

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»  
(ПГУАС)

К.К. Нежданов, А.Н. Жуков

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ  
РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСОЛЕЙ КОЛОНН**

Пенза 2014

УДК 624.072.21-046.26-047.37:725.4

ББК 38.33

Н43

*Монография подготовлена в рамках проекта  
«ПГУАС – региональный центр повышения качества подготовки  
высококвалифицированных кадров строительной отрасли»  
(конкурс Министерства образования и науки Российской Федерации –  
«Кадры для регионов»)*

Рецензенты: доктор технических наук, профессор  
А.А. Землянский;  
кандидат технических наук, профес-  
сор, заслуженный строитель РФ  
В.С. Абрашитов

**Нежданов К.К.**

Н43 Восстановление работоспособности железобетонных консолей  
колонн: моногр. / К.К. Нежданов, А.Н. Жуков. – Пенза: ПГУАС,  
2014. – 156 с.

**ISBN 978-5-9282-1046-5**

Представлены результаты исследований существующих способов усиления железобетонных консолей колонн, новые способы по восстановлению работоспособности и усилению консолей колонн с применением балансирных устройств и сталетрубобетонных обойм. Приведены результаты физического и численного экспериментов разработанных авторами способов усиления железобетонных консолей колонн, а также технико-экономического анализа существующих и разработанных способов.

Монография подготовлена на кафедре «Управление качеством и технология строительного производства» и предназначена для научных и инженерно-технических работников строительных организаций, занимающихся вопросами восстановления работоспособности железобетонных консолей колонн, а также для студентов строительных вузов.

**ISBN 978-5-9282-1046-5**

© Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства, 2014

© Нежданов К.К., Жуков А.Н., 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ УСИЛЕНИЯ КОНСОЛЕЙ КОЛОНН .....	7
1.1. Усиление консолей колонн гнутыми элементами и затяжками .....	7
1.2. Бетонирование подконсольной части .....	9
1.3. Подведение под подкрановые балки новых стальных колонн..	10
1.4. Усиление консолей колонн углепластиком.....	12
1.5. Способ усиления консолей колонн I.Tuns .....	14
2. РАЗРАБОТКА НОВЫХ СПОСОБОВ УСИЛЕНИЯ КОНСОЛЕЙ КОЛОНН.....	16
2.1. Восстановление работоспособности с помощью замкнутой рамы.....	17
2.2. Восстановление работоспособности с помощью рамки управления .....	21
2.3. Восстановление работоспособности консолей колонн с использованием опорных швеллеров .....	26
2.4. Восстановление работоспособности с использованием объёмно предварительно напряжённой сталетрубобетонной обоймы ...	30
2.5. Восстановление работоспособности с использованием двухуровневой обоймы .....	32
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОДЕЛЕЙ КОНСОЛЕЙ КОЛОНН.....	35
3.1. Цель и задачи экспериментального исследования .....	35
3.2. Расчёт прочности моделей аварийных консолей колонн по методике Т.И. Барановой .....	36
3.3. Экспериментальные модели консолей колонны.....	37
3.4. Подготовка приборов перед измерением деформаций .....	39
3.5. Исследование изменения напряжений в арматуре моделей консолей с помощью методов тензометрии.....	42
3.6. Экспериментальное исследование моделей консолей колонн.....	46
3.7. Испытание при восстановлении работоспособности моделей консолей колонн балансирными устройствами.....	51
3.8. Испытание при восстановлении работоспособности моделей консолей колонн сталетрубобетонными обоймами .....	63
4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОНСОЛЕЙ КОЛОНН .....	72
4.1. Общие сведения и исходные данные для моделирования .....	72
4.2. Моделирование конструкций.....	85

4.3. Сравнение результатов физического и численного экспериментов.....	94
4.4. Исследование распределения напряжений в сечении консоли колонны.....	95
4.5. Исследование влияния способов усиления консоли колонны на распределение моментов в поперечной раме .....	100
5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ СПОСОБОВ .....	106
5.1. Расчёт материалоемкости способов усиления консолей колонн .....	106
5.2. Расчёт трудоёмкости способов усиления консолей колонн .....	120
5.3. Оценка стоимости выполнения способов усиления консолей колонн .....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	126
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ	
Результаты физического эксперимента.	
Таблицы и графики.....	131



## ВВЕДЕНИЕ

Надёжная и безотказная работа на протяжении всего нормативного срока эксплуатации каркасов промышленных зданий, в частности теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), является приоритетным направлением строительной отрасли России.

Здания ТЭЦ имеют обычно многопролётные смешанные каркасы, состоящие из монолитных железобетонных ступенчатых колонн с шагом 6 м; стальных подкрановых балок, опирающихся на железобетонные консоли колонн; стальных стропильных ферм пролётом 21, 24, 30, 36, 42 м, опирающихся на колонны большей частью шарнирно. Обычно между котельным и турбинным отделениями расположены многоэтажные этажерки, обеспечивающие жёсткость и устойчивость сооружения. Котлы и турбины монтируются на собственных фундаментах. Имеются рабочие площадки на отметке 7...8 м для обслуживания котлов и турбин мостовыми кранами грузоподъёмностью 30...50 т.

В связи с увеличением расчётных нагрузок (снеговой на 28,6 % и коэффициента ответственности для зданий первого класса на 20 %), физическим износом, поражением коррозией, необходимостью восприятия значительных воздействий в связи с реконструкцией зданий (замена кранового оборудования вследствие необходимости транспортировки механизмов повышенной массы, увеличение высоты смежных зданий, которое ведёт к нарастанию расчётной снеговой нагрузки за счёт образования снеговых «мешков»), отсутствием связей, непроектными закрепления вспомогательных и основных механизмов и трубопроводов, несвоевременным текущим ремонтом возникает необходимость восстановления работоспособности элементов каркаса промышленных зданий.

Эти данные подтверждаются натурными обследованиями ряда ТЭЦ и других промышленных предприятий города Пензы и Пензенской области. При обследованиях зафиксированы непроектные прикрепления технологических трубопроводов к оголённой арматуре несущих конструкций. Опасностью таких закреплений является усталостное разрушение арматурных стержней при вибрации трубопровода. Колонны зданий, как и конструкции покрытий, подвергаются воздействию неблагоприятных факторов коррозии бетона и арматуры.

Наиболее интенсивно коррозионным процессам подвержены узлы жёсткого соединения колонны с фундаментом на нулевой отметке, особенно при замачивании низа колонны, и консоли колонн для опирания смежных подкрановых балок, что приводит к обрушению защитного слоя бетона от колонны. Такой вид разрушения был отмечен при обследовании железобетонной колонны на теплоэлектроцентрали в г. Пензе – площадь сечения колонны уменьшилась до 6900 см<sup>2</sup> (70,8 %) по сравнению с проектным значением 9750 см<sup>2</sup> (100 %) вследствие осыпания защитного

слоя бетона толщиной 75 мм в результате коррозионных процессов. Особенно нагруженными являются железобетонные консоли колонн для опирания подкрановых балок в силу действия совокупности вышеперечисленных факторов, а также динамических воздействий от мостовых кранов, что в свою очередь приводит к возрастанию скорости течения коррозионных процессов в арматуре.

Колонны промышленных зданий как правило имеют три основных узла: консоль, где на колонну передаётся опорная реакция смежных подкрановых балок; узел жесткого соединени колонны с фундаментом, который обеспечивает неизменяемость всей системы рамы каркаса, и верхний узел опирания на колонну фермы покрытия, который выполняют как жёстким, так и шарнирным. Каждый из этих основных узлов имеет свой ресурс эксплуатации, который зависит от коррозионных процессов, возникающих в конструкциях каркаса, и усиливающихся с течением времени.

Сравнение узла соединения фермы и колонны с узлом опирания подкрановых балок показывает, что опорная реакция от двух смежных подкрановых балок превышает опорную реакцию от ферм покрытия в 3–5 раза. Например, для ТЭЦ г. Пензы опорная реакция от двух подкрановых балок  $D_{\max}=810,31$  кН (82,6 т), а опорная реакция фермы 278,6 кН (28,4 т). С увеличением грузоподъёмности кранов динамические воздействия на консоль пропорционально возрастают. Следует отметить, что ускорению коррозионных процессов способствуют не только нагруженность узлов конструкции, но и воздействие среднеагрессивной среды. Отмеченные выше факторы привели к значительно более сильным коррозионным повреждениям именно консолей колонн.

