

На правах рукописи

НИДЖАД Амр Яхья Раджех

**МЕТОД РАСЧЕТА РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
НА МАКСИМАЛЬНОЕ РАСЧЕТНОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ
МАКРОМОДЕЛИ**

Специальность 05.23.17 – Строительная механика

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

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» на кафедре строительной механики

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рутман Юрий Лазаревич

Официальные оппоненты: **Беляев Вячеслав Семенович**,
доктор технических наук, профессор,
Северо-Западный филиал ОАО «Проектно-
изыскательский и научно-исследовательский
институт морского транспорта
(Союзморниипроект)», г. Санкт-Петербург,
заместитель директора по научной работе;

Уздин Александр Моисеевич,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВПО «Петербургский государственный
университет путей сообщения», кафедра
теоретической механики, заместитель
заведующего по научно-исследовательской
работе

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный политехнический университет»

Защита диссертации состоится «17» июня 2014 г. в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.03** при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Телефакс: (812) 316-58-72; Email: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/nidzhad-amr-yahya-radzheh>

Автореферат разослан «_____» апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Л. Н. Кондратьева

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Существующие нормативные документы по сейсмостойкости требуют проведения двухуровневых расчетов: а) на проектное землетрясение (ПЗ); б) на максимальное расчетное землетрясение (МРЗ). Расчеты на ПЗ предусматривают линейный расчет зданий, учитывая пластический ресурс путем введения коэффициента редукции K_1 . Расчеты на МРЗ предусматривают прямой динамический расчет зданий с помощью нелинейных моделей, учитывающих возникновение пластических шарниров. Для учета пластического ресурса рамных конструкций при сейсмических воздействиях широко используется упругопластическая модель с одной степенью свободы, которая не позволяет с достаточной надежностью выявить пластический резерв рамных конструкций. Для выполнения надежных, адекватных реальности расчетов приходится создавать модели рамных конструкций большой размерности и использовать для их анализа сложные программные комплексы. Такие расчеты требуют большого временного ресурса, сложного программного обеспечения и высокой квалификации проектировщика.

В работах Ю.Л. Рутмана предлагается обобщение упругопластической модели с одной степенью свободы на случай произвольной системы с n степенями свободы. Такую обобщенную модель он называет макромоделью. Обобщенная модель позволяет учитывать взаимодействие компонентов реакции упругопластической системы. Это взаимодействие оказывает большое влияние на характер процесса при сложном (непропорциональном по компонентам) нагружении. Использование макромоделей существенно повышает точность проводимых расчетов и значительно упрощает подробные динамические упругопластические расчеты, выполняемые в программных комплексах типа «ANSYS». При сейсмических воздействиях реализуется сложное нагружение, т.к. горизонтальные и вертикальные сейсмические воздействия не синхронизированы. Поэтому наиболее перспективно использование макромоделей при анализе сейсмостойкости рамных конструкций.

Необходимым условием применения макромоделей является отыскание поверхностей текучести рамных конструкций. Поверхность текучести рамной конструкции – это геометрическое место точек, соответствующих компонентам обобщенной предельной реакции рамной конструкции, при возникновении которой она превращается в механизм. Допускается считать работу конструкции внутри поверхности текучести чисто упругой, и, как только обобщенная реакция рамной конструкции достигает любой точки поверхности текучести, рамная конструкция превращается в механизм.

Разработка методики исследования поверхностей текучести, программная реализация макромоделей, а также разработка метода расчета рамных конструкций на МРЗ с использованием упругопластической макромоделей представляются весьма **актуальными**.

Степень разработанности проблемы. Исследования сейсмостойкости с учетом пластического ресурса проводились целым рядом ученых (Айзенберг

Я.М., Гвоздев А.А., Гольденблат И.И., Датта Т. К., Жунусов Т.Ж., Корчинский И.Л., Масленников А.М., Нигам Н.Ч., Николаенко Н.А., Ньюмарк Н., Попов Н.Н., Розенблюэт Э., Рутман Ю.Л., Хачиян Э.Е., Харланов В.Л., Чопра А. К., и другие). При поиске литературы, в которой рассмотрены макромодели, нашлись работы только западных ученых. В работах канадского профессора Нигама Н.Ч. в 1967г. было предложено обобщение модели с одной степенью свободы на случай пространственной рамы с двумя степенями свободы. Однако эти обобщения касались простейших элементов конструкций (балок и их сечений). Задача свелась к сложному состоянию одного пластического шарнира, образующегося в колоннах рамы. Кроме того, в указанных работах не было учтено упрочнение материала конструкций. При этом было указано, что учет этого фактора является сложной проблемой. В продолжение работ профессора Нигама Н.Ч., Садик А. В. в 1985г. вывел уравнения для учета кручения в пространственной раме. В этом направлении существуют десятки работ, которые не смогли существенно продвинуть исследование проблемы.

В настоящей работе поверхность текучести конструкций отыскивалась на основе концепции предельного равновесия. Исследованиями в области предельного равновесия занимался широкий круг ученых: Ерхов М.И., Каменярж Я.А., Каюмов Р.А., Ржаницын А.Р., Ольшак В., Мруз З., Пежино П., Чирас А.А., М. Коэн, Рутман Ю.Л. и другие. В настоящей работе существующие методы расчета по предельному равновесию развиты и конкретизированы применительно к рамным конструкциям.

Цель и задачи исследования.

Цель диссертационной работы – разработка метода расчета рамных конструкций на максимальное расчетное землетрясение с использованием упругопластической макромодели.

Задачи исследования:

1. Разработать методику исследования поверхностей текучести для рамных конструкций.
2. Проверить адекватность макромодели путем сравнения результатов, полученных из решения уравнений макромодели, с результатами, принятыми в качестве эталонных.
3. Выполнить реализацию макромодели в виде программы.
4. Сравнить динамические расчеты на максимальное расчетное землетрясение с использованием упругопластической макромодели и модели с одной степенью свободы.
5. Исследовать поверхности текучести для рамных конструкций.
6. Развить макромодель для учета сингулярности в поверхностях текучести рам и выполнить реализацию этого развития в виде программы.
7. Создать метод расчета реальных рамных конструкций на максимальное расчетное землетрясение с использованием макромодели.
8. Выполнить численный анализ реальной рамы с помощью созданного метода.

