



АБРАГИМ ХУССЕЙН АБДУЛАЗИЗ АБРАГИМ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ,
УСИЛЕННЫХ В НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре теоретической механики и сопротивления материалов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Научный руководитель

доктор физ. – мат. наук, профессор
Серазутдинов Мурат Нуриевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Ибятков Равиль Ибрагимович,

доктор физико-математических наук,
профессор Каюмов Рашид Абдулхакович.

Ведущая организация -

учреждение российской академии наук
институт механики и машиностроения
Казанского научного центра РАН.

Защита состоится « 15 » декабря 2011 года в 14:00 ч, на заседании диссертационного совета Д 212.080.13 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» по адресу: 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, ауд. А-330.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный гербовой печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.080.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского национального исследовательского технологического университета.

Автореферат разослан « 9 » ноября 2011г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



А.В Клинов.

Актуальность работы. Реконструкция сооружений, в ряде случаев связаны с необходимостью увеличения эксплуатационных нагрузок на существующие конструкции, что является причиной их усиления при действии внешних нагрузок.

Усиление эксплуатируемых сооружений также может проводиться с целью восстановления их несущей способности, частично утраченной из-за возникших повреждений или ослаблений несущих элементов.

Прочность сооружений ограничивается несущей способностью их отдельных элементов, поэтому, как правило, усиливаются не все элементы сооружения, а лишь отдельные наиболее напряженные или поврежденные части. Следовательно, имеется возможность, модифицируя (ремонтируя) лишь отдельные элементы конструкции, повышать ее несущую способность при сравнительно небольших затратах.

Повышение несущей способности конструкций в напряженном состоянии также целесообразно в случаях, когда некоторые из несущих элементов практически недоступны для ремонта и усиления. Применительно к таким случаям задача отыскивания приемлемых способов усиления конструкций является особенно актуальной.

В коммерческих компьютерных программах, используемых в настоящее время для расчетов, не учитываются некоторые особенности, возникающие при моделировании напряженно-деформированного состояния конструкций, усиленных при действии на них нагрузки.

Указанные факторы определяют необходимость применения специальных разработок по методам расчета усиленных конструкций.

Целью работы является разработка метода и компьютерной программы для расчета несущей способности стержневых конструкций, усиливаемых в напряженном состоянии, способом увеличения размеров поперечных сечений элементов.

Задачи исследования:

1. Построение математической модели и расчетной схемы, с учетом возникающих при усилении конструкции находящейся под нагрузкой, изменений геометрических характеристик ее элементов, действующих сил, напряженного и деформированного состояний.

2. Выбор метода и разработка алгоритма расчета усиливаемых стержневых конструкций с учетом пластических деформаций.

3. Разработка метода определения монтажных сил.

6. Создание программных модулей для получения решения вариационным методом, для нахождения зон пластических деформаций в стержнях, численным интегрированием по области сложной формы.

7. Создание компьютерной программы, для расчета напряженно-деформированного состояния усиленных плоских стержневых систем.

8. Исследование вопросов повышения несущей способности усиленных плоских стержневых систем при упругопластических деформациях.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель деформирования стержневых конструкций, усиливаемых в напряженном состоянии способом увеличения размеров поперечных сечений элементов;
- представлен вариационный метод расчета напряженно-деформированного состояния усиливаемых стержневых систем, с учетом пластических деформаций, наложения напряженных состояний, связанных с ремонтными и монтажными работами;
- разработан метод определения монтажных сил и напряжений, возникающих при усилении деформированных стержневых элементов;
- получены данные расчетов несущей способности усиленных плоских стержневых систем, деформируемых при напряжениях, превышающих предел упругости.

Практическая значимость работы.

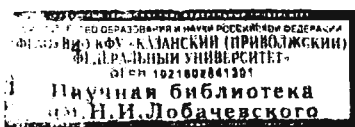
- Разработаны математическая модель и методика для расчета напряженно-деформированного состояния стержневых конструкций усиливаемых при действии на них нагрузок.
- Создана компьютерная программа для расчета стержневых систем усиливаемых в напряженном состоянии.
- Предложены варианты усиления плоских стержневых систем, иллюстрирующие возможности повышения допускаемых эксплуатационных нагрузок.

Достоверность полученных результатов обеспечивается

- использованием при моделировании хорошо апробированных положений и методов механики стержневых систем;
- применением математически обоснованных численных методов расчетов, в сочетании с проверкой правильности их использования при создании компьютерных программ.
- хорошим согласованием расчетных данных с результатами, полученными в частных случаях другими методами.

Личный вклад автора в выполненной работе состоит в следующем:

- участие в разработке модели деформирования стержневых конструкций, усиливаемых в напряженном состоянии;
- разработка алгоритмов выполнения расчетов и программных модулей для расчета стержневой системы, с учетом упругопластических деформаций;
- проведение расчетов с целью установления достоверности получаемых результатов и выявления основных закономерностей исследуемой проблемы;
- анализ результатов расчетов несущей способности стержневых систем при упругопластических деформациях.



Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены на следующих конференциях:

- на 23-ей международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов», Санкт-Петербург (2009 г.);
- на второй международной конференции «Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела», Казань (2009 г.);
- на международной научно-технической и образовательной конференции «Образование и наука - производству», Набережные Челны (2010 г.);
- на международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. Йошкар-Ола (2010 г.);
- на научных сессиях КГТУ, Казань (2008-2010гг.).

Публикации.

Основные положения диссертации опубликованы в 10 печатных работах, в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых журналах ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 104 наименования. Содержит 134 страницы текста, 42 рисунка и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность диссертационной работы, особенности моделирования и расчета стержневых систем, усиливаемых в напряженном состоянии, цель исследования, научная новизна и практическая ценность выполненной работы, кратко описано содержание глав диссертации.

В первой главе анализируются особенности деформирования стержневых конструкций, усиливаемых в напряженном состоянии. Представлен обзор литературы по теме диссертации. Показано, что к настоящему времени опубликован ряд статей и монографий, содержащие результаты исследований вопросов усиления конструкций. Отмечаются работы в области механики деформируемого тела, строительной механики стержней, численных методов на которых основаны современные методы расчета конструкций. Выявлены особенности и свойства исследуемых объектов, которые нужно учитывать в настоящее время при разработке расчетных схем, методов и компьютерных программ расчета стержневых систем, усиливаемых в напряженном состоянии.

Приведен анализ особенностей напряженного состояния стержней в случаях, когда усиление производится за счет увеличения размеров поперечных сечений стержневых элементов конструкции и при этом дополнительных напряжений не возникает.

Также изложены особенности напряженного состояния стержней, когда в процессе усиления конструкции возникают дополнительные монтажные напряжения. Показано, что в таких случаях, для расчета напряженно-деформированного состояния конструкции нужно проводить дополнительные расчеты - определять величины монтажных сил и монтажных напряжений.

Приводится обоснование целесообразности расчетов с учетом возникновения пластических деформаций в усиленной конструкции.

Со ссылкой на известные опубликованные научные работы, показано, что для усиленных элементов конструкций находящихся под нагрузкой, в общем случае традиционные схемы расчета не применимы. Это связано с особенностями напряженно-деформированного состояния таких конструкций. Необходимо учитывать изменение их напряженно-деформированного состояния с учетом накапливаемых на каждом этапе ремонтных работ напряжений, деформаций и перемещений. Оценка их несущей способности невозможна без учета истории изменения их напряженного состояния. Из-за сложного характера распределения напряжений в сечениях элементов, пластические деформации могут возникать в значительном диапазоне нагрузок (как показано в известных литературных источниках, при нагрузках зачастую меньшем нормативного уровня). Расчет таких конструкций целесообразно выполнять с учетом нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями.

Представлен анализ специфичных особенностей задач оценки несущей способности стержневых конструкций, усиленных без вывода из напряженного состояния, состоящих в том, что в конструкции имеются зоны, напряженное состояние которых, является функцией, от нагрузок, действующих и возникающих во время усиления и приложенных после него.

Сформулированы задачи, решение которых составляет основу диссертационной работы. Показано, что для расчета усиливаемых стержневых систем необходимо разрабатывать методы и компьютерные программы, позволяющих учитывать следующее:

1. После усиления, в конструкции имеется две области. В одной из них напряжения вызваны действовавшими при усилении нагрузками и монтажными силами, в другой – напряжений нет или возникают только монтажные напряжения.
2. Возникновение пластических деформаций в усиленном сооружении.
3. Возможность определять монтажные силы и монтажные напряжения.
4. Метод расчета должен быть достаточно универсальным, учитывающим совместное деформирование напряженных элементов конструкции.

Во второй главе приведены основные соотношения математической модели и метода расчета стержневых систем.

Для определения напряженно-деформированного состояния стержневой системы используется теория, основанной на модели С.П. Тимошенко. Полагается, что при упругих деформациях справедлив закон Гука, а при возникновении пластических деформаций, применима теория идеально пластического тела.

Представлены основные соотношения вариационного метода расчета напряженно-деформированного состояния стержневой системы, основанного на принципе Лагранжа.

$$\delta U - \delta W = 0. \quad (1)$$

На каждом прямолинейном участке системы перемещения $\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3$ и углы поворота стержня $\tilde{\varphi}_1, \tilde{\varphi}_2, \tilde{\varphi}_3$ в глобальной системе координат представлены в виде разложения в ряд по функциям $f_m(t)$:

$$\tilde{u}_k(x) = \tilde{u}_k^i(t) = \sum_{m=1}^M C_{km}^i f_m(t), \quad \tilde{\varphi}_k(x) = \tilde{\varphi}_k^i(t) = \sum_{m=1}^M D_{km}^i f_m(t), \quad (2)$$

где $k = 1, 2, 3$; $i = \overline{1, N}$ - номер участка; $f_1(t) = 1 - t$, $f_2(t) = t$, $f_m(t) = (1 - t) t^{m-2}$, $m = \overline{3, M}$; C_{km}^i, D_{km}^i - неизвестные постоянные; $t = x/l_i$ ($0 \leq t \leq 1$); x - координаты точек продольной оси стержня с номером i , отсчитываемые от начала участка; l_i - длина продольной оси участка стержня.