В настоящее время наметилась тенденция не к повышению надёжности, а к её снижению, что усугубляется такими факторами, как время и сопутствующие ему неизбежные процессы старения конструкций, коррозии бетона и арматуры. В настоящее время функционируют здания ТЭЦ, построенные в 40...60-х годах XX века. Большинство конструкций таких объектов требует немедленного усиления.

# 1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ УСИЛЕНИЯ КОНСОЛЕЙ КОЛОНН

## 1.1. Усиление консолей колонн гнутыми элементами и затяжками

В рекомендациях по проектированию усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений реконструируемых предприятий [1] усиление коротких консолей колонн рекомендуется производить установкой дополнительных предварительно напряженных, наклонных или горизонтальных тяжей или хомутов (рис. 1.1). Тяжи крепятся к консоли посредством металлических крепежных элементов и напрягаются завинчиванием гаек. Хомуты крепятся к металлической обойме, устанавливаемой на участке колонны и консоли, и напрягаются взаимным стягиванием. Более эффективным способом считается усиление предварительно напряженными хомутами, так как предварительное напряжение увеличивает нагрузку, воспринимаемую элементами усиления. Усиление коротких консолей, имеющих на колоннах и главных балках в местах деформационных швов, рекомендуется производить специальными приспособлениями из металлических элементов, которые представляют собой дополнительные консоли, подвешиваемые к колоннам или главным балкам (см. рис. 1.1). Соединения отдельных элементов приспособлений осуществляются как на болтах, так и на сварке [1, п.2.67].

В рекомендациях [1] по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений приведено усиление консолей наклонными тяжами (рис.1.1А). На рисунке показаны две симметричные консоли, предназначенные для опирания смежных подкрановых балок. Основным недостатком этого способа является невозможность усиления аварийной консоли под подкрановой балкой. Необходима разгрузка консоли от воздействий  $D_{\max}$  смежных подкрановых балок. Для того чтобы разгрузить консоль, необходимо остановить основное производство.

На рис.1.1Б показано усиление консоли посредством двух коробчатых в сечении элементов, стянутых друг с другом тяжами. В «рекомендациях» [1] не указано, какие повреждения возникли в консолях колонны и по какой причине. Исходя из рис.1.1Б, делаем вывод, что при проектировании консолей была допущена техническая ошибка: верхние стержни консоли были назначены заниженного диаметра, и растягивающие напряжения в арматуре превысили её расчётное сопротивление. Также в рекомендациях не пояснено, с какой силой необходимо затягивать тяжи и как воспринимать поперечную силу. Усиление 1.1Б облегчает восприятие изгибающего консоль момента  $M=D_{\max} \cdot e$ . Восприятия поперечной силы  $D_{\max}$  данной затяжкой невозможно. Сила от преднапряжения затяжки передаётся на торец консоли, который к этому времени повреждён коррозией бетона, что осложняет такое усиление консоли.

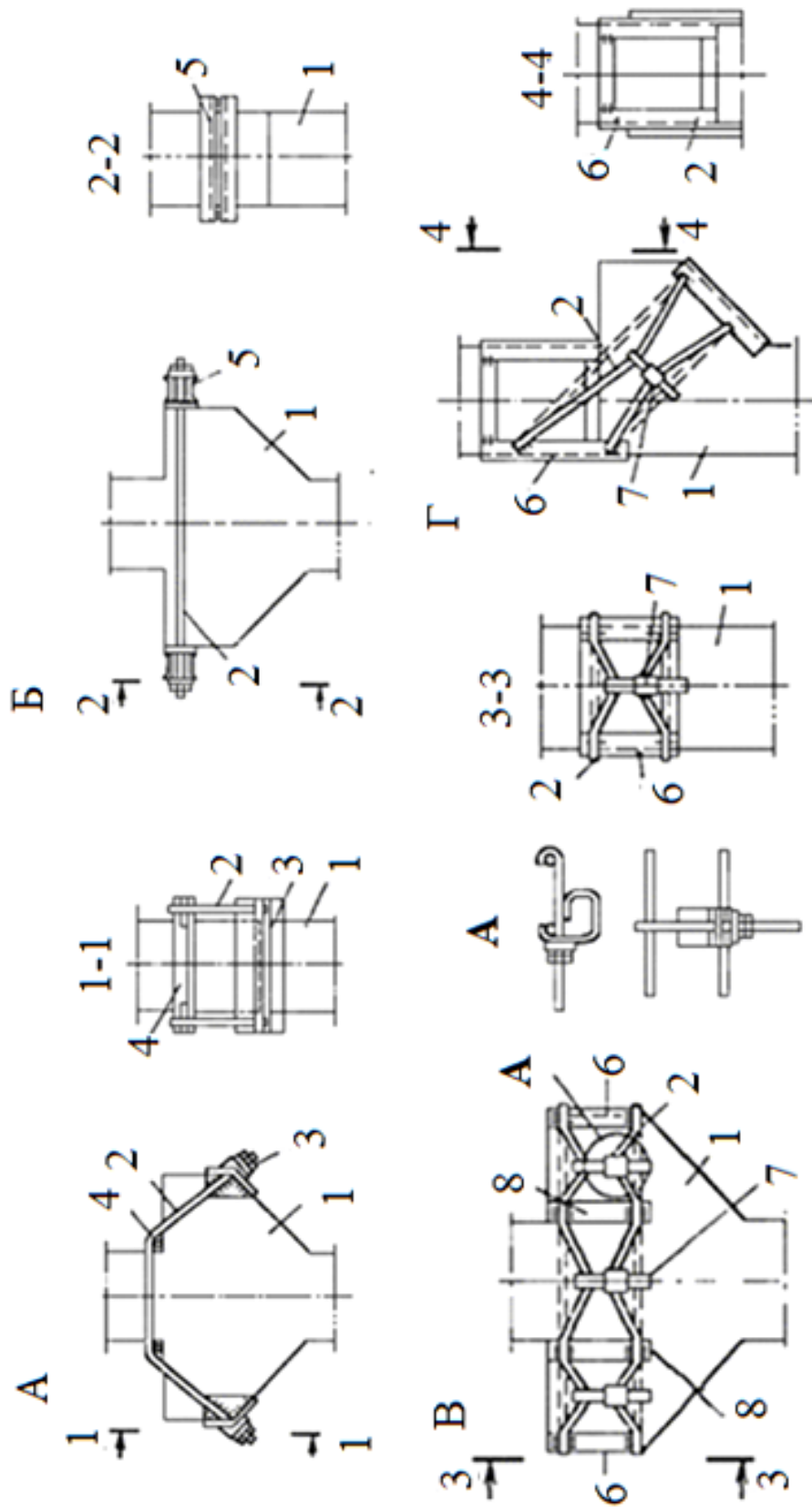


Рис. 1.1.1. Усиление консолей колонн гнутыми элементами и затяжками:  
 А – наклонными тяжами; В – затяжкой; Г – замкнутым хомутом со стягиванием его ветвей крючками;  
 Г – наклонными тяжами со стягиванием ветвей;  
 1 – колонна; 2 – затяжки; 3, 4, 5 – траверсы и упоры;  
 6, 8 – подкладки; 7 – стяжные крючки

В конструкции усиления 1.1В – замкнутым хомутом со стягиванием его ветвей крюками – натяжение достигается стягиванием параллельных стержней арматуры крюками. В связи с тем, что крюки являются податливым элементом, сила натяжения ослабевает со временем. На рис.1.1Г наиболее подверженная коррозии опорная часть консоли не усиливается.

## 1.2. Бетонирование подконсольной части

На рис.1.2 представлена схема усиления консолей железобетонных колонн дополнительным бетонированием подконсольной части.

Поверхность подконсольной части колонны необходимо предварительно подготовить к производству работ. Для лучшего сцепления бетона ее обрабатывают насечкой с помощью пневматического инструмента. Пробиваются по два углубления размером 80-100 мм через каждые 1300 мм в углах колонны под консолью. К оголенной рабочей арматуре колонны приваривают арматуру усиления. Бетонируемая толщина, количество и диаметр арматуры устанавливается конструктивной частью проекта. Бетонирование производится заподлицо с выступающей частью консоли колонны и ведется до верха основания колонны.

