

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ.

РГБ ОД

16 ОИИ 1994

РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ

на правах рукописи

МАРУАН ИСХАН СААД

УДК 539.374

ВВЕДЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ И ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ
НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПЛОСКИХ РАМ.

05.23.17 - строительная механика

А н н о т а ц и я

дисертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1994

Работа выполнена в Ордена Дружбы народов Российском университете дружбы народов.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ- член-корреспондент Российской Академии архитектуры и строительных наук, академик МАН ВШ, доктор технических наук, профессор Ерхов М. И.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОПОНЕНТЫ- доктор технических наук, профессор Косицын С. Б.
- кандидат технических наук, доцент Монахов И. А.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ - Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт комплексных проблем строительных конструкций и сооружений им. В. А. Кучеренко

Защита диссертации состоится 17 Января 1994 г. в 15³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 053.22.08 в Российском Университете Дружбы Народов по адресу: Москва, ул. Орджоникидзе, 3, ауд. 348.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Российского университета дружбы народов по адресу: 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая 6.

Автореферат разослан 23 Декабря 1994 года.

Ученый Секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент

С. Н. Кривошапко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Одной из важнейших задач современной науки и инженерной практики является совершенствование проектирования и методов расчета. Следствием более точного расчета является более экономное использование строительных материалов. Поэтому необходимо разработать методы расчета, которые бы наиболее полно описывали напряженно - деформированное состояние конструкций. Современные методы расчета конструкций, как правило, основаны на решении задач в соответствии со СНИПом в геометрически линейной постановке или на приближенном учете нелинейных эффектов, что в отдельных случаях приводит к завышенным коэффициентам запаса несущей способности или к неопределенному отклонению от возможного точного решения.

Большинство конструкций рассчитывается в упругой области деформирования материала. В определенной мере это связано с требованиями СНИПа, налагающими соответствующие условия на жесткость, прочность, долговечность, работоспособность и т.д. Причиной является также сложность решения математических задач, к которым сводится расчет геометрически и физически нелинейных конструкций. Очевидно, что желательно во всех случаях иметь возможность решения указанных задач на случай возникновения практической необходимости и для оценки ресурсов несущей способности проектируемых конструкций. Однако в ряде случаев это является необходимым - при допущении в эксплуатируемых конструктивных местах относительно немалых перемещений в условиях действия нагрузок большой интенсивности.

Задачи при этом сводятся к определению предельной несущей способности конструкций и соответствующих перемещений (деформаций). В рамках подобных расчетов необходимо учитывать как упругие, так и пластические деформации, т.е. учитывать физическую нелинейность.

В пластической области деформирования могут иметь место относительно большие перемещения отдельных узлов конструкции, неучет нелинейных эффектов (связанных с изменением гео-

метрии конструкции) может привести к неточному определению как предельных нагрузок, так и перемещений.

Одним из наиболее распространенных видов конструктивных систем являются рамы. Расчету рам с учетом геометрической и физической нелинейностей и сравнению наилучших решений в соответствии со СНиПом, с целью выявления оценки экономии материала, посвящена данная работа.

Математические трудности, связанные с получением аналитических решений задач о нелинейном поведении стержневых систем чрезвычайно велики; также решения возможны лишь в отдельных частных случаях. В связи с этим решение таких задач возможно лишь при использовании численных методов с помощью ЭВМ.

Целью диссертации является разработка алгоритма и программы для ЭВМ типа IBM PC, определения напряженно - деформированного состояния плоских рамных конструкций с учетом геометрической и физической нелинейностей, при использовании которых при расчете практически встречающихся промышленных сооружений определяются запасы прочности.

Достоверность результатов основывается на применении классических предпосылок (теории расчета систем с учетом геометрической нелинейности) и сравнительным анализом.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанный алгоритм к программе позволяет использовать их в практике проектирования, а также указать значение запаса прочности и экономии материала для практически встречающихся промышленных зданий.

На защиту выносятся:

-алгоритм и программа на ЭВМ типа IBM PC расчета геометрически нелинейных упругопластичных плоских стержневых систем;

-решение задач по расчету рам в линейной и нелинейной постановках;

-оценка запасов прочности на основе анализа указанных решений.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на XXIX (1993 год) научно-технической конференции инженерного факультета РУДН.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов, списка литературы (88 наименований) и приложения общим объемом 143 страниц. Содержит 46 рисунков и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и постановка рассматриваемых задач, изложено краткое содержание работы.