Функции $f_m(t)$ позволяют удовлетворять геометрическим граничным условиям, осуществлять стыковку перемещений и углов поворота стержней на границах прямолинейных участков, использовать аппроксимацию различной степени и получать решение с высокой точностью.

Излагается итерационный метод решения задачи при возникновении пластических деформаций.

Для иллюстрации достоверности расчетов, получаемых по описанному методу и созданным компьютерным программам, приведены решения ряда тестовых задач. Приведены сравнения расчетных данных, с численными результатами, полученными другими методами или другими авторами.

Из представленных данных, следует, что при увеличении числа членов ряда (2), решение сходится. Во всех рассмотренных примерах результаты расчетов вариационным методом практически совпадают с результатами, полученными другими методами или другими авторами.

В третьей главе представлены расчетные соотношения и данные расчетов усиливаемых стержневых конструкций при упругопластических деформациях.

Определены последовательность и содержание этапов проведения расчетов. Выявлены основные особенности, которые нужно учитывать при создании расчетной схемы.

Изложены дополнения, вносимые в вариационный метод расчета стержневой системы, усиливаемой в напряженном состоянии. Учтены такие особенности рассматриваемой задачи, как изменение размеров поперечного сечения стержней и последующее дополнительное нагружение конструкции, наложение напряжений, сопровождающееся возникновением пластических деформаций.

С учетом отмеченных особенностей решаемых задач, в уравнении (1) получается $\delta U = \delta U_{\text{уп}} + \delta U_{\text{пл}}$,

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{уп}} = \int_{l_{\text{уп}}} \left[\iint_{A^2} (E \varepsilon_x \delta \varepsilon_x + G \gamma_{xy} \delta \gamma_{xy} + G \gamma_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA + \right. \\ \left. + \iint_{A^n} (\sigma_x^p \delta \varepsilon_x + \tau_{xy}^p \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz}^p \delta \gamma_{xz}) dA \right] dl, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
\delta U_{\text{пл}} = & \int_{l_{\text{нп}}} \iint_{A_{\text{нп}}} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + G \gamma_{xy} \delta \gamma_{xy} + G \gamma_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA + \int_{A_{\text{нп}}} (\tau_{xy}^p \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz}^p \delta \gamma_{xz}) dA + \\
& + \int_{A_{\text{упр}}} (E \varepsilon_x \delta \varepsilon_x + G \gamma_{xy} \delta \gamma_{xy} + G \gamma_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA + \int_{A_{\text{упр}}} (\sigma^p \delta \varepsilon_x + \tau_{xy}^p \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz}^p \delta \gamma_{xz}) dA \Big] dl, \\
\delta W = & \int_q (\tilde{q}_1^y \delta \tilde{u}_1 + \tilde{q}_2^y \delta \tilde{u}_2 + \tilde{q}_3^y \delta \tilde{u}_3) dl + \sum_i (\tilde{F}_{1i}^y \delta \tilde{u}_1(x_i) + \tilde{F}_{2i}^y \delta \tilde{u}_2(x_i) + \tilde{F}_{3i}^y \delta \tilde{u}_3(x_i)) + \\
& + \sum_k (\tilde{M}_{1k}^y \tilde{\varphi}_{1k}(x_k) + \tilde{M}_{2k}^y \tilde{\varphi}_{2k}(x_k) + \tilde{M}_{3k}^y \tilde{\varphi}_{3k}(x_k)).
\end{aligned}$$

Здесь $\sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz}$ – нормальные и касательные напряжения в поперечном сечении стержня; $\varepsilon_x, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}$ – линейные и угловые деформации; $l_{\text{упр}}$ – длина элементов стержневой системы, в которых возникли упругие деформации; $A_{\text{упр}}$ – площадь зоны упругих деформаций в сечениях стержней; $l_{\text{нп}}$ – длина зоны пластических деформаций; $A_{\text{нп}}$ – площадь зоны пластических деформаций. u_1, u_2, u_3 – перемещения в локальной системе координат; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – углы поворота сечений стержня.

Отличительная особенность выражений (3) состоит в том, что в них входят, действующие в период усиления (ремонта), нормальные и касательные напряжения $\sigma_x^p, \tau_{xy}^p, \tau_{xz}^p$, возникающие в поперечных сечениях стержней с площадью $A^n = A_{\text{упр}}^n + A_{\text{нп}}^n$. Причем области с площадью A^n , являются только частью площадей поперечных сечений $A^y = A_{\text{упр}}^y + A_{\text{нп}}^y$, увеличенных при усилении системы.