Предусматривается следующий порядок производства работ: разборка конструкций пола со стороны консоли до верха стакана фундамента колонны; установка трубчатых лесов вокруг усиливаемой колонны; насечка подконсольной части колонны; установка и приварка арматуры усиления к арматуре устанавливаемой колонны; установка опалубки; бетонирование (снизу вверх); разборка опалубки; демонтаж лесов [2].

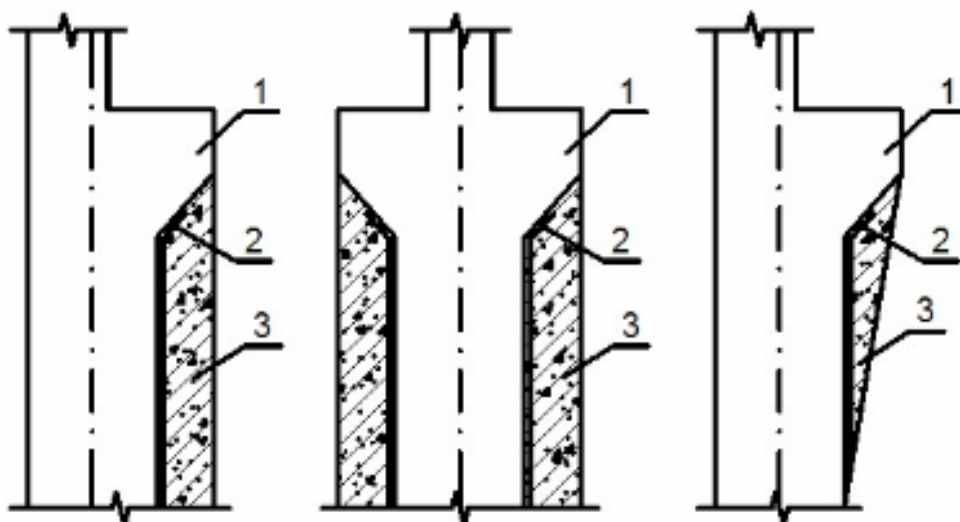


Рис.1.2. Усиление консоли колонн бетонированием подконсольной части:  
1 – аварийная консоль; 2 – арматура; 3 – новый бетон

Данный способ усиления имеет существенный недостаток – высокая материалоемкость и стоимость выполнения работ по усилению.

### 1.3. Подведение под подкрановые балки новых стальных колонн

На рис.1.3 [3] представлен способ усиления аварийной консоли колонны путём передачи опорных реакций смежных подкрановых балок на фундамент при помощи подведения двух стальных колонн непосредственно под смежные подкрановые балки с двух сторон от аварийной колонны, предполагающий увеличение габаритов колонны, что не всегда возможно. На рис. 1.3А, Б представлены схемы производства работ по усилению консолей железобетонных колонн установкой по обе стороны консоли металлических стоек, состоящих из двух профилей коробчатого сечения или швеллеров и арматуры соединения.

Преимущество данного технического решения в том, что усиление консоли колонны можно производить в условиях действующего предприятия, не останавливая основных производственных процессов.

Два профиля между собой жестко соединяются сваркой с помощью пластин и крепятся к арматуре усиливаемой колонны. Размеры металлических профилей устанавливаются конструктивной частью проекта. К закладной металлической части консоли привариваются по обе стороны две прямоугольные металлические пластины толщиной 5-8 мм. К ним на втором этапе работ привариваются профили. В зазор между профилями и пластинами вставляется круглый стержень или уголок и производится обваривание всей конструкции.

Нижняя часть профилей должна опираться на верхнюю часть стакана фундамента колонны. Для этого пневмоинструментом или вручную необходимо разрушить покрытие пола и очистить от мусора место опирания профилей, а затем установить в свежееуложенный бетон в местах опирания две прямоугольные пластины с анкерами, к которым впоследствии будут приварены профили.

Предусматривается следующий *порядок производства работ*.

*1 этап (подготовительный)*

Разбирают конструкции пола на глубину 100-150 мм (до верхней части стакана фундамента колонны) в местах опирания профилей и очищают эти участки от мусора. В местах опирания стоек в свежееуложенный бетон устанавливают прямоугольные металлические пластины толщиной 8-10 мм с анкерами, длина и ширина которых зависит от размеров профилей. Размеры пластин принимают на 20 мм больше, чем размеры профилей. Устанавливают трубчатые леса вокруг усиливаемой колонны, затем в двух-трех местах обнажают рабочую арматуру колонны и приваривают прямоугольные пластины к закладной пластине консоли. Измеряют расстояния от установленных у основания колонн пластин до приваренных к закладной части консоли. Заготавливают два профиля на 30-40 мм меньше измеренной длины, устанавливают профили и приваривают их к

пластинам основания в вертикальном положении. Соединяют сваркой профили между собой уголком (арматурой) и приваривают к обнаженной от бетона арматуре усиливаемой колонны. Бетонируют основания профилей и заделывают раствором места их крепления к арматуре колонны.

*2 этап (основной)*

Соединяют основные конструктивные элементы (консоль и стойки) через 2-3 дня по мере набора бетоном 70-80 % прочности. Сваривают профили и пластины. В зазор монтируют арматуру или уголок в зависимости от размеров зазора и наносят антикоррозионное покрытие [3].

В узле предусмотрена только одна связь с колонной, что при существенной высоте, на которой расположена консоль (до 20 и более метров), недостаточно, т.к. предельная гибкость  $\lambda=120$ , а при значительной высоте новых колонн значение гибкости будет выше, что по нормам не допускается. Закрепление новой колонны к старой осуществляется с помощью сварки, что является техническим решением, не обеспечивающим достаточную надёжность узла крепления. Достоинство данного способа заключается в простоте включения в работу стальных колонн (например, поддомкрачиванием).

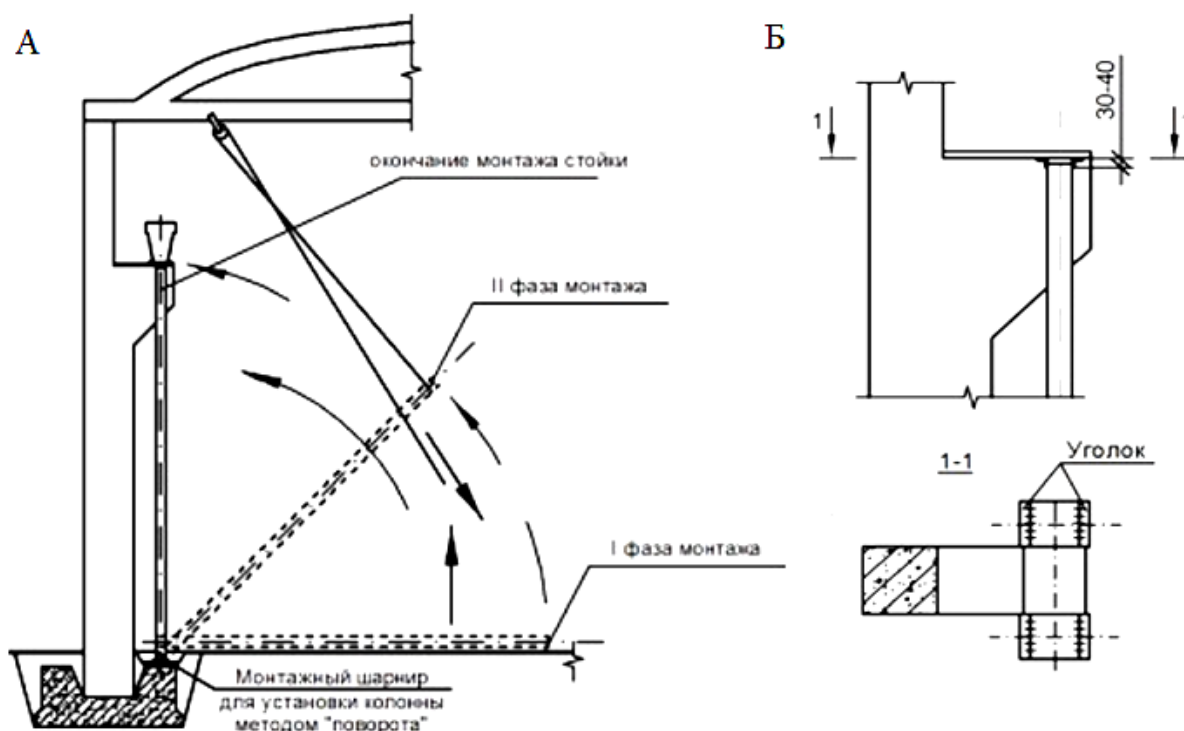


Рис. 1.3. Подведение под подкрановые балки новых стальных колонн:  
 А – подъем подпорки; Б – установка уголковых профилей для закрепления стойки-колонны



На рис.1.4 показан срез железобетонной аварийной консоли от вертикального воздействия балки перекрытия. Дополнительные стальные колонны подведены под опору подкрановой балки снизу и полностью передают опорные реакции  $D_{max}$  от смежных подкрановых балок непосредственно на фундамент. Такое техническое решение эффективно, так как полностью разгружают колонну от  $D_{max}$ .