В первой главе диссертации излагается современное состояние вопроса, определяются цели и задачи исследования. Дается краткий обзор исследований по общим вопросам теории пластичности и геометрической нелинейности. Основное внимание уделено работам, посвященным расчетам стержневых систем.

Основы теории расчетов конструкций при пластических деформациях были разработаны Ильиным А.А., Соколовским В.В., Ишлинским А.Ю., Гвоздевым А.А., Работновым Ю.И., Ивлевым Д.Д., Ерховым М.И., Генки Р., Мизесом Р., Друккером Д., Нилом Б., Прагером В., Хиллом Б., Ходжем Ф.Г. и другими.

При расчете конструкций с учетом пластических деформаций, деформации и перемещения могут достигать таких значений, что становится необходимым учет геометрической нелинейности. Основы расчета, с учетом геометрической нелинейности, изложены в работах Новожилова В.В., Лява А., Лукаша Д.А. и других.

В указанных трудах изложены математические формулировки для различных моделей пластичности и общие нелинейные зависимости между деформациями и перемещениями применительно к трехмерным, тонкостенным, пространственным, стержневым и другим конструкциям, подверженным как статическим, так и динамическим воздействиям.

Эта работа существенно изменяет представление о макси-

мально возможной нагрузке, допускаемой в рамках линейной теории упругости.

Одними из самых распространенных в практике систем являются, стержневые. Хотя теоретические основы расчета различных систем с учетом обоих видов нелинейностей известны, имеющиеся результаты нельзя считать достаточно новыми. С другой стороны, нет определенного мнения о необходимости одновременного учета обоих нелинейностей. Поэтому большое значение приобретает разработка алгоритма и решение конкретных задач, имеющих практическое значение, что позволит оценить те или иные теоретические предпосылки и гипотезы, на основе чего можно судить о реальных резервах несущей способности.

В работах Стриклина Дж., Хейслера В., Риамана В., рассматриваются задачи строительной механики, нелинейность которых связана со свойствами материала и геометрии. Основное внимание обращается на оценку имеющихся численных методов расчета и выявления достоинств и недостатков различных итерационных методов. Эти работы имеют большое значение для разработки новых экономичных, достаточно точных и эффективных численных методов.

В работе Mohamed Z.H., Murgay D.W. излагается метод конечных элементов для исследования больших перемещений упругих рам. В вышеуказанных работах численные результаты приводятся на примере отдельных упругих соединений. В работе Бриджа рассматривается металлическая идеальная рама, учитывается геометрическая нелинейность и строится график зависимости нагрузка - перемещение.

В работе Подторака на основе МКЭ рассматривается широкий круг физических и геометрических нелинейных задач, но автор не рассматривает расчет плоских рам с учетом обоих видов нелинейностей. Ананян В.В. и Ерхов М.И. рассматривают расчет плоских рам с учетом физической и геометрической нелинейностей методом конечных элементов. В этой работе геометрическая нелинейность учитывается точно, а для физической нелинейности использованы произвольные диаграммы работы материала. В работе Хирогуки, Н.Кигоши, Т.Терус построена процедура расчета упругопластических пространственных рам. Недостатком работы является неучет геометрических нелинейностей. В работе Аргириса Ж.Х.,

Бони В., Хиндерланга У., Кляйберга М. представлен конечноэлементный анализ больших деформаций в упругопластичных пространственных рамах. Считается, что пластические деформации сконцентрированы в углах конечных элементов. Рекач Ф.В. и Ерхов М.И. рассматривает деформирование геометрически нелинейных упругопластических пространственных стержневых систем. Приведенный краткий обзор показывает, что несмотря на наличие некоторых решений нет оценок запасов прочности и экономичных методик для конкретных рам, встречающихся в практике.

Во второй главе диссертации излагается алгоритм расчета стержневых систем с учетом геометрической и физической нелинейностей. Алгоритм основывается на следующих допущениях: внешняя нагрузка является однопараметрической и статической; поперечные сечения плоские до деформации остаются плоскими после деформации; изменения поперечных размеров не учитываются ввиду их малости; деформация сдвига от поперечных сил не учитывается; в работе используется упругопластическая модель материала с упрочнением; эффект Баушингера не учитывается. Геометрическая нелинейность учитывается использованием точных выражений деформации относительно перемещений, а именно, продольная деформация бесконечно малого отрезка z равна

$$\epsilon = \sqrt{1 + 2 \text{EPS}} - 1, \quad (1)$$

$$\text{где } \text{EPS} = \frac{d^2u}{d^2x} + \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dx} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2, \quad (2)$$

кривизна вследствие изгиба поперечного сечения КЭ

$$k = \frac{d^2w}{d^2u} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{du}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad (3)$$

С целью анализа влияния физической нелинейности на поведение стержневых систем используется упругопластический

материал с упрочнением. Диаграмма растяжения-сжатия материала задается в программе расчета на ЭВМ по восьми точкам и может описывать любые модели материала.