Проекции на оси координат интенсивности внешних распределенных нагрузок $\tilde{q}_1^y, \tilde{q}_2^y, \tilde{q}_3^y$, проекции сосредоточенных сил $\tilde{F}_{1i}^y, \tilde{F}_{2i}^y, \tilde{F}_{3i}^y$, внешние сосредоточенные моменты относительно осей координат $\tilde{M}_{1k}^y, \tilde{M}_{2k}^y, \tilde{M}_{3k}^y$ состоят из нагрузок, действовавших во время ремонта $\tilde{q}_1^p, \tilde{q}_2^p, \tilde{q}_3^p, \tilde{F}_{1i}^p, \tilde{F}_{2i}^p, \tilde{F}_{3i}^p, \tilde{M}_{1k}^p, \tilde{M}_{2k}^p, \tilde{M}_{3k}^p$ и дополнительных нагрузок $\Delta \tilde{q}_1, \Delta \tilde{q}_2, \Delta \tilde{q}_3, \Delta \tilde{F}_{1i}, \Delta \tilde{F}_{2i}, \Delta \tilde{F}_{3i}, \Delta \tilde{M}_{1k}, \Delta \tilde{M}_{2k}, \Delta \tilde{M}_{3k}$, связанных с эксплуатацией усиленной конструкции.

При расчете усиленной конструкции, существующие во время ремонта напряжения $\sigma_x^p, \tau_{xy}^p, \tau_{xz}^p$, считаются известными величинами, их предварительно находят из расчетов.

Особенностью задач, решаемых на основе соотношений (1), (3) состоит в том, что на различных этапах расчетов изменяются размеры поперечных сечений стержней, в части конструкции появляются предварительно напряженные области. Возникает необходимость определения зон пластических деформаций, размеры и форма которых заранее неизвестны.

Описан аналитический метод определения зон пластических деформаций с учетом наложения в усиленной стержневой системе напряжений от ремонтных и эксплуатационных нагрузок. В общем случае для определения размеров зон

пластических деформаций получается трансцендентное уравнение, которое решается методом Ньютона.

Для иллюстрации точности и достоверности расчетов, получаемых с использованием этого метода, приведены данные решения тестовых задач.

Излагается разработанный алгоритм численного интегрирования по области сложной формы. На основе этого алгоритма создан универсальный метод определения зон пластических деформаций для стержней с поперечными сечениями различной формы.

Предполагается, что область поперечного сечения стержня сложной формы может состоять из подобластей в виде криволинейных треугольников или четырехугольников. Границами этих подобластей могут быть прямые, параболы или части окружности. Для оценки точности результатов, которые получаются при использовании разработанного алгоритма численного интегрирования, приведены данные вычислений.

При использовании этого алгоритма численного интегрирования очень просто определяются зоны пластических и упругих деформаций усиленной стержневой системы. Как и в других случаях, для решения задачи используется итерационный метод. На первой итерации деформации считаются упругими, на последующих итерациях в точках интегрирования (y_j, z_j) поперечного сечения стержня вычисляется нормальное напряжение σ_x и проверяется условия пластичности. Если в точке $|\sigma_x| < \sigma_T$, то эта точка относится к области упругих деформаций, если в этой точке $|\sigma_x| \geq \sigma_T$, то она относится к зоне возникновения пластичности.

Приведены результаты расчетов несущей способности усиленных стержневых систем при упругопластических деформациях. Установлено, что эффективность усиления значительно повышается при допущении возникновения в материале конструкции пластических деформаций. Учет упругопластических свойств материала приводит к существенному возрастанию несущей способности усиливаемой конструкции по сравнению со случаями, когда деформации являются только упругими.

На рис. 1,б приведены данные расчета рамной конструкции (рис. 1,а). Полагалось, что левая стойка рамы имеет сплошное по длине повреждение и восстанавливается до первоначальных размеров при различных уровнях относительных ремонтных напряжений $\tilde{\nu} = |\sigma_x^p|_{\max} / [\sigma]$. Относительная площадь поврежденного сечения $\nabla = A^n / A^y = 0,725$. Здесь A^n , A^y - площади поперечных сечений стержней после получения повреждения и после усиления.

Показатель степени восстановления первоначальной несущей способности конструкции θ , вычислялся по формуле $\theta = F_y / F_n$, где F_n , F_y - нагрузки, которые может воспринимать конструкция до получения повреждения и после усиления. В этом примере при определении θ , значение нагрузки воспринимаемой неповрежденной рамой F_n вычислено в предположении, что возникают только упругие деформации.

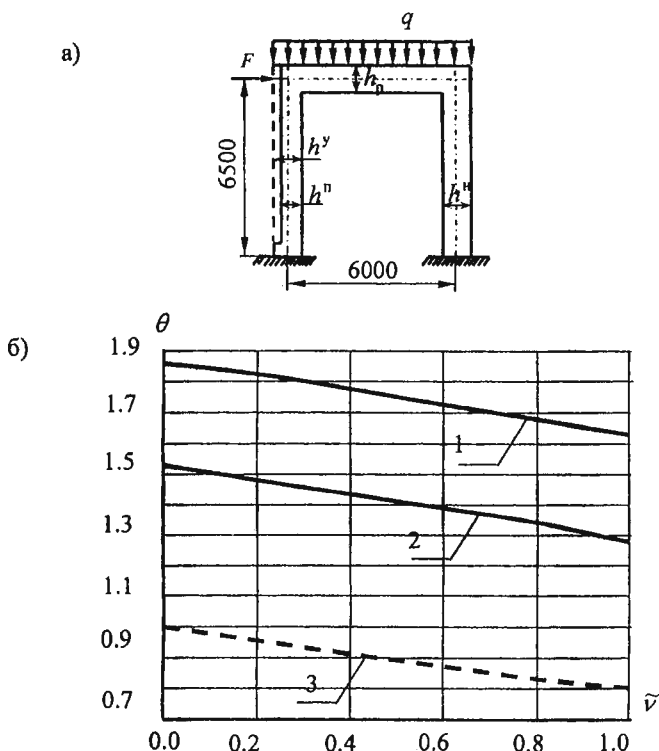


Рис. 1.