Объект исследования: плоские рамные конструкции с двумя степенями свободы.

Предмет исследования: упругопластическая макромодель и расчет рамных конструкций на максимальное расчетное землетрясение с использованием упругопластической макромодели.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана методика исследования поверхностей текучести рамных конструкций, основанная как на теории предельного равновесия жесткопластических конструкций, так и на анализе упругопластических решений. Методика позволила применить к динамическому расчету рамных конструкций метод макромодели, смысл которого состоит в снижении размерности динамической задачи.

2. Разработан алгоритм расчета макромоделей рамных конструкций. На основе алгоритма была создана программа расчета рамных конструкций с использованием макромоделей.

3. Выполнено развитие метода макромоделей, позволяющее учесть разрыв производных (наличие угловых точек) в поверхностях текучести рамных конструкций.

4. Разработан алгоритм расчета макромоделей рамных конструкций с учетом сингулярности в поверхностях текучести рамных конструкций.

5. Создан метод расчета рамных конструкций на максимальное расчетное землетрясение с использованием макромоделей.

Методологической основой диссертационного исследования послужили использование современного математического аппарата, теория сейсмостойкости, общепринятые допущения строительной механики, теория упругости и теория пластичности, удовлетворительное согласование результатов аналитического и численного методов расчета, соответствие результатов исследований данным, полученным другими авторами.

Личный вклад соискателя. Все результаты диссертационной работы принадлежат лично автору. Во всех работах, опубликованных в соавторстве, автору в равной степени принадлежит постановка задач и формулировка основных положений, определяющих научную новизну исследований.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК: 05.23.17 – Строительная механика, пункт 7 «Теория и методы расчета сооружений в экстремальных ситуациях (землетрясения, ураганы, взрывы и так далее)».

Практическая ценность диссертационной работы заключается в возможности использования предложенного в диссертации метода расчета при проектировании сейсмостойких рамных конструкций. Этот метод позволяет учесть взаимодействие вертикальных и горизонтальных усилий в рамных конструкциях при их упругопластическом деформировании. Использование результатов диссертации в практических расчетах позволяет выявить новые качественные эффекты динамического процесса при сейсмическом воздействии и, таким образом, существенно повышает адекватность и надежность расчетов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены на:

– научном семинаре «Упругопластический расчет конструкций» в секции строительной механики и надежности конструкций имени Н. К. Снитко, Дом ученых, СПб., 1 февраля 2012 года;

– международном конгрессе, посвященном 180-летию СПбГАСУ «Наука и инновации в современном строительстве - 2012», СПбГАСУ, 10-12 октября 2012 г;

– V-й Международной конференции «Актуальные проблемы архитектуры и строительства», СПбГАСУ, 25 – 28 июня 2013 года;

– 25-й Международной конференции ВЕМ&FЕМ «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов», СПбГАСУ, 23-26 сентября 2013 года;

– научном семинаре «Актуальные задачи динамики конструкций» в секции строительной механики и надежности конструкций имени Н. К. Снитко, Дом ученых, СПб., 13 ноября 2013 года.

Публикации

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 5 печатных работах, общим объемом 2,1 п.л., (лично автору принадлежит 1,45 п.л.), из них 4 статьи в журналах, включенных в перечень рецензируемых изданий, утвержденный ВАК.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы. Общий объем работы составляет 141 страниц машинописного текста, включая 88 рисунков и 7 таблиц. Список литературы состоит из 137 наименований, в том числе 58 – на иностранном языке.

Во введении сформулирована проблема и обоснована актуальность проводимых исследований, определены цель и задачи, научная и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе представлен краткий обзор развития теории сейсмостойкости и методик определения сейсмических сил, а также нормативные требования для учета пластического ресурса зданий и рамных конструкций. Дан анализ работ Нигама Н.Ч., Садика А. В. и Ю.Л. Рутмана. В конце главы – краткий обзор развития теории предельного равновесия конструкций.

Во второй главе предложены методики определения поверхностей текучести для рамных конструкций. Проведена проверка адекватности макромоделей и свойств её уравнений.

В третьей главе реализованы алгоритмы и программы для расчета рамных конструкций с использованием макромоделей, без учета и с учетом упрочнения материала конструкций. Проведено сравнение динамических расчетов рамных конструкций на МРЗ с использованием упругопластической макромоделей и модели с одной степенью свободы.

В четвертой главе проведено исследование поверхностей текучести для рамных конструкций. Выполнено развитие макромоделей для учета сингулярности в поверхностях текучести рам. Разработан алгоритм и программа для учета сингулярности в поверхностях текучести рамных

конструкций. Проведена проверка постулата Друкера в поверхностях текучести рамных конструкций. Описана сущность сравнения расчетов систем по модели с одной степенью свободы и по макромодели.

В пятой главе предложена методика определения жесткостных и инерционных параметров макромодели. Описан переход к критерию прочности в макромодели (переход от перемещений к деформациям). Описан общий метод расчета рамных конструкций на максимальное расчетное землетрясение с использованием макромодели. В конце главы выполнен численный анализ реальной рамы с помощью разработанного метода.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработана методика исследования поверхностей текучести рамных конструкций, основанная как на теории предельного равновесия жесткопластических конструкций, так и на анализе упругопластических решений. Методика позволила применить к динамическому расчету рамных конструкций метод макромодели, смысл которого состоит в снижении размерности динамической задачи.

Поверхность текучести систем с двумя степенями свободы представляет собой плоскую фигуру. Чем больше степеней свободы имеет система, тем большей размерностью обладает поверхность текучести. В данной работе рассматриваются рамные конструкции с двумя степенями свободы.

Уравнения упругопластической макромодели для системы с двумя степенями свободы имеют вид (1–3).