Рис. 1.4. Разгрузка аварийной консоли от воздействия балки

#### 1.4. Усиление консолей колонн углепластиком

На рис. 1.5 [4, 5, 6] представлено усиление разных видов консолей для опирания подкрановых балок углепластиком Sica Carbodur (Carbowrap) и MEGAPLATE. Sika Wrap включает в себя широкую линейку различных высококачественных, специально спроектированных тканых и нетканых материалов, предназначенных для различных типов структурного и сейсмического усиления. Элементы внешнего армирования закрепляются на железобетонной конструкции с помощью высокопрочного эпоксидного компаунда, поставляемого вместе с углеволокном.

Наиболее распространенным решением при усилении железобетонных конструкций с применением углеволокна является его расположение в зоне наибольшего изгиба (середина пролета) и наиболее растянутых элементах конструкции, хотя имеется успешный опыт усиления сжатой зоны конструкций.

Применение элементов внешнего армирования для усиления сжатых, внецентренно-сжатых железобетонных элементов производится двумя способами. Во-первых, для усиления коротких элементов эффективно устройство бандажей из холстов углеволокна, создающих «эффект обоймы» по типу косвенного армирования. Во-вторых, установка холстов



из углеволокна вдоль сжатого элемента является дополнительной рабочей арматурой [7].



Рис.1.5. Усиление консолей с применением углепластика

Усиление железобетонных элементов углепластиком производится в следующей технологической последовательности:

1. Шлифовка поверхности железобетонного элемента - допускается только при условии его незначительного повреждения. В случае серьезного повреждения бетонного слоя необходимо его восстановление.

2. Нанесение грунтовки, повышающей прочность сцепления.

3. Нанесение выравнивающего раствора.

4. Нанесение на усиливаемую поверхность первого слоя эпоксидного клея.

5. Укладка холста путем прокатывания его резиновым валиком.

6. Нанесение на поверхность холста второго слоя эпоксидного клея.

7. Нанесение защитного покрытия при условии отверждения предыдущих слоев [8].

Такой вид усиления весьма распространен на данный момент, т.к. имеет ряд преимуществ, таких как:

- отсутствие площадки текучести (модуль упругости от 220 до 330 ГПа);

- плотность углепластика меньше в 4 раза, чем стали;
- небольшая масса, облегчающая их транспортировку;
- монтаж, не требует применения подъёмных механизмов;
- неподверженность углепластика коррозии.

Несмотря на достоинства углепластика, имеются и недостатки:

- невозможность усиления сильно повреждённых конструкций, так как поверхность бетона повреждена коррозией;

- сложный технологический процесс;
- необходимость подготовки поверхности до «идеального» качества;
- высокая стоимость углепластика;
- необходимость остановки рабочего процесса (в некоторых случаях)
- полимерные затвердевшие клеевые составы начинают деградировать при температурах от 65 до 150 °С, вплоть до возгорания с выделением токсичных газов [9].

## 1.5. Способ усиления консолей колонн I.Tuns

В зарубежной практике усиления коротких консолей можно отметить способ, предложенный I.Tuns [10, 11]. Данный способ усиления предполагает устройство металлической обоймы из листовой стали, которая охватывает весь контур консоли (рис. 1.6). После этого пространство между обоймой и колонной заполнялось обычным раствором (без эффекта расширения), поэтому сцепление обоймы с консолью не имеет достаточной надёжности. Данный способ усиления обладает эффективностью на уровне 46 % (по данным автора), что не является высоким результатом для такого рода обоймы. Необходимо отметить, что монтаж конструкции усиления без остановки рабочего процесса практически невозможен. Такой способ может выполнять свои функции в случае незначительных повреждений. Зазоры между консолью и жесткой стальной обоймой не позволяют уложить бетон в соответствии с нормами, а обойма плохо включается в работу.

Таким образом, выполненный анализ существующих способов усиления железобетонных консолей колонн позволил выявить их преимущества и недостатки, что в свою очередь подтверждает необходимость разрабатывать и исследовать эффективные способы восстановления работоспособности таких несущих элементов каркаса.

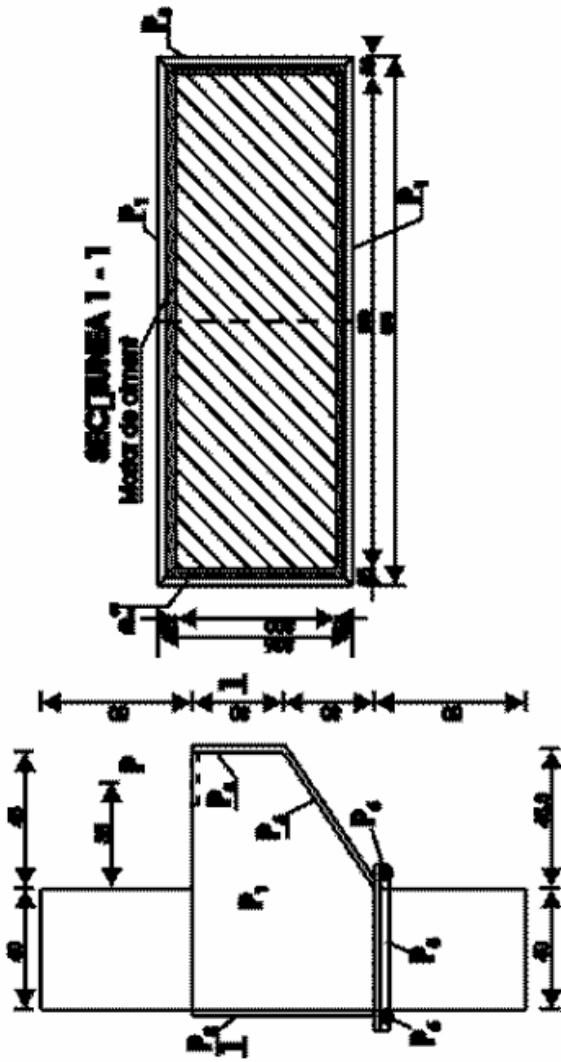


Рис. 1.6. Способ усиления консолей, предложенный I.Tups

## 2. РАЗРАБОТКА НОВЫХ СПОСОБОВ УСИЛЕНИЯ КОНСОЛЕЙ КОЛОНН

Восстановление работоспособности железобетонных консолей колонн может осуществляться следующими способами (рис.2.1):

- с помощью замкнутой рамы;
- с помощью рамки управления;
- с использованием опорных швеллеров;
- с использованием объёмно предварительно напряжённой сталетрубетонной обоймы;
- с использованием двухуровневой обоймы.