а) Расчетная схема рамной конструкции; б) График зависимости несущей способности рамы от уровня ремонтных напряжений при усилении правой стойки

Графики зависимости $\theta = f(\tilde{v})$ представлены на рис. 1, б для разных значений $\xi = A_{\text{пл}}^y / A^y$ - допускаемой относительной площади пластических деформаций, возникающих в сечениях стержня. Линия 2 получена для $\xi = 0.03125$, линия 1 - для $\xi = 0.25$. Результаты расчетов в случае, когда деформации являются только упругими, показаны линией 3. Из анализа этих графиков видно, что допущение возникновения в материале конструкции пластических деформаций приводит к существенному возрастанию несущей способности.

Показано, что несущую способность статически неопределимых стержневых систем можно существенно повысить и методом направленного перераспределения жесткостей, при использовании которого размеры поврежденного элемента остаются без изменений, а усиливается неповрежденный элемент.

В качестве примера повышения несущей способности статически неопределимой стержневой системы методом направленного перераспределения жесткостей, на рис. 2,б приведены результаты расчета рамы, левая стойка которой имеет сплошное по длине повреждение (рис. 2,а). Для усиления конструкции на 25% увеличена высота поперечного сечения h^y неповрежденной правой стойки, а размеры поврежденной левой стойки остались прежними. Полагалось $\nabla = 0.875$, $\xi = A_{пл}^y / A^y = 0,0625$. Данные расчетов приведены на рис. 2,б в виде графика зависимости $\theta = f(\tilde{\nabla})$ (линия 1).

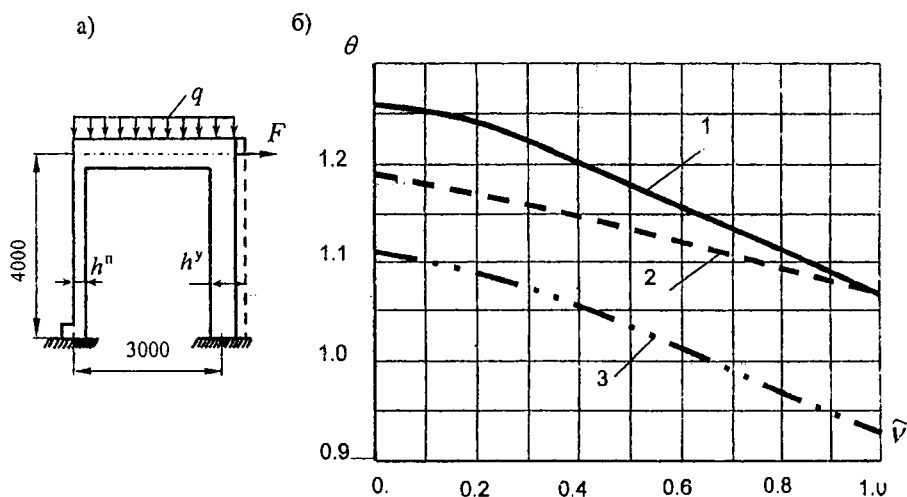


Рис. 2.

а) Расчетная схема рамной конструкции; б) Графики зависимости несущей способности рамы от уровня ремонтных напряжений, полученные методом направленного перераспределения жесткостей

Для сравнения на этом же рисунке приведены графики $\theta = f(\tilde{\nabla})$, полученные без учета действия продольных и поперечных сил (линия 2) и для случая возникновения только упругих деформаций (линия 3).

В четвертой главе представлены результаты исследований вопросов усиления стержневых систем с учетом монтажных напряжений. Результаты получены для случаев усиления деформированного (искривленного в результате действующих во время ремонта нагрузок) стержневого элемента. Рассмотрен вариант усиления, при использовании которого, к искривленному стержню, с помощью специальных стяжных устройств, прижимают прямолинейный стержень. При этом в системе возникают дополнительные монтажные напряжения.

Представлен метод, на основе которого можно определять величины монтажных сил. Полагается, что усиливаемый стержень искривлен, поэтому между ним и усиливающим элементом имеется зазор $f(x)$. Для устранения этого зазора к стержням прикладываются N_F пар сосредоточенных сил F_j^M ($j=1,2,\dots,N_F$), действующих перпендикулярно к линии AB , в точках с координатами x_j (рис. 3).

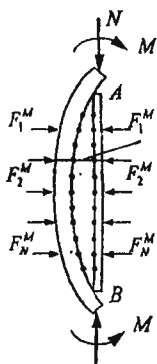


Рис. 3.
Расчетная схема при
учете монтажных
сил

динатами x_j (рис. 3).

