряженного сечения (по предложению Я.М.Немировского); кривизна $\frac{1}{\rho}$ вычисляется для наиболее напряженного сечения, а далее на участке принимается изменяющейся пропорционально значениям изгибающего момента (СНиП I-62).

В первом случае прогиб определяем по формуле

$$f = \sum \int_0^l \frac{M_i^* M_p^*}{B_x} dx \quad (I)$$

В связи с тем что величины M_p^* и B_x в формуле (I) функционально связаны друг с другом и определяют друг друга в каждый момент нагружения, задача может быть решена только методом последовательных приближений, сущность которого изложена ниже.

Во втором случае прогиб определяется по видоизмененной формуле (I)

$$f = \sum \int_0^l M_x \frac{1}{\rho_x} dx \quad (2)$$

где $\frac{1}{\rho_x}$ - кривизна элемента в сечении X;

M_x - изгибающий момент в сечении X от действия единичной силы по направлению искомого перемещения элемента, приложенной в точке, в которой определяется прогиб.

Учитывая значительное упрощение расчета, получающееся от принятия предложений Я.М.Немировского, определение деформаций по максимальной кривизне сейчас общепринято и формула (2) введена в СНиП I-62.

Однако вопрос определения деформаций статически не-

определимых систем в нормах четко не изложен. Нет указания, как определять кривизну при раскрытии статической неопределимости и при определении прогиба, следовательно неясно и решение формулы (2).

Удобнее прогиб определять по формуле (1), предварительно разбив ее на сумму интегралов

$$f = \sum_1^n \left(\frac{1}{B_1} \int M_1' M_p dx + \frac{1}{B_2} \int M_2' M_p dx + \dots + \frac{1}{B_n} \int M_n' M_p dx \right) \quad (3)$$

где $B_1, B_2 \dots B_n$ — значения минимальной жесткости наиболее напряженных сечений. Суммирование производится по всем участкам элементов системы. Однако использование для вычисления прогибов усилий упругой системы и уточненной эпюры жесткости (довольно условной) может привести к погрешностям вследствие существенного, как было показано в главе 3, несоответствия между действительными усилиями в конструкции и усилиями упругой системы.

Для достоверной оценки деформаций конструкции необходимо учитывать не только распределение жесткостей в ее элементах, близкое к действительному, но и реальные усилия в них. Следовательно, деформации можно определить только после того, как будет известно распределение усилий в различных элементах конструкции при заданной величине нагрузки. Решение задачи усложняется тем, что линейная зависимость между величиной нагрузки и усилиями, определяемыми упругим расчетом, нарушается при изменении соотношения жесткостей различных элементов конструкции вследствие неодинаковой степени раскрытия трещин.

Для исследуемых рам был составлен алгоритм расчета прогиба в середине пролета ригеля после образования трещин. Прогиб получали перемножая эпюры моментов, полученные в результате расчета по методу последовательных приближений (с использованием алгоритма расчета усилий) и эпюры моментов от единичной силы $P = 1$ по направлению искомого перемещения в основной системе. Эпюры моментов разбивались на участки, в пределах которых определяли жесткость.

Получено две формулы для определения прогибов в зависимости от схемы нагрузки и составлена экспериментальная программа. Расчеты выполнялись на ЭВМ. Как оказалось, расхождение между экспериментальными значениями прогибов и вычисленными составило не более 17% (в сторону уменьшения).

Анализом численного эксперимента на ЭВМ получено, что всегда, когда изменение армирования приводило к увеличению расчетной нагрузки, оно же положительно отражалось и на жесткости. В рамках с низкой расчетной нагрузкой прогибы оказались относительно выше.

П я т а я г л а в а посвящена расчету железобетонных рам на прочность. Рассматриваются условия превращения статически неопределимой конструкции в изменяемую систему. Даны примеры частичного разрушения. Приводятся способы определения разрушающей нагрузки при последовательном и одновременном образовании пластических шарниров. Анализируются данные по результатам испытания опытных рам на разрушение.

Если распределение усилий, полученное расчетом упругой системы, рассматривать как действительное, то несущая способность рамы будет исчерпана при достижении предельного усилия только в одном, наиболее напряженном сечении. Однако известно, что разрушение может наступить только тогда, когда пластическое течение имеет место в нескольких сечениях. Разрушающая нагрузка определяется методом предельного равновесия, если конструкция запроектирована без соблюдения принципа равного сопротивления.

Опыты показывают, что железобетонные статически неопределимые конструкции, запроектированные в соответствии с расчетом упругой системы, и особенно запроектированные путем смещения эпюр моментов (прибавления добавочных эпюр) для получения более удобного, с точки зрения конструктивного решения армирования, в результате трещинообразования и связанного с этим явлением перераспределения усилий оказываются неравнопрочными. Следовательно, для таких конструкций определить разрушающую нагрузку возможно только методом предельного равновесия. Сопоставление опытной раз-

рушающей нагрузки с нагрузкой из расчета рамы как упругой системы следует, что значительный недоучет несущей способности имеет место в рамах с резко неравномерным армированием Р-Ш, Р-IV, Р-V.