Для получения решений в физически нелинейной постановке задачи используется метод малых приращений нагрузки, причем на каждом шаге приводятся условия пластичности. В первом приближении считается, что нейтральная ось при изгибе проходит через центр тяжести сечения. По высоте сечение разбивается на n участков. В пределах каждого участка деформации считаются постоянными. Для получения приемлемого решения расчет необходимо вести методом последовательных приближений до тех пор, пока разница в деформациях (перемещениях) на предыдущем и последующем шаге не станет меньше наперед заданного малого числа.

Метод конечных элементов основан на замене реальной конструкции с бесконечным числом степеней свободы приближенной моделью, состоящей из конечного числа элементов, соединенных между собой в узлах. В данной работе основным типом конечного элемента принят призматический балочный конечный элемент с шестью степенями свободы. Перемещения выражаются через угловые неизвестные и функции формы, представленные в полиномах Лагранжа третьей степени. Дискретизация стержневой системы осуществляется таким образом, чтобы сосредоточенные внешние силы были приложены к узлам. Распределенные нагрузки приводятся к узловым силам. Сосредоточенные моменты приводятся к паре сил, приложенной к абсолютно жестким стержням. Для описания напряженно-деформированного состояния стержневых систем с учетом геометрических и физических нелинейностей используется принцип возможных перемещений:

$$\int (\{\Delta \xi(d)\})^T \{P_{вн}(\xi)\} \det |d\xi| = (\{\Delta d\})^T \{P\}, \quad (3)$$

-1

где I - матрица Якоби, $\{P\}$ - вектор внешней нагрузки, $\{P_{вн}\}$ - вектор внутренних сил, $\{\xi\}$ - вектор обобщенных деформаций, $\{d\}$ - вектор перемещений. Уравнения (3) представляют собой нелинейные алгебраические уравнения. Следовательно, приходится использовать приближенные численные методы расчета. Метод решения, рассматриваемый в данной работе, основан на линеаризации нелинейных уравнений, т.е. поиск решения не-

линейных уравнений ведется с помощью последовательного решения линейных уравнений.

Так как в практических расчетах возникает необходимость следить за конкретным состоянием стержневой системы при различных значениях вектора нагрузки $\{P\}$, внешняя нагрузка задается шагами. Поэтому внешние силы увеличиваются пропорционально некоторому параметру. Таким образом, при первом шаге нагрузки элементы вектора-столбца перемещений в первом приближении полагаются равными нулю. При последующих шагах нагрузки элементы вектора-столбца перемещений в первом приближении полагаются равным известным элементам вектора-столбца перемещений, соответствующих нагрузке предыдущего шага.

Программа составлена для ЭВМ типа ИЕМ. Она состоит из основного модуля, управляющей программы и девяти основных подпрограмм. Пользователь дает информацию о числе, типе, виде поперечного сечения, расположении конечных элементов, об их взаимосвязи посредством жестких или шарнирных углов, о граничных условиях. Дается информация о физических свойствах материала, а также начальная величина вектора-столбца нагрузки, шаг нагрузки, точность решения. Подпрограмма 1 определяет общее число неизвестных, каждому конечному элементу ставит в соответствие номера перемещений и их расположение в системе координат для его начала и конца. Подпрограмма 2 формирует направляющие косинусы для каждого конечного элемента. Подпрограмма 3 с помощью подпрограммы 4 формирует матрицу сопротивлений. Подпрограмма 5 управляет процессом формирования матрицы жесткости. Подпрограмма 6 формирует обобщенный вектор деформаций для одного конечного элемента. Считается, что итерационный процесс сошелся, если наибольший по модулю элемент вектора приращений меньше наперед заданного малого числа. Если материал стержневой системы находится в упругопластической области деформирования, то необходимо пересчитывать матрицу сопротивлений до тех пор, пока перемещения при предыдущем и последующем значении элементов матрицы сопротивлений не будут отличаться на наперед заданное малое число. Далее вся необходимая информация (перемещения и т.д.) поступает в блок распечатки. Все внешние силы пропорционально увеличиваются в величину шага нагрузки. Если итерационный процесс