Уравнение движения приведенной массы M :

$$\begin{cases} M(\ddot{U}_x + \ddot{X}) = R_x \\ M(\ddot{U}_y + \ddot{Y}) = R_y \end{cases}, \quad (1)$$

в условиях упругой работы конструкции имеем

$$\begin{cases} \dot{R}_x = D_{11}\dot{U}_x + D_{12}\dot{U}_y \\ \dot{R}_y = D_{21}\dot{U}_x + D_{22}\dot{U}_y \end{cases}, \quad (2)$$

в условиях упругопластической работы имеем

$$\begin{cases} \dot{R}_x = f_{11}(R_x, R_y)\dot{U}_x + f_{12}(R_x, R_y)\dot{U}_y \\ \dot{R}_y = f_{21}(R_x, R_y)\dot{U}_x + f_{22}(R_x, R_y)\dot{U}_y \end{cases}, \quad (3)$$

где $\ddot{X}, \ddot{Y}$ – проекции ускорения основания рамы на оси X, Y ; $\ddot{U}_x, \ddot{U}_y$ – проекции на оси X, Y ускорения массы M относительно основания; R_x, R_y – проекции на оси X, Y усилий взаимодействия между массой и рамой; D_{ij} – упругие жесткости системы; f_{ij} – коэффициенты зависимости между скоростями обобщенных перемещений и усилий, которые определяются из уравнения поверхности текучести рамной конструкции.

В данной работе была разработана методика определения и исследования поверхностей текучести для рамных конструкций. Данная методика предлагает следующие методы: а) метод предельного равновесия (расчет предельного равновесия жесткопластических рам в численной и аналитической форме), б) упругопластический метод.

В методе предельного равновесия использовался следующий прием: прикладывалась единичная нагрузка под некоторым углом к узлу приложения приведенной массы, и коллинеарным увеличением вектора нагрузки рамная конструкция доводилась до уровня превращения рамы в механизм. Изменение угла шло от нуля до 360 градусов. Решением этих задач получали точки, образующие поверхности текучести рамной конструкции. При этом использовался метод псевдожесткостей и аналитические решения теории предельного равновесия.

В упругопластическом методе использовался ПК «ANSYS». Упругопластический расчет рамы проводился при жестком нагружении узла приложения приведенной массы. Такое жесткое нагружение заключается в перемещении узла под разными углами до предельного пластического состояния рамы. Получив в расчете рамной конструкции под любым выбранным углом график изменения обобщенной реакции рамы на протяжении всего нагружения, можно графически аппроксимировать пологий участок рисунка 1а прямой (см. Рис.1б), и точку «В» принять за значение предельной нагрузки. Таким путем получали координаты точек, образующие поверхности текучести рамной конструкции.

Применение обоих методов давало примерно одинаковые поверхности текучести. При этом поверхности, полученные по методу предельного равновесия, больше по площади на 5..10%.

Аналитический метод теории предельного равновесия позволил не только построить поверхности текучести, но и служил инструментом исследования вида поверхностей текучести. Результаты исследования пяти широко используемых рамных конструкций показали, что поверхности текучести рамных конструкций имеют вид многоугольников (см. Рис. 2). Чем больше статическая неопределимость рамы и чем больше число вариантов ее возможных механизмов, тем больше сторон у многоугольника, т.е. поверхность текучести приближается к эллипсу. Расчетный анализ показал, что замена многоугольника текучести эллипсом дает погрешность порядка 10-20%, что допустимо для инженерных расчетов.

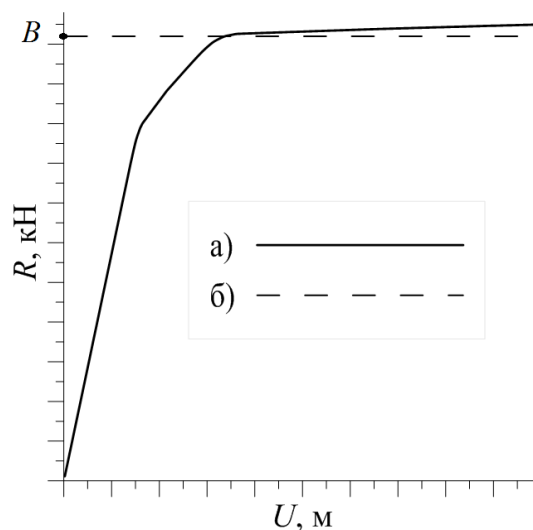


Рис. 1. График изменения обобщенной реакции рамной конструкции R при коллинеарном изменении усилия:
а) силовая характеристика системы;
б) аппроксимация пластического участка характеристики прямой

В многоугольной поверхности текучести каждый ломаный участок отвечает за один вид механизма рамы. Исследуя все возможные механизмы рамы, аналитически, можно найти уравнения всех участков.