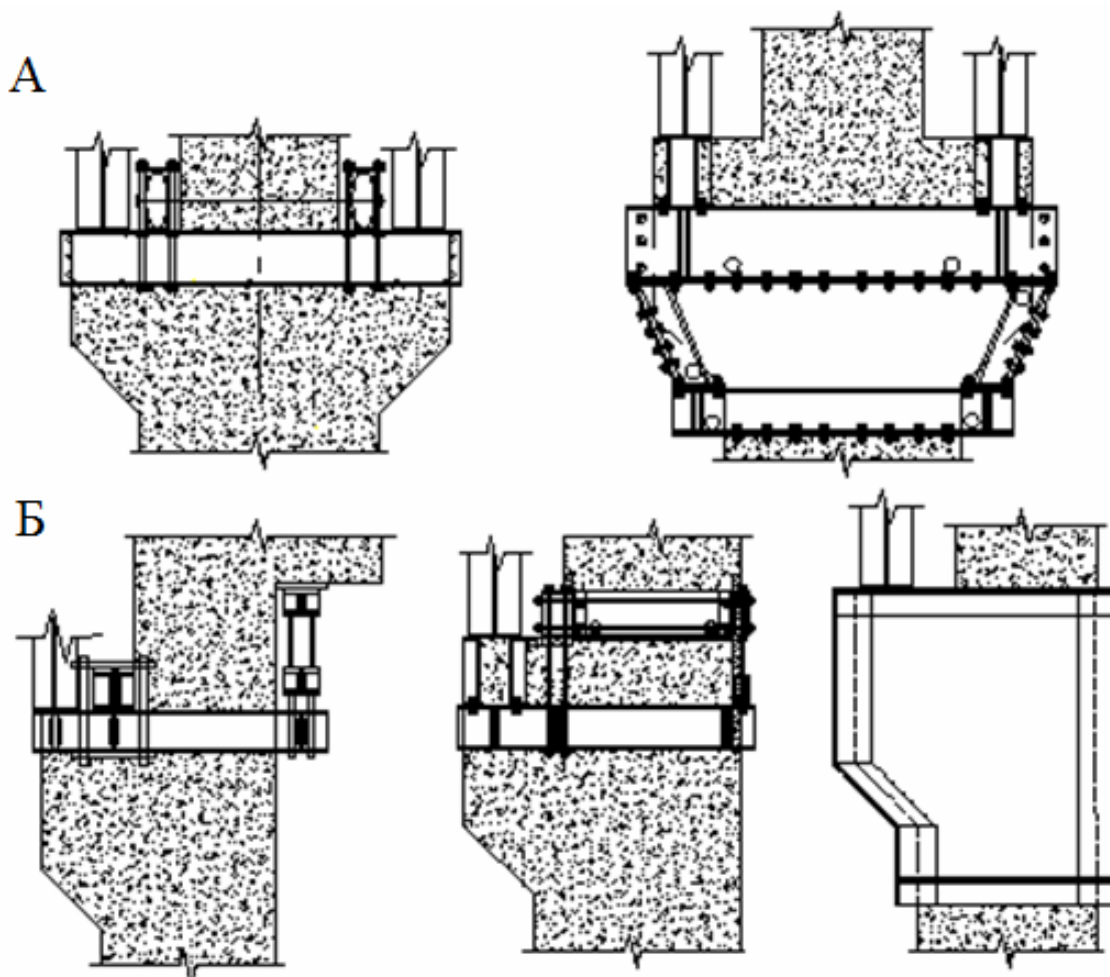


Рис. 2.1. Способы усиления консолей колонн для опирания подкрановых балок:  
А – для симметричных консолей; Б – для несимметричных консолей

По общему принципу работу вышеописанные способы можно разделить на три типа: усиление балансирными устройствами, сталетрубобетонными обоймами и комбинированный способ.

Принцип работы балансирных устройств заключается в переносе опорной реакции подкрановой балки с края консоли максимально близко к центру тяжести нижней части колонны. Таким образом, удастся снизить расчетный эксцентриситет действия силы и тем самым уменьшить изгибающий момент в расчетной части консоли колонны (у грани верхней части колонны). Такая схема усиления является интеллектуально управляемой системой с заданным уровнем надёжности.

Принцип действия усиления с помощью сталетрубобетонной обоймы заключается в наращивании сечения консоли колонны на всю её высоту. Одним из преимуществ является взаимная работа старого и нового бетона, заключенного в стальную оболочку, за счет введения в цемент расширяющей добавки (не более 5 % от массы), что позволяет не только наиболее рационально использовать имеющиеся ресурсы прочности, но и повысить их.

Комбинирование вышеописанных способов усиления консолей колонн позволяет объединить их существенные преимущества. Использование принципа балансирного устройства позволяет передать опорную реакцию к центру тяжести, а применение сталетрубобетонной обоймы позволяет создать необходимую жёсткость конструкции. Комбинированный способ усиления консолей колонн позволяет создать уникальные конструкции, работой которых можно автоматизировано управлять.

Все приведенные способы обладают достаточно высокой прочностью и низкой деформативностью, и позволяют охватить большинство возможных случаев разрушений и повреждений конструкций.

## 2.1. Восстановление работоспособности с помощью замкнутой рамы

Принцип восстановления работоспособности с помощью замкнутой рамы основан на применении комбинированного типа. Способ разработан для усиления симметричных консолей колонн.

### Технологическая последовательность выполнения монтажа конструкции усиления

Способ восстановления несущей способности заключается в том, что в плане между смежными подкрановыми балками и верхней частью

колонны укладывают стальное центрирующее кольцо и заполняют его мелкозернистым расширяющимся бетоном. Укладывают на него низко-модульную подкладку, затем сверху на неё монтируют центраторы, выступающие за боковые грани колонны на  $1/3 \dots 1/4$  её ширины.

Центраторы опирают через низко-модульную подкладку, например из листовой резины, или дубовую на центрирующее кольцо вблизи центра тяжести колонны. Центраторы устанавливают на минимальном расстоянии к верхней части колонны. На центратор устанавливают шайбы с отверстиями для тяжей.

Центраторы соединяют друг с другом горизонтальными тяжами и фиксируют их в проектном положении в плане. Восстановление несущей способности консолей осуществляют стальной обоймой, состоящей из пары главных прокатных балок и пары вспомогательных соединительных.

Лебёдками подтягивают обойму к паре центраторов в проектное положение и подвешивают её к ним на вертикальных тяжах, проходящих сквозь верхние и нижние полки главных прокатных балок обоймы. Вертикальные тяжи снабжены нижними рихтующими гайками. Совмещают отверстия в полках подкрановых балок и обойме, и их анкерными болтами с шайбами и гайками.

Механизировано затягивают гайки на вертикальных тяжах и этим поддомкрачивают осевшие подкрановые балки. Возвращают их в проектное положение, исключают просадку опорных частей и поворот их сечения.

Монтируют бетононасос и пульт управления, соединяют патрубки обоймы бетонопроводами с пультом управления и бетононасосом и, управляя с пульта, нагнетают мелкозернистый расширяющийся бетон в обойму способом «снизу вверх» в полость между колонной и стальной обоймой. При схватывании бетон расширяется, напрягает обойму изнутри, обжимает усиливаемую консоль со всех сторон и объединяет обойму, усиливаемую консоль колонны в единое целое.

Модернизированные сталетрубетонные консоли колонны воспринимают вертикальные опорные реакции смежных подкрановых балок и передают их через обоймы и тяжи на центраторы с минимальными эксцентриситетами, то есть несущая способность консолей полностью восстановлена. Затягивают и контрят гайки на всех тяжах и эксплуатируют модернизированные подкрановые конструкции (рис.2.2–2.3).