На сближаемых поверхностях стержней выделяется N_T пар точек ($N_T \geq N_F$). Часть этих точек находится на линиях действия сил F_j^M , другая часть – между линиями действия сил F_j^M (рис. 3). При $N_T = N_F$ все точки располагаются на линиях действия сил.

В случае действия всей системы сил F_j^M , изменения расстояния между стержнями в выбранных точках

$$w_i = \sum_{j=1}^{N_F} \Delta w_{ij}^1 F_j^M, \quad i = \overline{1, N_T},$$

где Δw_{ij}^1 – изменение расстояния между точками в паре с номером i при действии единичной силы $F_j^M = 1$ ($j = 1, 2, \dots, N_F$).

Значения F_j^M находятся из условия сближения стержней:

$$w_i = f_i, \quad i = \overline{1, N_T}. \quad (4)$$

Здесь f_i – расстояния между точками в паре с номером i ($i = 1, 2, \dots, N_T$).

Если число выбранных точек N_T и число сил F_j^M одинаково ($N_T = N_F$), то условие (4) выполняется точно. В этом случае, для нахождения F_j^M , получатся система алгебраических уравнений

В случае, когда число точек сближения больше числа сил ($N_T > N_F$), для определения величин F_j^M используется метод наименьших квадратов. Минимизируется функционал суммы квадратов невязок перемещений:

$$\Phi(w) = \sum_{i=1}^{N_T} (w_i - f_i)^2.$$

Очевидно, что при действии сил F_j^M указанные стержни сближаются и в деформируемой конструкции возникнут дополнительные (монтажные) напряжения, связанные с монтажом усиливаемых элементов.

Проведен анализ особенностей описанного метода. Выявлены факторы, на которые следует обращать внимание при проведении расчетов и при анализе полученных данных. Описаны результаты решения тестовых примеров определения монтажных сил. Проведен их анализ и сделаны выводы.

Изложен метод расчета усиленной стержневой конструкции с учетом монтажных напряжений. Последовательно определяются напряжения и деформации в конструкции от воздействия ремонтных, монтажных и эксплуатационных нагрузок. Величины монтажных сил находятся с использованием специально разработанной модели усиления деформируемой стержневой системы

Для расчетов используются следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
 \delta U = & \int_{l_{\text{упр}}} \iint_{A^P} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA dl + \int_{l_{\text{на}}} \iint_{A_{\text{на}}^P} (G \gamma_{xy} \delta \gamma_{xy} + G \gamma_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA + \\
 & + \iint_{A_{\text{упр}}^P} (E \varepsilon_x \delta \varepsilon_x + G \gamma_{xy} \delta \gamma_{xy} + G \gamma_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA \int dl + \int_{l_{\text{упр}}^{\text{упр}}} \iint_{A_{\text{упр}}^{\text{упр}}} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA dl + \\
 & \int_{l_{\text{упр}}^{\text{упр}}} \iint_{A_{\text{упр}}^{\text{упр}}} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA + \iint_{A_{\text{упр}}^{\text{упр}}} (\tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA \int dl + \\
 & + \int_{l_B} \iint_{A^B} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA dl \\
 & + \int_{l_{\text{упр}}} \iint_{A^P} ((\sigma_x^P + \sigma_x^M) \delta \varepsilon_x + (\tau_{xy}^P + \tau_{xy}^M) \delta \gamma_{xy} + (\tau_{xz}^P + \tau_{xz}^M) \delta \gamma_{xz}) dA dl + \\
 & + \int_{l_{\text{на}}} \iint_{A_{\text{на}}^P} ((\sigma_x^P + \sigma_x^M) \delta \varepsilon_x + (\tau_{xy}^P + \tau_{xy}^M) \delta \gamma_{xy} + (\tau_{xz}^P + \tau_{xz}^M) \delta \gamma_{xz}) dA + \\
 & + \iint_{A_{\text{на}}^P} (\sigma_T \delta \varepsilon_x + (\tau_{xy}^P + \tau_{xy}^M) \delta \gamma_{xy} + (\tau_{xz}^P + \tau_{xz}^M) \delta \gamma_{xz}) dA \int dl + \\
 & + \int_{l_{\text{упр}}^{\text{упр}}} \iint_{A_{\text{упр}}^{\text{упр}}} (\sigma_x^M \delta \varepsilon_x + \tau_{xy}^M \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz}^M \delta \gamma_{xz}) dA dl + \\
 & + \int_{l_{\text{упр}}^{\text{упр}}} \iint_{A_{\text{упр}}^{\text{упр}}} (\sigma_x^M \delta \varepsilon_x + \tau_{xy}^M \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz}^M \delta \gamma_{xz}) dA + \iint_{A_{\text{на}}^{\text{упр}}} (\sigma_T \delta \varepsilon_x + \tau_{xy}^M \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz}^M \delta \gamma_{xz}) dA dl . \\
 \delta W = & \int_{l_q} (\tilde{q}_1^y \delta \tilde{u}_1 + \tilde{q}_2^y \delta \tilde{u}_2 + \tilde{q}_3^y \delta \tilde{u}_3) dl + \sum_i (\tilde{F}_{1i}^y \delta \tilde{u}_1(x_i) + \tilde{F}_{2i}^y \delta \tilde{u}_2(x_i) + \tilde{F}_{3i}^y \delta \tilde{u}_3(x_i)) + \\
 & + \sum_k (\tilde{M}_{1k}^y \tilde{\varphi}_{1k}(x_k) + \tilde{M}_{2k}^y \tilde{\varphi}_{2k}(x_k) + \tilde{M}_{3k}^y \tilde{\varphi}_{3k}(x_k)) .
 \end{aligned} \tag{5}$$