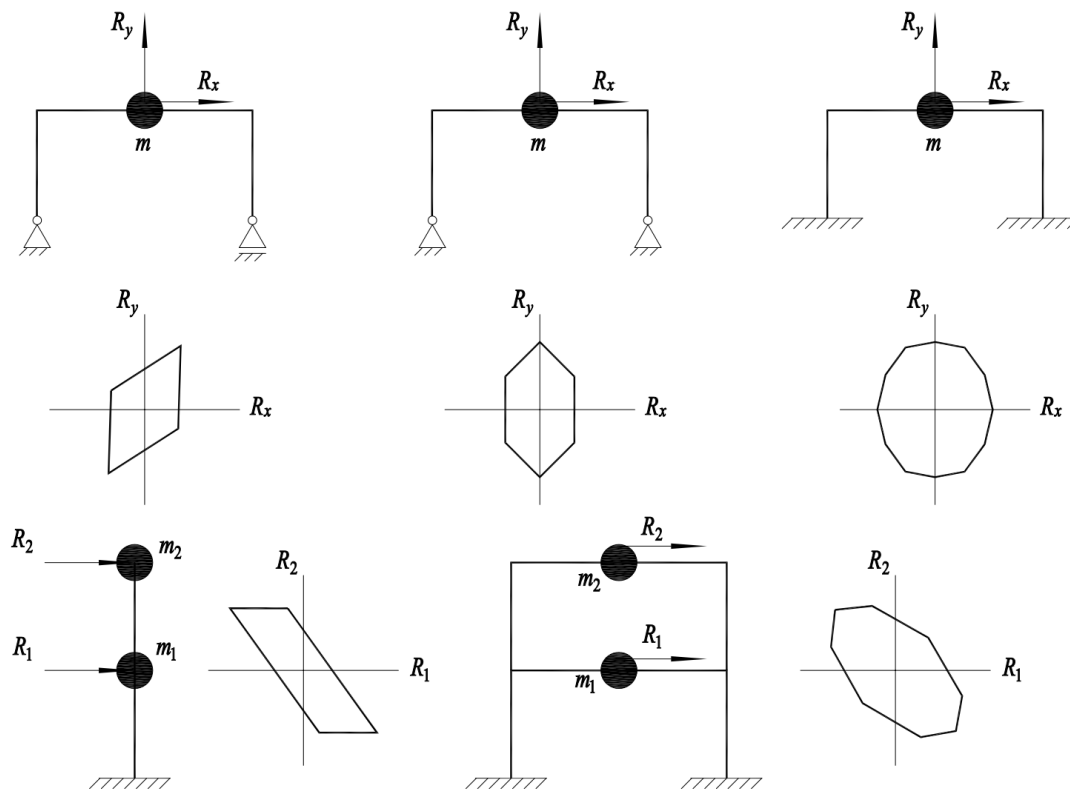


Рис. 2. Поверхности текучести различных рамных конструкций

2. Разработан алгоритм расчета макромоделей рамных конструкций. На основе алгоритма была создана программа расчета рамных конструкций с использованием макромоделей.

а) Реализация макромоделей без учета упрочнения материала конструкции:

Пусть аналитическая аппроксимация этой поверхности текучести или ее части имеет вид $F(R_x, R_y) = 0$.

В этом случае коэффициенты зависимости между скоростями обобщенных перемещений и усилий без учета упрочнения материала конструкции имеют вид

$$\begin{aligned} f_{11} &= \frac{\psi_2^2 (D_{11}D_{22} - D_{12}^2)}{D_{22}\psi_2^2 + 2\psi_1\psi_2 D_{12} + D_{11}\psi_1^2}, \\ f_{12} = f_{21} &= -\frac{\psi_1\psi_2 (D_{11}D_{22} - D_{12}^2)}{D_{22}\psi_2^2 + 2\psi_1\psi_2 D_{12} + D_{11}\psi_1^2}, \\ f_{22} &= \frac{\psi_1^2 (D_{11}D_{22} - D_{12}^2)}{D_{22}\psi_2^2 + 2\psi_1\psi_2 D_{12} + D_{11}\psi_1^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\psi_1 = \frac{\partial F}{\partial R_x}$, $\psi_2 = \frac{\partial F}{\partial R_y}$.

Алгоритм программы динамической упругопластической макромодели без учета упрочнения материала конструкций предоставлен на рисунке 3. В данной программе поверхность текучести рамных конструкций принята в виде эллипса.

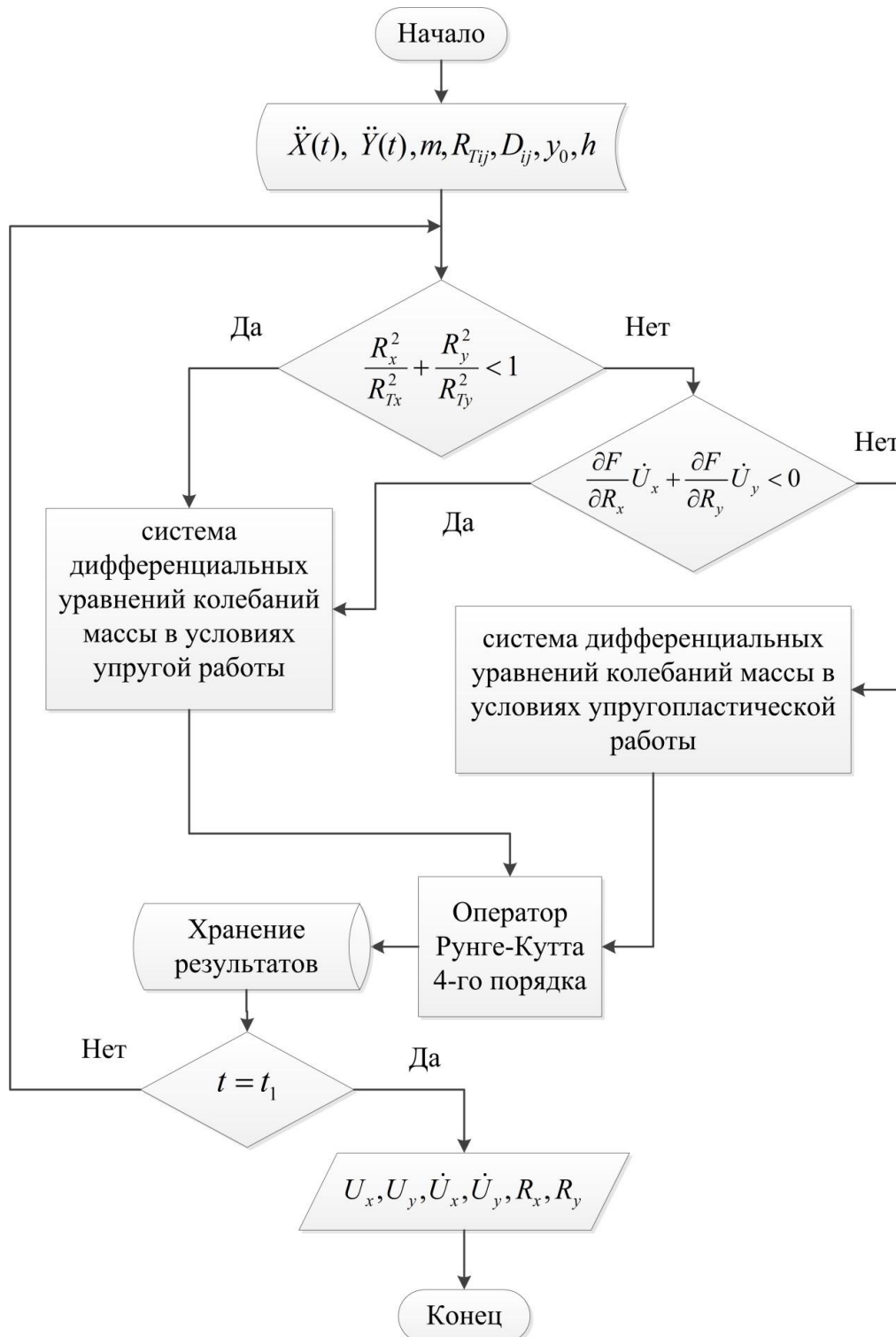


Рис. 3. Алгоритм динамической макромодели без учета упрочнения материала конструкций

Исходными данными программы являются следующие: $\ddot{X}(t), \ddot{Y}(t)$ – инструментальные или синтезированные акселерограммы (законы проекций ускорения основания рамы на оси X, Y); m – значение сосредоточенной

приведенной массы; D_{ij} – упругие жесткости системы получаемые из упругого расчета по двум направлениям; R_{Tij} – вектор предельных нагрузок, радиусы эллипса (поверхность текучести); $y_0 = \{0\}$ – вектор начальных условий; h – шаг интегрирования метода Рунге-Кутты 4-го порядка; $\frac{R_x^2}{R_{Tx}^2} + \frac{R_y^2}{R_{Ty}^2} < 1$ – условие текучести системы; $\frac{\partial F}{\partial R_x} \dot{U}_x + \frac{\partial F}{\partial R_y} \dot{U}_y < 0$ – условие разгрузки.