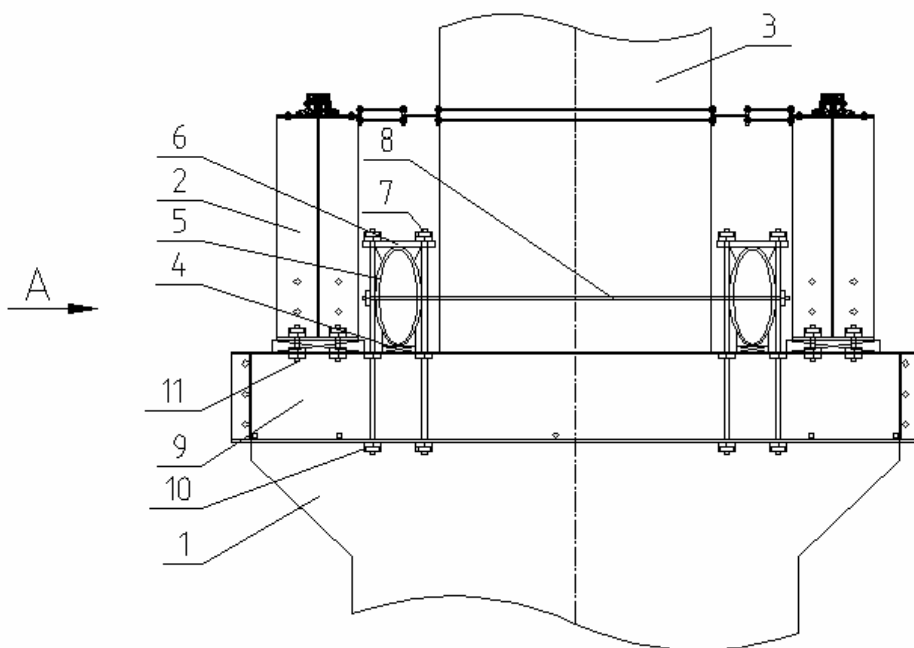


Рис. 2.2. Узел восстановления несущей способности разрушающихся по среднему ряду колонн железобетонных симметричных консолей:  
 1 – консоль; 2 – подкрановая балка; 3 – колонна; 4 – центрирующее кольцо;  
 5 – центратор; 6 – фигурная шайба; 7 – тяжи; 8 – горизонтальные тяжи;  
 9 – стальная обойма; 10 – рихтующие гайки; 11 – анкерные болты

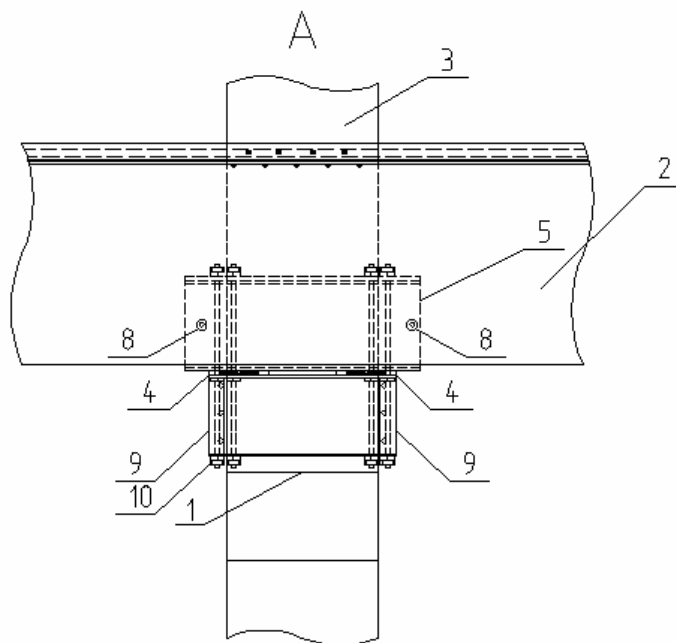


Рис. 2.3. Вид А узла восстановления несущей способности разрушающихся по среднему ряду колонн железобетонных симметричных аварийных консолей:  
 1 – консоль; 2 – подкрановая балка; 3 – колонна; 4 – центрирующее кольцо;  
 5 – центратор; 8 – горизонтальные тяжи; 9 – стальная обойма;  
 10 – рихтующие гайки

## Методика расчета

Расчёт данного способа достаточно производится по элементарным формулам сопротивления материалов. Овальный профиль рассчитывается на изгиб, тяжи – на растяжение. Нагрузка как для расчёта на изгиб, так и для расчёта на растяжение находится по линиям влияния от двух сближенных кранов грузоподъёмностью по 50 т каждый.

Динамику воздействий учитываем, принимая коэффициент условия работы  $\gamma=0,7$ , с каждой стороны консоли примем подвески из четырёх шпилек М24 (сталь 40Х «селект» с термообработкой) [12] с площадью поперечного сечения по нарезке  $4,52 \cdot 8 = 28,16 \text{ см}^2$ , то есть по четыре шпильки для подвески к каждому концу центратора. Проверка прочности тяжей на растяжение:

$$\sigma = \frac{D_{\max}}{\sum A} \leq \gamma R_y; \quad \sigma = \frac{8263}{4,52 \cdot 8} = 228,51 < 0,7 \cdot 770 = 539 \text{ МПа},$$

где  $D_{\max}$  – максимальная опорная реакция от колёс двух кранов;  $\sum A$  – суммарная площадь шпилек;  $R_y$  – расчётное сопротивление шпилек на растяжение.

Прочность тяжей на растяжение обеспечена с запасом, так как воздействия динамические. Примем сечение каждого центратора из овального профиля с отношением большего габарита овала к меньшему, равному трём.

Нагрузка на единицу его длины

$$q = \frac{D_{\max}}{l} = \frac{8263}{75} = 110,2 \frac{\text{гН}}{\text{см}},$$

где  $D_{\max}$  – максимальная опорная реакция от колёс крана;  $l$  – ширина консоли.

Тогда изгибающий момент равен

$$M = \frac{ql^2}{8} = \frac{110,2 \cdot 75^2}{8} = 77484,4 \text{ гН/см},$$

где  $q$  – распределённая нагрузка на единицу ширины консоли;  $l$  – ширина консоли.

Требуемый момент сопротивления трубы центрирующего центратора:

$$W_x = \frac{M}{R} = \frac{77484,4}{230} = 336,9 \text{ см}^3,$$

где  $M$  – изгибающий момент;  $R$  – расчётное сопротивление стали на изгиб.

Принимаем овальный профиль  $\text{O } 32,5 \cdot 6 \text{ мм}$ ,  $A = 60,1 \text{ см}^2$ ,  $i_x = 14,6$ ,  $J_x = 12891 \text{ см}^4$ .

Фактический момент сопротивления  $W_x = 532,4 \text{ см}^3$ .



Проверка прочности центратора:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} = \frac{77484,4}{532,5} = 145,54 < R_y = 0,7 \cdot 230 = 161 \text{ МПа,}$$

где  $M$  – изгибающий момент;  $W_x$  – требуемый момент сопротивления.

Консоли с обоймой работают как единый сталетрубобетонный элемент после полного монтажа конструкции. Такой эффект достигается нагнетанием мелкозернистого расширяющего бетона в полость между колонной и стенкой двутавра. За счёт превращения элемента в сталетрубобетонный, отказа от использования сварки (вся конструкция собирается на болтах) увеличивается живучесть конструкции и технологичность сборки.

Такая конструкция хорошо подходит для усиления симметричных консолей промышленных зданий, т.к. решает не только такие проблемы, как остановка рабочего процесса, материалоёмкость и другие, но и улучшает характер работы колонны в целом. Это можно объяснить тем, что усилие от подкрановых балок передается с минимальным эксцентриситетом на нижнюю часть колонны.

К недостаткам способа относится то, что нижняя сталетрубобетонная рамка не дает возможности управлять положением подкрановой балки. Такая возможность реализована через болты, что не всегда удобно.

## 2.2. Восстановление работоспособности с помощью рамки управления

Принцип восстановления работоспособности с помощью рамки управления основан на применении балансирного устройства. Способ разработан для усиления несимметричных консолей колонн.

### Технологическая последовательность выполнения монтажа конструкции усиления

Способ полной разгрузки заключается в том, что защитный слой бетона выше уступа колонны и в промежутке между смежными подкрановыми балками и верхней частью колонны удаляют, а поверхность промывают водой.

В плане в промежутке между смежными подкрановыми балками и верхней частью колонны укладывают центрирующее кольцо (опорное кольцо из стальной трубы) и заполняют его мелкозернистым расширяющимся бетоном.

Устанавливают на центратор центральную опорную балку, выступающую своими консолями за боковые грани колонны с одной и другой стороны колонны на  $1/3 \dots 1/2$  её ширины. Монтируют на центральную

балку опорные шайбы на несколько болтов и подвешивают к концам центральной балки тяги с гайками. Образуют в нижних поясах подкрановых балок отверстия в проектных точках для домкратных болтов. Укладывают на центратор низко модульную подкладку, затем сверху на неё монтируют центральную опорную балку, выступающую за боковые грани колонны на  $1/3 \dots 1/2$  её высоты.