Здесь A^P - площадь поперечных сечений стержней усиливаемой системы; $l_{\text{узм}}$, $A_{\text{узм}}$ - длина и площадь поперечных сечений усиливающих стержней, при соединении которых возникают монтажные напряжения; l_B , A^B - длина и площадь поперечных сечений стержневых элементов, моделирующих соединение болтами прижатых друг к другу стержней; σ_x^M , τ_{xy}^M , τ_{xz}^M - монтажные напряжения; индексами «упр» и «пл» обозначены величины, относящиеся, соответственно к областям упругих и пластических деформаций.

На рис. 4 представлены результаты расчетов рамы 1, которая под действием ремонтной нагрузки F^P (рис. 4,а) деформируется и усиливается прямолинейным стержнем 2. Искривленная стойка рамы и прямолинейный стержень сближаются монтажными силами F_1^M , F_2^M , F_3^M (рис. 4,б) и в трех местах соединяются болтами 3 (рис. 4,а). После этого к системе прикладывается эксплуатаци-

онная нагрузка F^y (рис. 4, в). Приведены эпюры изгибающих моментов, возникающих в раме при действии ремонтной нагрузки F^p (рис. 4, а), при действии ремонтной нагрузки F^p и монтажных сил F_1^m, F_2^m, F_3^m (рис. 4, б), а также при действии эксплуатационной нагрузки F^y (рис. 4, в).

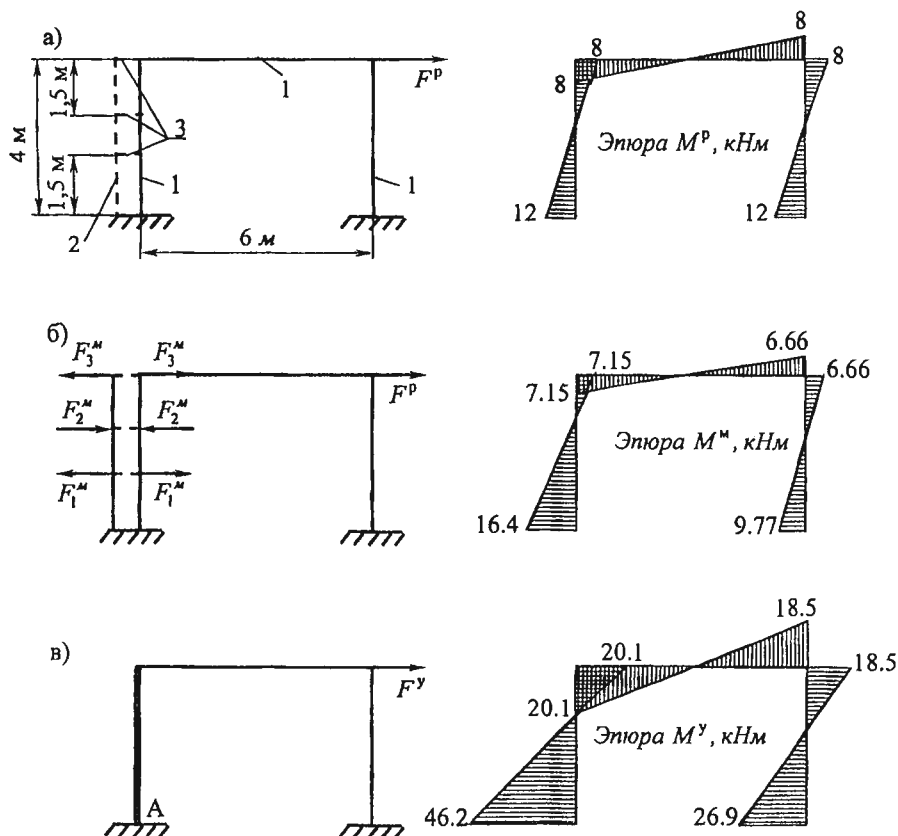


Рис.4

Расчетная схема рамы и эпюры изгибающих моментов, при учете монтажных сил.

- а) При действии ремонтной нагрузки; б) При действии монтажных сил;
в) При действии эксплуатационной нагрузки

Для сравнения на рис 5 представлена эпюра изгибающих моментов в случае, когда монтажные силы не учитываются $F_1^m = 0, F_2^m = 0, F_3^m = 0$, т.е. когда считается, что деформированная стойка и усиливающий стержень сближаются без усилий.

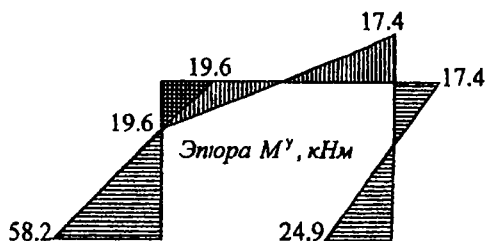


Рис. 5 Эпюра изгибающего момента, без учета монтажных сил.