В качестве тестового примера, однопролетная рама, с сосредоточенной массой в середине пролета, была подвержена динамическому воздействию в виде двух акселерограмм по двум направлениям X и Y . Результаты изображены на рисунках 4,5 и 6.

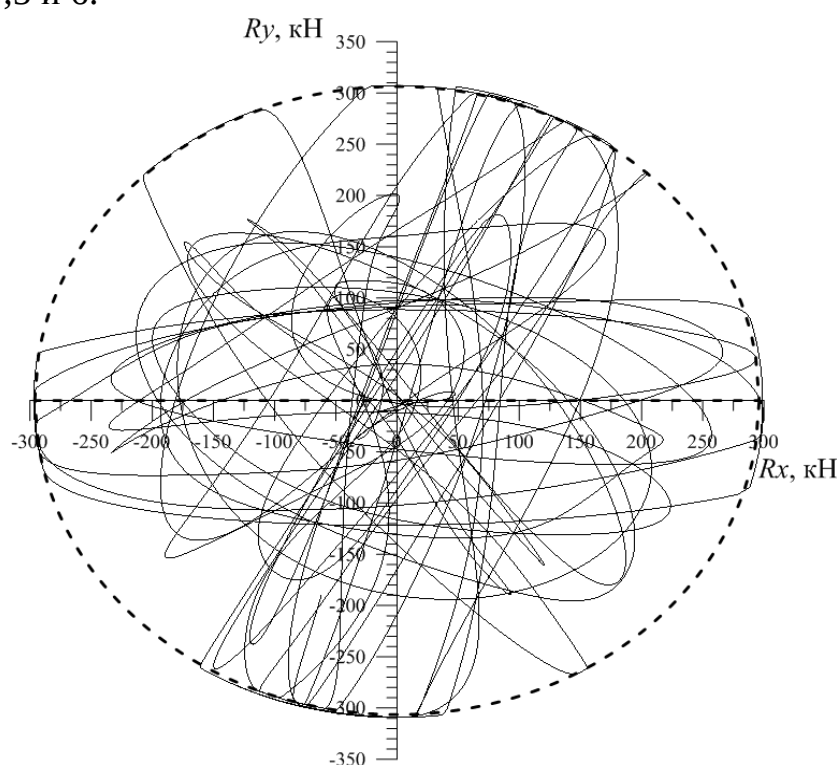


Рис. 4. Годограф изменения обобщенной реакции рамной конструкции, соответствующий решению по макромодели

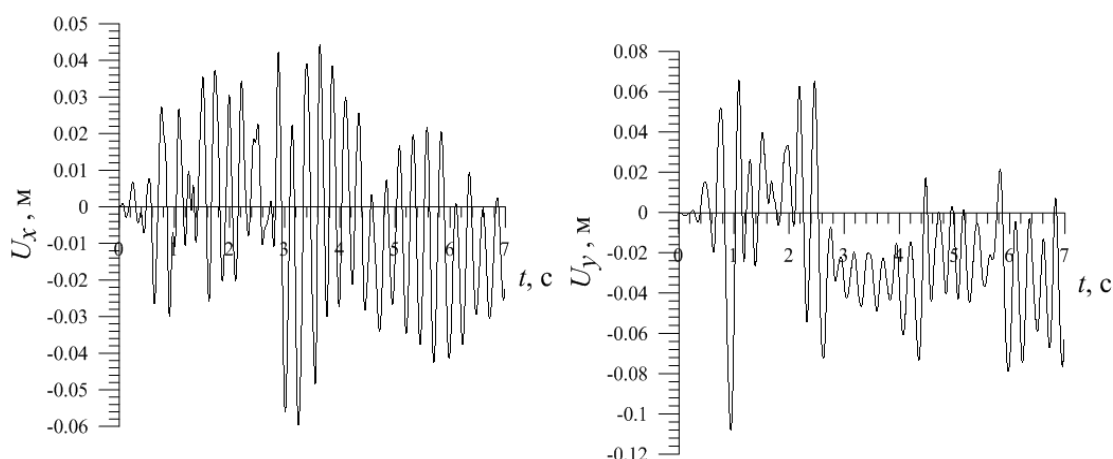


Рис. 5. Перемещения приведенной массы: (слева) по X ; (справа) по Y

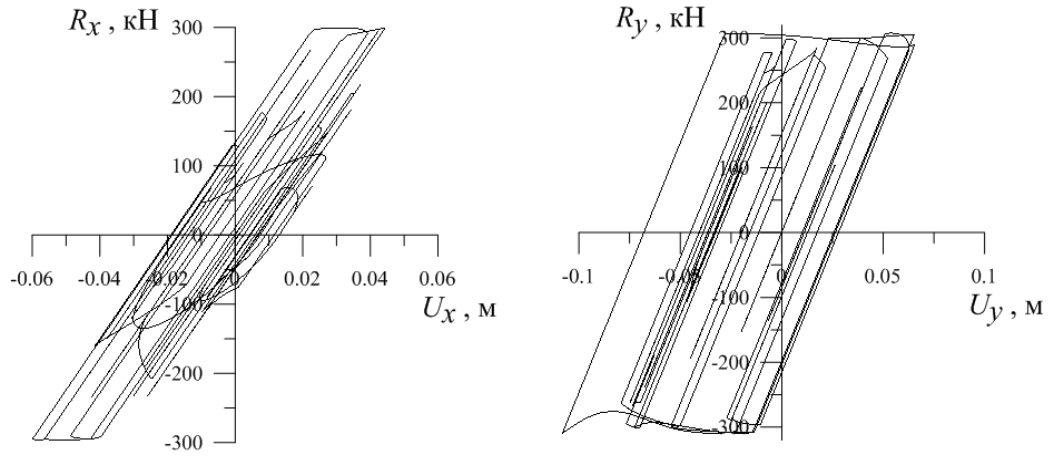


Рис. 6. График изменения обобщенной реакции системы в зависимости от перемещения, приведенной в точке, массы: (слева) по X; (справа) по Y