Центральную опорную балку опирают через низко модульную подкладку, например, из листовой резины или дубовую на центратор вблизи центра тяжести верхней части колонны.

Центральную балку выполняют прямоугольной в сечении. Между центральной опорной балкой и верхней частью колонны имеется зазор  $80 \dots 100$  мм по контуру с учётом удалённого защитного слоя.

С тыльной стороны колонны устанавливают анкерную балку коробчатую в сечении. Соединяют центральную и анкерную балки друг с другом горизонтальными тягами с шайбами и гайками. Устанавливают боковые щёки и замыкают обойму вокруг верхней части колонны. По всему контуру имеется зазор  $80 \dots 100$  мм с учётом удалённого защитного слоя бетона.

Способом «снизу вверх» нагнетают мелкозернистый расширяющийся бетон в круговую щель между обоймой и колонной. В начале процесса схватывания бетона затягивают гайки на горизонтальных тягах, дополнительно уплотняют бетон в обойме прессованием. После набора бетоном прочности, подвешивают на тягах к выступающим концам центральной опорной балки неравноплечие рычаги управления с одной и другой стороны колонны.

Подводят короткие плечи рычагов под смежные подкрановые балки и соединяют эти плечи с подкрановыми балками домкратными болтами, работающими на сжатие, а длинные плечи поводят под анкерную балку обоймы и также соединяют их домкратными болтами с шайбами и гайками.

По концам соединяют рычаги управления друг с другом тягами и образуют замкнутую рамку управления. Устанавливают рамку управления на проектную отметку, вращая гайковёртом гайки на тягах. Затем механизировано регулируют домкратные болты на коротких плечах рычагов управления и согласуют регулировку рычагов с величиной проектного поддомкратывания  $\Delta$  смежных подкрановых балок.

Отвинчивают крепёжные анкерные болты на эту величину  $\Delta$ , а затем механизировано регулируют болты на длинных плечах рычагов управления. Рычагами поддомкратывают смежные подкрановые балки домкратными болтами на величину  $\Delta$ , упираясь домкратными болтами в анкерную балку, возвращают подкрановые балки в проектное положение.

Рамка управления может быть собрана вокруг колонны на нулевой отметке, а затем целиком поднята лебёдками до проектной отметки и подвешена на тягах к центральной балке (рис.2.4).

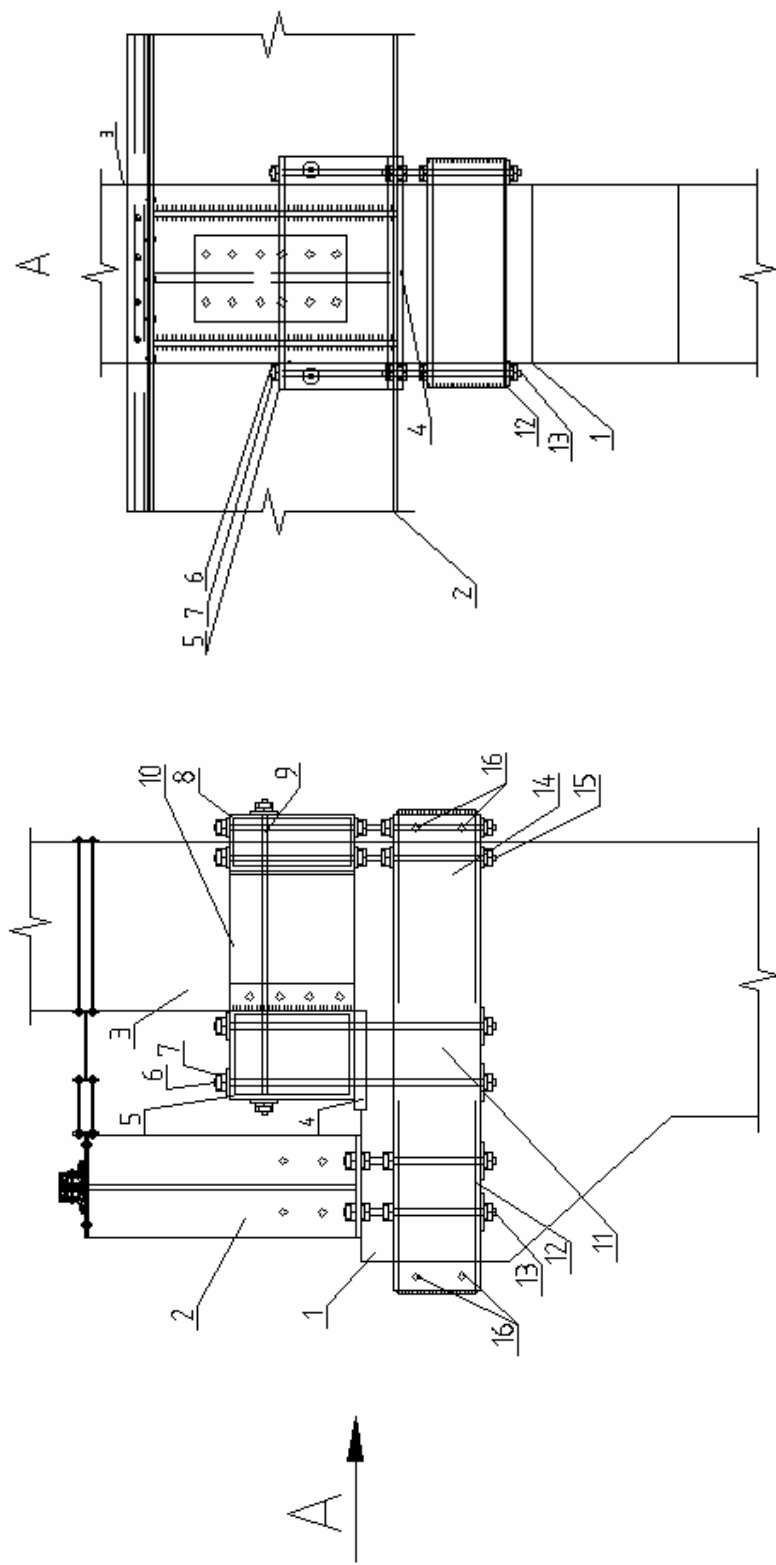


Рис. 2.4. Восстановление работоспособности с помощью рамки управления:

- 1 – железобетонная консоль; 2 – подкрановая балка; 3 – верхняя часть колонны; 4 – центратор; 5 – опорная балка; 6 – тяги;
- 7 – гайки; 8 – анкерная балка; 9 – горизонтальные тяги; 10 – боковые щёки; 11 – неравноплечие рычаги;
- 12 – короткие плечи; 13 – болты; 14 – длинные плечи; 15 – болты; 16 – тяги

Разновидностью данного усиления является способ, в котором опорная реакция посредством рычагов управления передаётся на балку перекрытия, подходящую с обратной стороны консоли. В качестве такой балки может выступать как балка покрытия, так и горизонтальная часть этажерки, которая обеспечивает жёсткость конструкции всего каркаса (рис. 2.5).

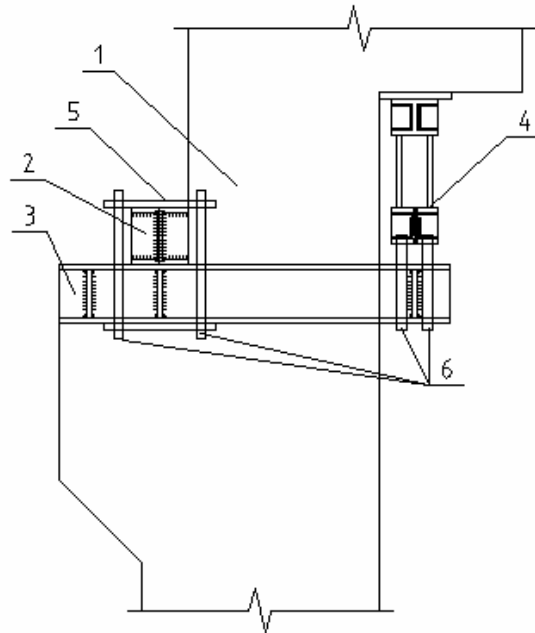


Рис. 2.5. Балансирное устройство с передачей опорной реакции в балку покрытия:

- 1 – железобетонная колонна; 2 – центраторная балка;  
 3 – рычаги управления; 4 – задняя опорная балка;  
 5 – опорные пластины; 6 – болты

### Методика расчета

Расчёт конструкций узла опирания подкрановых балок произведём на усилия, возникающие в нём при одновременной работе двух сближенных кранов, работающих в сцепке и транспортирующих турбину массой 100 т на одной траверсе.