расходится, что является критерием обнаружения предельной точки, то величина нагрузки уменьшается на один шаг, определяется характерное перемещение, корректируется вектор перемещений, затем находится нагрузка P в направлении соответствующего неизвестного. Проверяется, возросло ли значение нагрузки P по сравнению с предыдущим ее значением. Если величина нагрузки P возросла, то предельная точка еще не достигнута и задается следующий шаг по характерному перемещению; из уменьшения величины нагрузки P следует, что предельная точка достигнута, ЭВМ останавливает расчет.

Третья глава посвящена расчету практически встречающихся стальных рам по разработанному алгоритму с учетом геометрической и физической нелинейности, а также в линейной постановке в соответствии со СНиП "Стальные конструкции".

Сначала рассматривается одноэтажная рама с шарнирно-неподвижным опиранием стоек (рис.1) с геометрическими характеристиками: $A_c = 3,06 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $I_c = 2,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$, $g_c = 8,39 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $I_p = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$. Учитывая предельно допустимые горизонтальные ($H/300$) и вертикальные ($L/250$) прогибы по рис.2, находим соответствующие этим прогибам значения нагрузок нелинейной задачи. В результате решения линейной задачи получаем нагрузку 21500 кг. Запас прочности составляет 4,65%.

В качестве второй задачи рассматривается рама ячейки многоярусного каркаса, которая отражает особенности целого класса сооружений (рис.3). Геометрические характеристики аналогичны первой задаче. Результаты решения в нелинейной и линейной постановках представлены на рис.4, где предельное горизонтальное перемещение 1,33 см, а вертикальное - 1,6 см, запас прочности составляет 28%.

В параграфе 3.3 диссертации приводится расчет П-образной рамы с заземленными стойками, пролетом 18 м и высотой 7,2 м (рис.5) с геометрическими характеристиками: $A_c = 118 \text{ см}^2$, $I_c = 38130 \text{ см}^4$, $g_c = 18 \text{ см}$, $A_p = 132,4 \text{ см}^2$, $I_p = 195196 \text{ см}^4$. Сталь 18ПС с расчетным сопротивлением $R = 240 \text{ МПа}$. На рис.6 представлены кривые равновесных состояний в виде зависимости максимальных горизонтальных и вертикальных перемещений от нагрузки. Здесь же указано линейное значение

нагрузки [P]. Запас прочности составляет 24% (предельное горизонтальное перемещение равно 2,4 см, вертикальное - 7,2 см).

Далее приводится расчет одноэтажной рамы промышленного здания с шарнирным соединением ригеля в виде фермы с параллельными поясами и стоек, геометрические характеристики стоек аналогичны предыдущей задаче (рис.7), а ригеля $A_p=1,532 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, $I_p=3,29 \cdot 10^{-2} \text{ м}^4$. Результаты решения представлены на рис.8. Запас прочности составляет 11% (предельное горизонтальное перемещение равно 2,4 см, вертикальное - 7,2 см).

Расчетная схема с нагрузками и размерами показана на рис.9. Ее геометрические характеристики: $A_c=118 \text{ см}^2$, $I_c=38130 \text{ см}^4$, $A_p=132,4 \text{ см}^2$, $I_p=195196 \text{ см}^4$. Результаты решения показаны на рис.10. Получен запас прочности 20%. (предельное горизонтальное перемещение равно 2,8 см, вертикальное - 7,2 см).

Для двухэтажной рамы (рис.11) пролетом 12 м с геометрическими характеристиками: $A_c=126 \text{ см}^2$, $I_c=135000 \text{ см}^4$, $h_c=32 \text{ см}$, $A_p=232 \text{ см}^2$, $I_p=297810 \text{ см}^4$. Полученное решение показано на рис.12. Запас прочности составляет 50% (предельное горизонтальное перемещение равно 4,47 см, вертикальное - 4,8 см).