б) Реализация макромоделли с учетом упрочнения материала конструкции:

При рассмотрении изотропного упрочнения уравнение поверхности текучести макромоделли имеет вид:

$$F(R_x, R_y) = \tilde{R}, \quad (5)$$

$$\tilde{R} = R_0 + \lambda \int_0^t \bar{\dot{U}}^{(p)} dt, \quad (6)$$

где $\lambda \int_0^t \bar{\dot{U}}^{(p)} dt$ – аналог параметра Одквиста, $\bar{\dot{U}}^{(p)} = \sqrt{\alpha_1 \dot{U}_x^{(p)2} + \alpha_2 \dot{U}_y^{(p)2}}$ –

скорости перемещений, сопровождающихся лишь пластическими деформациями; R_0 – параметр, определяющий поверхность текучести в начальный момент времени. Параметр упрочнения λ пропорционален R_0 . Такая структура уравнений принята аналогичной структуре уравнений, описывающих изотропное упрочнение в точке материала.

Коэффициенты зависимости между скоростями обобщенных перемещений и усилий с учетом упрочнения материала конструкции имеют вид

$$\begin{aligned} f_{11} &= \frac{\lambda \sqrt{\alpha_1 \psi_1^2 + \alpha_2 \psi_2^2} D_{11} + B \psi_2^2}{\lambda \sqrt{\alpha_1 \psi_1^2 + \alpha_2 \psi_2^2} + D_{11} \psi_1^2 + 2D_{12} \psi_1 \cdot \psi_2 + D_{22} \psi_2^2}, \\ f_{12} = f_{21} &= \frac{\lambda \sqrt{\alpha_1 \psi_1^2 + \alpha_2 \psi_2^2} D_{12} - B \psi_1 \cdot \psi_2}{\lambda \sqrt{\alpha_1 \psi_1^2 + \alpha_2 \psi_2^2} + D_{11} \psi_1^2 + 2D_{12} \psi_1 \cdot \psi_2 + D_{22} \psi_2^2}, \\ f_{22} &= \frac{\lambda \sqrt{\alpha_1 \psi_1^2 + \alpha_2 \psi_2^2} D_{22} + B \psi_1^2}{\lambda \sqrt{\alpha_1 \psi_1^2 + \alpha_2 \psi_2^2} + D_{11} \psi_1^2 + 2D_{12} \psi_1 \cdot \psi_2 + D_{22} \psi_2^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $B = D_{11} D_{22} - D_{12}^2$.

Алгоритм программы динамической упругопластической макромоделли с учетом упрочнения материала конструкций представлен на рисунке 7.

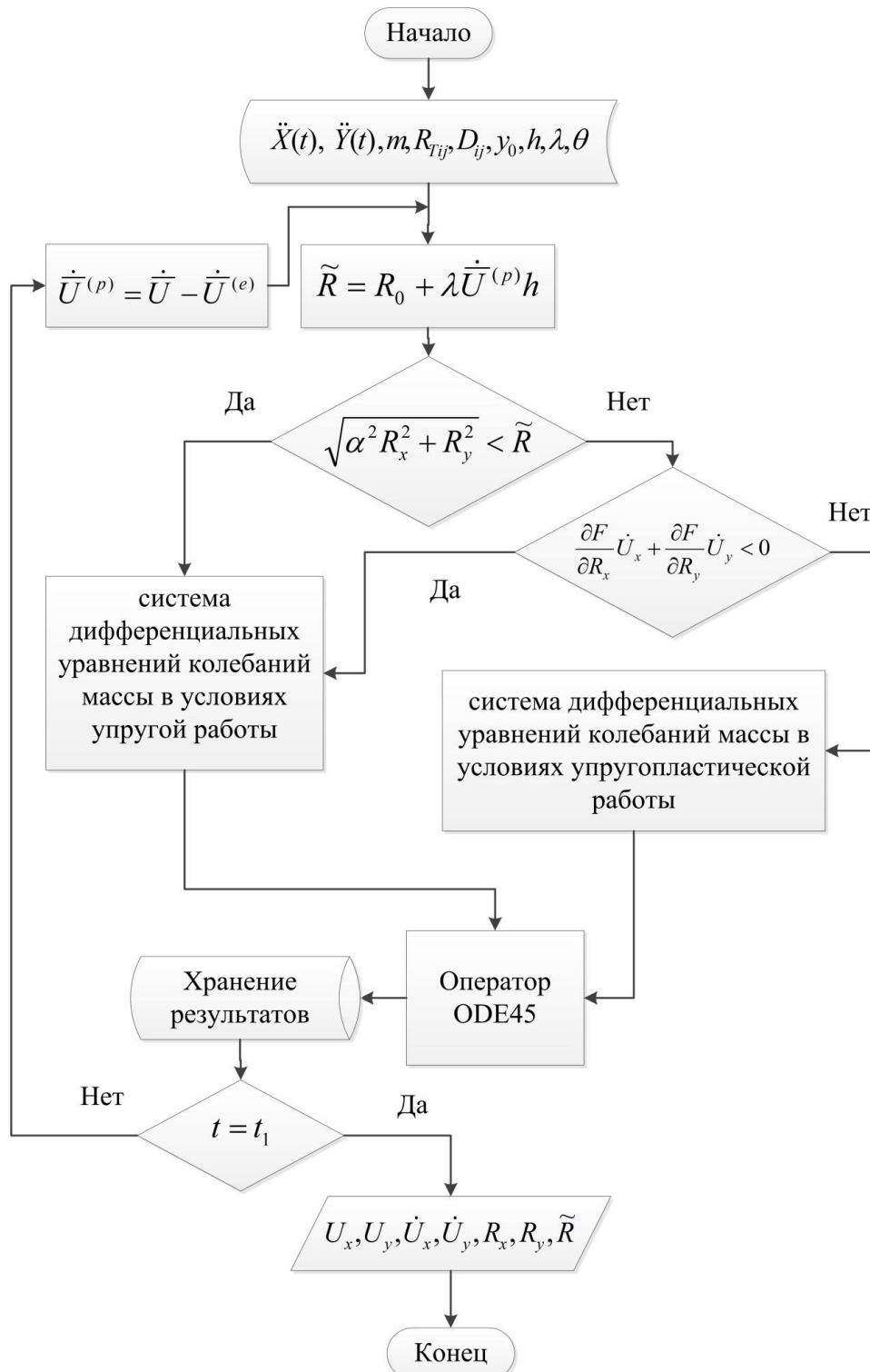


Рис. 7. Алгоритм динамической макромодели с учетом упрочнения материала конструкций