В любом сечении, в котором момент достиг предельного значения, с повышением нагрузки усилия также увеличиваются. Чем позже образуется последний пластический шарнир после появления первого, тем выше опытная нагрузка разрушающей, полученной методом предельного равновесия.

В приложении I приведена программа расчета на ЭВМ "Минск-22", дана блок-схема программы и инструкция оператору.

В приложении 2 приведены графики изменения усилий и деформаций в опытных рамах и в рамах численного эксперимента. Все выдвинутые в диссертации положения иллюстрируются таблицами или графиками.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании проведенного исследования перераспределения усилий в железобетонных рамах можно сделать следующие выводы.

1. Действительное распределение усилий в элементах статически неопределимых железобетонных рам в стадии эксплуатации отличается от расчетного, определенного по упругой стадии работы.

2. До образования пластических шарниров частичное перераспределение изгибающих моментов может вызвать увеличение усилий в сечениях, в которых согласно расчета упругой системы изгибающие моменты были наименьшими. Эксплуатационная способность такой системы зачастую может оказаться недостаточной и второе и третье предельные состояния необеспеченными. В связи с этим учет перераспределения усилий при расчете статически неопределимых железобетонных конструкций в стадии эксплуатации является обязательным.

3. Предельное состояние по несущей способности не может рассматриваться как единственное, определяющее размеры и армирование статически неопределимых железобетонных конструкций, так как в большинстве случаев нормальная эксплуатация их определяется трещиностойкостью и деформативностью.

4. В качестве критерия, определяющего расчетное состояние конструкций в стадии эксплуатации, следует принять допустимую величину раскрытия трещин или достижение напряжений в арматуре наиболее нагруженных сечений значений, определяющих допустимую ширину раскрытия трещин. Последнее предпочтительнее, так как является более общим и упрощает расчет.

5. Рекомендации "Инструкции по расчету статически неопределимых железобетонных конструкций с учетом перераспределения усилий" о допустимых границах перераспределения усилий по прочности в размере до 30% от данных расчета упругой системы нуждаются в уточнении в каждом конкретном случае, так как произвольное изменение арматуры в больших пределах способно вызвать значительное ослабление отдельных сечений, в которых возникают высокие напряжения и, как результат, - развитие трещин, недопустимое из условий эксплуатации.

6. За счет изменения степени армирования в определенных пределах может быть достигнуто оптимальное распределение усилий и обеспечены требуемые эксплуатационные качества.

7. На основе метода последовательных приближений разработан алгоритм статического расчета железобетонных рам. Составлена экспериментальная программа для расчета на ЭВМ. Использование разработанного алгоритма и программы позволяет осуществить численное моделирование работы железобетонной конструкции в эксплуатационных условиях. Как показали результаты расчета на ЭВМ "Минок-22", рекомендации "Инструкции по расчету ..." о пределах изменения армирования не могут быть безоговорочно распространены на все виды конструкций и схемы нагружения. Только расчет может определить в каждом конкретном случае

оптимальные границы распределения усилий.

8. Расчет железобетонных рам на эксплуатационные нагрузки с учетом переменной жесткости элементов целесообразно выполнять на основе применения метода последовательных приближений.

9. Наиболее рационально запроектированной, а следовательно, и наиболее оптимальной будет такая статически неопределимая конструкция, у которой в стадии эксплуатации напряжения в арматуре основных расчетных сечений будут одинаковыми (с примерно одинаковой шириной раскрытия трещин). Пластические шарниры в такой конструкции будут образовываться почти одновременно, и переходу в стадию предельного равновесия не предшествуют значительные местные деформации, что может расширить круг конструкций, рассчитываемых методом предельного равновесия. Конструкции, удовлетворяющие требованию равнонапряженности, практически возможно получить только итерационным методом расчета с использованием ЭВМ.

10. Как показали вычисления и как это подтверждено результатами испытаний, действительные величины прогибов при кратковременном загрузении в опытных рамах более чем вдвое превосходят величины прогибов, определенных для упругой рамы. Расчет с учетом действительной жесткости элементов рам позволяет получить значения прогибов с высокой степенью приближения к действительным.

11. Несущая способность рамных конструкций просто и достоверно оценивается методом предельного равновесия. При этом может быть применен кинематический принцип метода предельного равновесия.

x x
x

Основные положения диссертации изложены в следующих работах.

1. КОЗЛОВСКИЙ А.М. Новое в испытании рам. Сб. обмена опытом и технической информации МС БССР, № 4, 1967.

2. КОЗЛОВСКИЙ А.М. К вопросу распределения усилий в статически неопределимых железобетонных конструкциях. Материалы научной конференции "Повышение эффективности жилищно-гражданского строительства", г.Минск, 1971.

3. КОЗЛОВСКИЙ А.М. Анализ напряженного состояния двухпролетных рам. Материалы научной конференции "Повышение эффективности жилищно-гражданского строительства", г.Минск, 1971.

4. КОЗЛОВСКИЙ А.М. Распределение усилий в железобетонной раме. "Строительство и архитектура Белоруссии", № 3, 1971. (В печати).

АТ04055 Подписано к печати 13.5.71.
Заказ №38 1 уч-изд.лист. Тираж 200 экз.
Бесплатно.Ротапринт ИСИА Госстроя БССР.