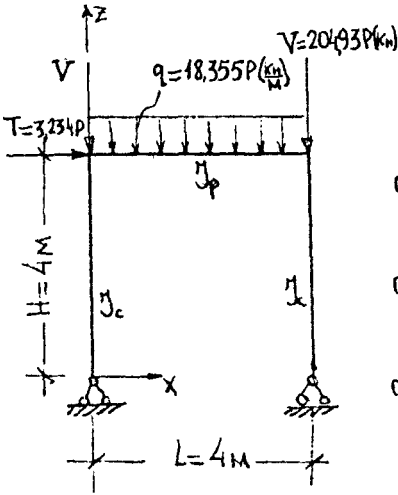


рис. 1

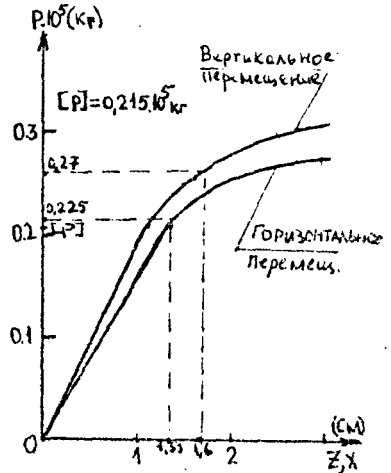


рис. 2

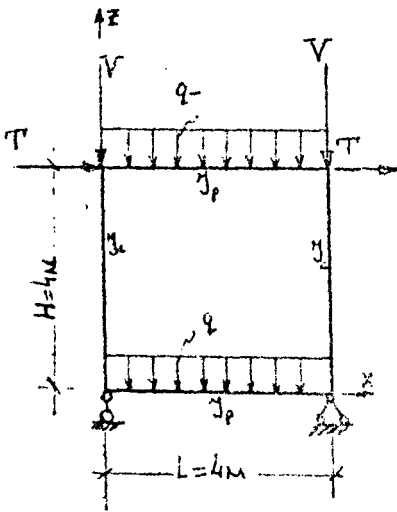


рис. 3

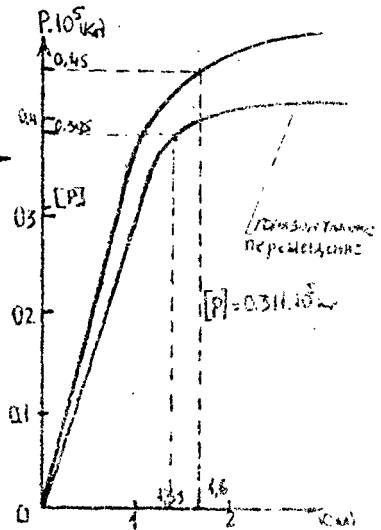


рис. 4

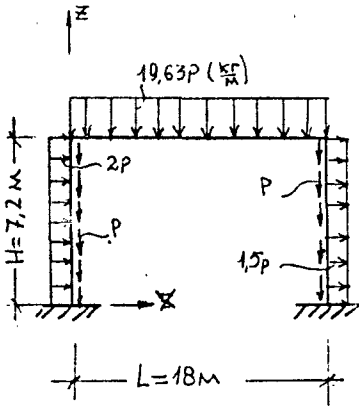


рис. 5

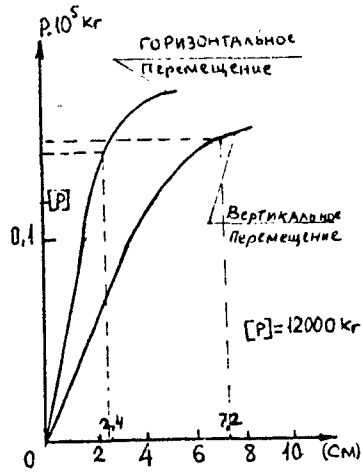


рис. 6

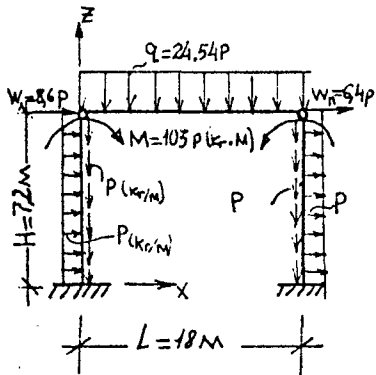


рис. 7

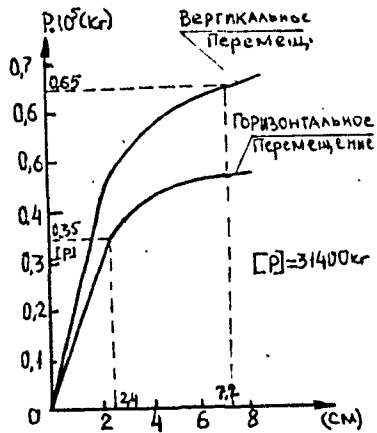


рис. 8

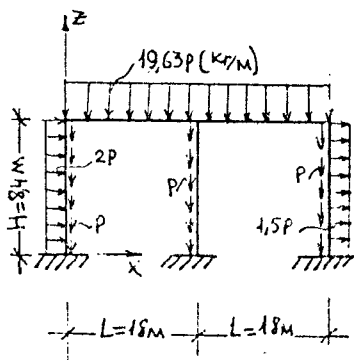


рис. 9

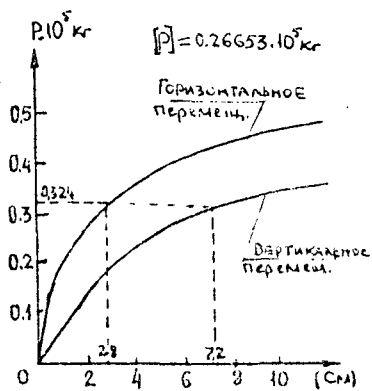


рис. 10

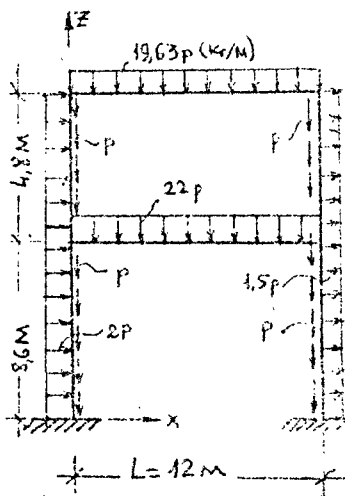


рис. 11

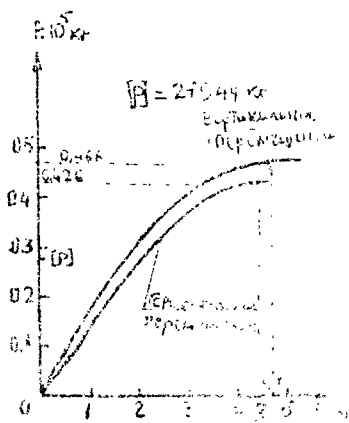


рис. 12

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан алгоритм расчета геометрических нелинейных упругопластических стержневых систем при произвольной диаграмме деформирования материала.

2. Составлена и отлажена программа на ЭВМ типа IBM, реализующая алгоритм расчета геометрически нелинейных упругопластических стержневых систем, основанный на использовании метода конечных элементов, под воздействием статических нагрузок.

3. Получены кривые равновесных состояний в виде зависимости нагрузки от перемещений для одноэтажных, двухэтажных, однопролетных и двухпролетных рам, отражающих особенности целого класса практически используемых промышленных зданий, при различных условиях закрепления и нагрузках в геометрически и физически нелинейной постановке.

4. Указанные задачи решены в линейной постановке традиционным способом в соответствии со СНиП II-23-81^{*}).