Интерфейс программы и также результаты тестового примера расчета рамной конструкции на МРЗ с учетом упрочнения материала показаны на рисунке 8. В области показа результатов исходная поверхность текучести изображена красным цветом, а зеленым цветом изображена поверхность после упрочнения материала конструкции. Синим цветом изображен годограф изменения обобщенной реакции R рамной конструкции.

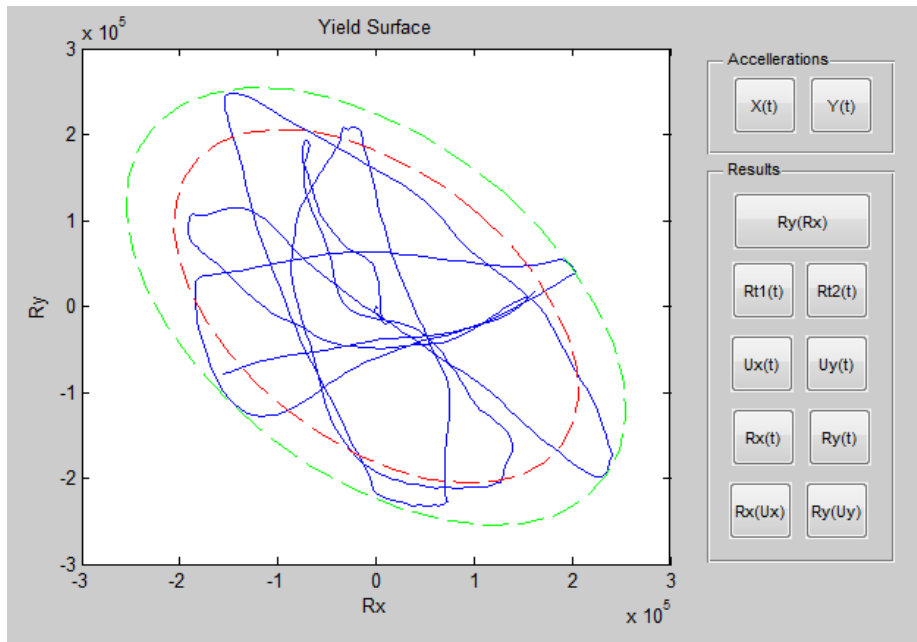


Рис. 8. Результаты тестового примера расчета рамной конструкции на МРЗ с учетом упрочнения материала

В данной работе было выполнено сравнение динамических расчетов рамных конструкций на МРЗ с использованием данной реализованной макромодели и упругопластической модели с одной степенью свободы на воздействие инструментальных акселерограмм. Также было выполнено сравнение этих результатов с результатами, полученными в ПК «ANSYS», которые считались эталонными. Использование макромодели давало результаты, более близкие к эталонному решению, чем модель с одной степенью свободы.

3. Выполнено развитие метода макромоделей, позволяющее учесть разрыв производных (наличие угловых точек) в поверхностях текучести рамных конструкций.

Поверхности текучести, имеющие вид многоугольника, аналитически описываются уравнением

$$\begin{aligned} a_i R_1 + b_i R_2 &= c_i \\ i &= 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (8)$$

где i – номер стороны многоугольника; n – число сторон многоугольника.

В (8) для каждого i

$$R_1 \in (R_{i,1}, R_{i+1,1}); R_2 \in (R_{i,2}, R_{i+1,2}), \quad (9)$$

где $R_{i,1}, R_{i,2}$ – компоненты векторов $\bar{R}_i$, соединяющих начало координат с $i^{\text{бм}}$ углом многоугольника текучести.

При движении $\bar{R}$ по многоугольнику текучести возможно возникновение двух различных ситуаций:

а) Если

$$R_z \in (R_{i,z}, R_{i+1,z}), \quad z = 1, 2,$$

то вектор скоростей пластических перемещений $\dot{\bar{U}}^{(p)}$ направлен по нормали к $i^{\text{ой}}$ стороне многоугольника текучести. В этом случае параметры ψ_1, ψ_2 – константы:

$$\psi_1 = a_i, \quad \psi_2 = b_i. \quad (10)$$

б) Если

$$\bar{R} = \bar{R}_i, \quad (11)$$

то $\dot{\bar{U}}^{(p)}$ находится в секторах $A_i B_i C_i$ (см. Рис. 9). Уравнение (3) переходит в (11), исходя из чисто формальных соображений. Действительно, если $\dot{\bar{U}}^{(p)}$ находится в секторах, образованных перпендикулярами к сторонам многоугольника текучести, проведенными из угловых точек, то вектор $\dot{\bar{U}}^{(e)}$ равен нулю. Следовательно, из работ Ю.Л. Рутмана:

$$\dot{U}_z = \dot{U}_z^{(p)} = K \psi_z, \quad z = 1, 2 \quad (12)$$

где K – коэффициент пропорциональности.

Подставляя (12) в формулу (3), получаем

$$\dot{R}_1 = \dot{R}_2 = 0, \quad (13)$$

что равносильно (11).