Основные результаты и выводы по диссертационной работе:

1. При расчете элементов конструкций, усиливаемых в напряженном состоянии, нужно использовать модели и расчетные схемы, в которых учитываются изменения на каждом этапе ремонтных работ геометрических характеристик, действующих сил, напряжений и перемещений.
2. Выявлены основные особенности, которые нужно учитывать при создании математической модели и метода расчета. Показано, что для определения несущей способности конструкций, усиливаемых в напряженном состоянии, необходимо использовать специально разработанные методики, алгоритмы и компьютерные программы.
3. Представлен вариационный метод расчета стержневой системы, учитывающий изменение размеров поперечного сечения стержней при усилении конструкции, наличие монтажных напряжений, наложение напряжений, возникновение пластических деформаций.
4. Разработан метод определения монтажных сил.
5. Разработаны алгоритмы расчетов для получения решения вариационным методом, нахождения зон пластических деформаций, численного интегрирования по области сложной формы.
6. Создана компьютерная программа, для расчета напряженно-деформированного состояния усиленных плоских стержневых систем.
7. Получены результаты расчетов несущей способности усиленных плоских стержневых систем при упругопластических деформациях. Установлено, что эффективность усиления значительно повышается при допущении возникновения в материале конструкции пластических деформаций. Показана эффективность метода направленного перераспределения жесткостей.

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях.

Статьи в ведущих рецензируемых журналах ВАК:

1. Серазутдинов, М. Н. Расчет усиливаемых нагруженных конструкций вариационным методом / М.Н. Серазутдинов, М.Н. Убайдуллоев, Х.А. Абрагим // Изв. вузов. Строительство. - 2010. - № 7. - С.118-123.

- 102
2. Серазутдинов, М.Н. Несущая способность стержневых элементов конструкций, усиливаемых в напряженном состоянии / М.Н. Серазутдинов, Х.А. Абрагим // Вестник Казан.технол.ун-та. – 2010. - № 9. - С. 512-518.
 3. Серазутдинов, М.Н. Влияние монтажных сил на несущую способность усиливаемых стержневых систем. / М.Н. Серазутдинов, М.Н. Убайдуллоев, Х.А. Абрагим // Вестник Казан.технол.ун-та. – 2011. - № 10. - С. 116-124.
 4. Серазутдинов, М.Н. Повышение несущей способности усиливаемых нагруженных конструкций. / М.Н. Серазутдинов, М.Н. Убайдуллоев, Х.А. Абрагим // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2011. - № 3. - С. 23-30.
 5. Серазутдинов, М.Н. Определение сил, необходимых для сближения стержней при моделировании усиления конструкций. / М.Н. Серазутдинов, Х.А. Абрагим // Известия КГАСУ. – 2011. - № 3(17). - С. 188-193.

Публикации в сборниках трудов конференций:

1. Серазутдинов, М.Н. Расчет усиливаемых стержневых систем вариационным методом / М.Н. Убайдуллоев, Х.А. Абрагим // ВЕМ&FEM-2009. Материалы 23-ей международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов». 28 сентября – 01 октября 2009. Санкт-Петербург, Труды. Том 2. Изд. ООО «НИЦ МОРИНТЕХ», 2009. - С. 410-415.
2. Серазутдинов, М.Н. Вариационный метод определения несущей способности усиливаемых конструкций / М.Н. Серазутдинов, М.Н. Убайдуллоев, Абрагим Х.А. // Материалы второй международной конференции «Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела». – Казань, Россия, 8-11 декабря 2009 г. Изд. КГУ, 2009. - С. 337-339.
3. Серазутдинов, М.Н. Вариационный метод расчета стержневых систем при пластических деформациях / М.Н. Серазутдинов, М.Н. Убайдуллоев, Абрагим Х.А. // Сборник трудов Международной научно-технической и образовательной конференции «Образование и наука - производству». - Набережные Челны, 28-31 марта 2010 г. Ч.1, книга 1. - КГИЭА, 2010. - С.43-46.
4. Абрагим, Х.А.. Методика численного расчета предварительно напряженной стержневой системы. / Х.А. Абрагим // Сборник материалов международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. - Йошкар-Ола, 16-17 апреля 2010 г. Ч.3. - С. 128-129.
5. ابراهيم حسين عبد العزيز ابراهيم، ميرازودينوف مرات نورفيغ، حساب الطاقة الاستيعابية للتحميل في الهياكل المعادة التقوية تحت ظروف أجهادية، المجلة العراقية للهندسة الميكانيكية وهندسة المواد، المؤتمر العلمي السنوي الثالث، رقم البحث : م ي 1، جامعة بابل، محافظة بابل -العراق.
(Абрагим, Х.А. Расчет несущей способности стержневых конструкций, усиливаемых в напряженном состоянии/ Х.А. Абрагим, М.Н. Серазутдинов // Иракский журнал механики и материаловедения. Третья ежегодная научная конференция инженерного факультета.– Ирак. Бабилон, Бабилонский университет, 2011 г. - Код: ME 1.)