5. На основании сравнения решений в линейной и нелинейной постановках получены в среднем запасы прочности (для практически используемых сооружений) от 5 до 50% в зависимости от типа сооружения.

6. Показано, что учет геометрической и физической нелинейности при расчете конструкций дает существенную экономию материалов.

7. Разработанный алгоритм и программа расчета стержневых систем, результаты и полученные запасы прочности для конкретных задач могут быть использованы при проектировании строительных сооружений.

ANNOTATION

Marwan Mikhyl Saad

THE INFLUENCE OF GEOMETRICAL AND PHYSICAL NONLINEARITIES ON DEFORMATION OF PLANE FRAMES.

In accordance with the requirement of CNaR (СНП) the most constructions are settled in elastic stage of deformation of materials. However in some cases it is necessary to take into consideration geometrical and physical nonlinearities to estimate resources of carrier capacity of projected constructions. The dissertation is devoted to working out the algorithm and the program of calculation of frame constructions in geometrical and physical nonlinear statement and solution of practically using frame in pointed out statement in accordance with requirement CNaR to estimate the reserve of solidity on the basis of comparison of found solutions.

It was shown, that the calculation of geometrical and physical nonlinearities of construction gives average 5-50 per cent supply of solidity depend on the kind of construction.

Подписано в печать 25.10.94г. Объем 1 п.л. Тир. 100 экз. 557

Типография РУДН, Ордынскийявде 3