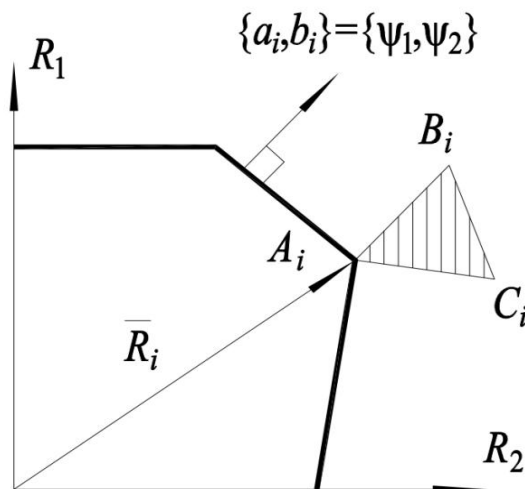


Рис. 9. Развитие макромодели для многоугольных поверхностей текучести

4. Разработан алгоритм расчета макромоделей рамных конструкций с учетом сингулярности в поверхностях текучести рамных конструкций.

Особенность создания алгоритма и программы динамической упругопластической макромодели для расчета рамных конструкций с такими поверхностями текучести заключалась в учете ломаного вида поверхности текучести, что означает необходимость следить за уравнением текучести и условием разгрузки для каждого участка. На каждом участке коэффициенты ψ_1, ψ_2 будут разными. Вторая сложность – это учет точки сингулярности на поверхности текучести.

В данной работе была реализована программа для расчета консоли с двумя степенями свободы (см. Рис. 10.а). Поверхность текучести таких конструкций имеет вид рисунка 10.б.

Задача состояла в определении координат точек A , B , C и D на рисунке 10б. Из уравнений текучести (уравнений линий 1-4) были получены координаты всех точек сингулярности на поверхности текучести.

По аналогии создания этой программы можно реализовать макро модель для любых видов многоугольных поверхностей текучести.

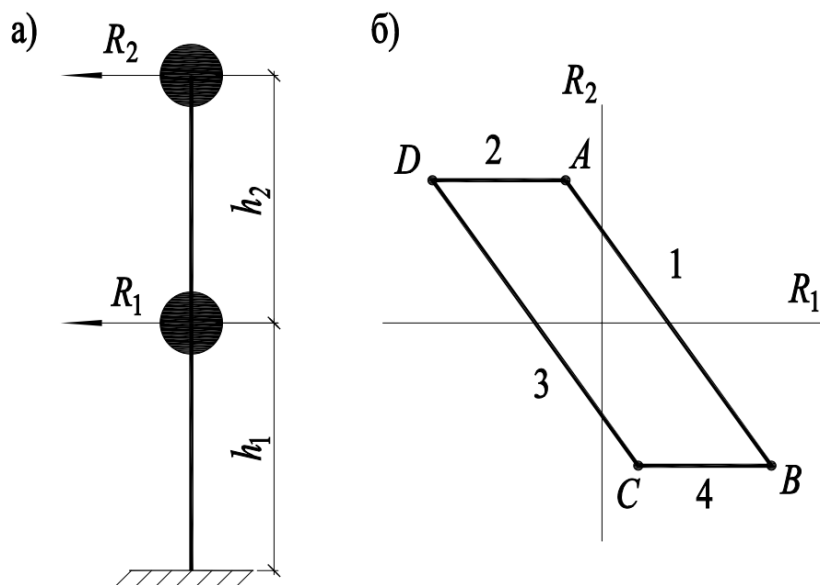


Рис. 10. Расчетная схема и поверхность текучести консоли с двумя степенями свободы

5. Создан метод расчета рамных конструкций на максимальное расчетное землетрясение с использованием макромоделей.

После изучения макро модели, проверки ее адекватности, ее реализации, исследования поверхностей текучести рамных конструкций и способов их построения стало возможно описать по пунктам метод расчета реальных рамных конструкций на МРЗ с использованием макро модели. Этот метод заключается в следующем:

- Приведение работы пространственной системы к плоской.
- Определение упругих жесткостей рамы D_{ij} .
- Определение приведенной массы рамы $m_{пр}$.
- Построение поверхности текучести рамы методом предельного равновесия или упругопластическим методом.
- Если поверхность текучести близка к форме эллипса и требуемая точность расчета невелика (приближенный инженерный расчет), то можно воспользоваться алгоритмом метода макро модели, реализованным в данной диссертационной работе.
- Для более точных результатов необходимо учесть точки сингулярности в поверхности текучести рамы путем изучения всех возможных механизмов и получения уравнений, отвечающих за них.
- Если искомым критерием расчета является максимальное перемещение, то в макро модели достаточно ввести ограничение по перемещениям.

- Если искомым критерием расчета является максимальная деформация, то следует переходить от критерия перемещений к критерию деформаций.

Общие выводы

1. Разработана методика исследования поверхностей текучести для рамных конструкций.
2. Разработаны алгоритмы и программы для расчета рамных конструкций с использованием макромоделей.
3. Выполнено развитие макромоделей для учета сингулярности в поверхностях текучести рамных конструкций и выполнено реализация такого развития.
4. Создан метод расчета рамных конструкций на максимальное расчетное землетрясение с использованием макромоделей.

III. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Ниджад, А. Я.** Проверка адекватности метода макромоделей / А. Я. Ниджад, Ю. Л. Рутман // Вестник гражданских инженеров. – 2012. № 3 (32). С. 137-142 (0,4/0,2 п. л.).
2. **Ниджад, А. Я.** Сравнение динамических расчетов рамных конструкций на МРЗ с использованием упругопластической макромоделей и модели с одной степенью свободы / А. Я. Ниджад // Морские интеллектуальные технологии. – 2012. № 4 (18). С. 51-54 (0,3 п. л.).
3. **Ниджад, А. Я.** Исследование поверхностей текучести для рамных конструкций / А. Я. Ниджад, Ю. Л. Рутман // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 3 (38). С. 87-92 (0,4/0,2 п. л.).
4. **Ниджад, А. Я.** Реализация метода макромоделей для расчета рамных конструкций на максимальное расчетное землетрясение / А. Я. Ниджад // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №2; URL: <http://www.science-education.ru/116-12449> (0,5 п. л.).

Публикации в других изданиях:

5. **Ниджад, А. Я.** Упругопластическая макромодель и её применение к расчету рамных конструкций на сейсмические воздействия / А. Я. Ниджад, Ю.Л. Рутман // Актуальные проблемы архитектуры и строительства: V-я Международная конференция / СПбГАСУ – В2ч.Ч.I. – СПб, 2013. – С.416-423 (0,5/0,25 п. л.).