Два сближенных крана грузоподъёмностью по 50 т поместим на смежных балках неблагоприятным образом. Расчётное воздействие каждого колеса равно  $P = 2674,1$  гН.

Максимальную опорную реакцию  $D_{\max}$  определим по линии влияния:

$$D_{\max} = \sum P_i y_i; D_{\max} = 3 \cdot 2674,1(2,18 + 4)/6 = 8263 \text{ гН.}$$

Примем соотношение плеч рычагов управления примерно 3/1, то есть длинное плечо превышает короткое в три раза, тогда на анкерную балку передаётся сила, направленная снизу вверх  $F_{\text{вспом.}} = 8263/3 = 2754,3$  гН.

Суммарное же усилие в восьми тягах будет равно

$$\sum F = D_{\max} + F_{\text{вспом.}} = 8263 + 2754,3 = 11017,3 \text{ гН.}$$

Аварийное состояние консоли устраним полной разгрузкой разрушающейся консоли.

К главной опорной балке обоймы верхней части колонны подвешена пара рычагов управления на восьми тягах из высокопрочной легированной стали [13]. Тяги, сталь 40ХЗМФ "Селект" [13, с.72, табл.61\*] с наименьшим временным сопротивлением  $R_{\text{бun}} = 1350$  МПа. Расчётное сопротивление после термической обработки  $R_{\text{bh}} = 0,7R_{\text{бun}} = 945$  МПа.

Восемь тяг передают суммарное усилие вблизи центра тяжести сечения колонны с минимальным эксцентриситетом.

$$\sum F = D_{\max} + F_{\text{вспом.}} = 8263 + 2754,3 = 11017,3 \text{ гН.}$$

Требуемая площадь поперечного сечения восьми тяг (сталь легированная 40Х "Селект")

$$\sum A = \frac{D_{\max}}{\gamma \cdot R} = \frac{11017,3}{0,8 \cdot 945} = 14,6 \text{ см}^2.$$

Примем восемь тяг М20 [13, с.72, табл.62\*] с суммарной площадью поперечного сечения нетто по нарезке  $2,45 \cdot 8 = 19,6 > 14,6 \text{ см}^2$ , то есть по четыре тяги для подвески каждого рычага управления. Проверка прочности восьми тяг на растяжение

$$\sigma = \frac{D_{\max}}{\sum A} \leq \gamma R_y; \quad \sigma = \frac{11017,3}{19,6} = 562,1 < 0,8 \cdot 945 = 756 \text{ МПа.}$$

Прочность восьми тяг на растяжение обеспечена с запасом.

### Расчёт центральной опорной балки на изгиб

Примем сечение центральной опорной балки коробчатым.

$$\text{Нагрузка на единицу её длины } q = \frac{11017,3}{75} = 146,9 \frac{\text{гН}}{\text{см}}.$$

$$\text{Тогда изгибающий момент } M = \frac{ql^2}{8} = \frac{146,9 \cdot 75^2}{8} = 103287,2 \text{ гНсм.}$$

Требуемый момент сопротивления центральной опорной балки:

$$W_x = \frac{M}{R} = \frac{103287,2}{230} = 449,1 \text{ см}^3.$$

Сечение центральной опорной балки – прямоугольная труба, из двух неравнобоких уголков [13, с.50] 2 Г 200·125·14 мм,  $A = 2 \cdot 37,9 = 78,8 \text{ см}^2$ ,  $W_x = 422 \text{ см}^3$ ,  $m = 34,4 \cdot 2 = 68,8 \text{ кг/м}$ . Сталь С275 ВСТЗпс6–2, ТУ 14–1–3023–80,  $R_y = 260$  МПа.

Проверка прочности центральной опорной балки:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} = \frac{103287,2}{422} = 244,75 < R_y = 260 \text{ МПа.}$$

Прочность центральной опорной балки обоймы обеспечена.

Центральная опорная балка может быть выполнена двутавровой в сечении из I 300·135 мм,  $A = 46,5 \text{ см}^2$ ,  $W_x = 472 \text{ см}^3$  [13, с.52].

Расчёт рычага управления:

Короткое плечо рычага управления – 30 см.

Длинное плечо рычага управления – 100 см.

Изгибающий момент  $M = 5000 \cdot 30 = 150000 \text{ гН/см}$ .

Требуемый момент сопротивления рычага управления

$$W_x = \frac{M}{R} = \frac{150000}{230} = 651 \text{ см}^3.$$

Сечение рычага управления – прямоугольная труба, из двух неравнобоких уголков [13, с.50] 2 Г 250·160·16 мм,  $A = 2 \cdot 63,6 = 127,2 \text{ см}^2$ ,  $W_x = 782,6 \text{ см}^3$ ,  $m = 49,9 \cdot 2 = 99,8 \text{ кг/м}$ . Сталь С255 ВСТ3сп5, ГОСТ 27772–88,  $R_y = 230 \text{ МПа}$ .

Проверка прочности рычага управления

$$\sigma = \frac{M}{W_x} = \frac{150000}{782,6} = 191,7 < R_y = 230 \text{ МПа.}$$

К недостаткам способа относится невозможность применения домкрата в ходе рихтовки подкрановых балок, что обусловлено отсутствием места для его установки.

### 2.3. Восстановление работоспособности консолей колонн с использованием опорных швеллеров

Принцип восстановления работоспособности консолей колонн с использованием опорных швеллеров основан на применении комбинированного типа, позволяющего создать управляемые конструкции. Способ разработан для усиления несимметричных консолей колонн.

#### Технологическая последовательность выполнения монтажа конструкции усиления

В промежутке между смежными подкрановыми балками вокруг верхней части колонны, а также на самой консоли удаляют повреждённый коррозией, защитный слой бетона толщиной 60...75 мм, промывают поверхность.

Укладывают стальное опорное кольцо вблизи центра тяжести нижней части колонны с минимальным эксцентриситетом, заполняют опорное кольцо мелкозернистым расширяющимся бетоном и создают надёжную опору для центратора.

Монтируют центратор, являющийся элементом верхней неподвижной обоймы вокруг верхней части колонны, причём концы центратора выпускают с двух сторон колонны за боковые грани на 250...300 мм.

Подвешивают к этим концам на тяжах–регуляторах симметричную пару рычагов управления ниже отметки консоли на 350...400 мм устанавливают постоянную распорку между короткими плечами рычагов управления и нижними поясами подкрановых балок и фиксируют пару рычагов управления горизонтально.

Опирают на длинные плечи этой пары рычагов соединительную домкратную балку и закрепляют на ней домкратными болтами балку верхней неподвижной обоймы на отметке центратора.

Уплотняют все щели упомянутой обоймы путем соединения центратора и балки верхней неподвижной обоймы стальными листами и тяжами в замкнутую обойму. К соединительным швеллерообразным элементам присоединяют гнутый элемент с днищем из листовой стали, являющийся уплотнительным элементом. В зоне контакта используют резиновые уплотнители, заранее приклеенные к соединяемым элементам.

Присоединяют бетонопроводы к патрубкам обоймы, нагнетают через них в обойму способом «снизу вверх» мелкозернистый расширяющийся бетон, а при схватывании бетона обжимают обоймой верхнюю часть колонны со всех сторон и обеспечивают неподвижное соединение с колонной в единое целое.

Этот участок колонны превращается в сталетрубобетонный. Со стороны домкратной балки восстанавливают защитный слой колонны торкретированием.

Со стороны цеха удаляют аварийную часть консоли в промежутке между опорными частями смежных подкрановых балок и короткими плечами рычагов управления на глубину 120...150 мм.

Монтируют в это гнездо опорный швеллер и опирают его на рычаги управления, соединяют болтами его нижнюю полку с полками пары рычагов, а верхнюю полку болтами – с нижними поясами подкрановых балок (рис.2.6).

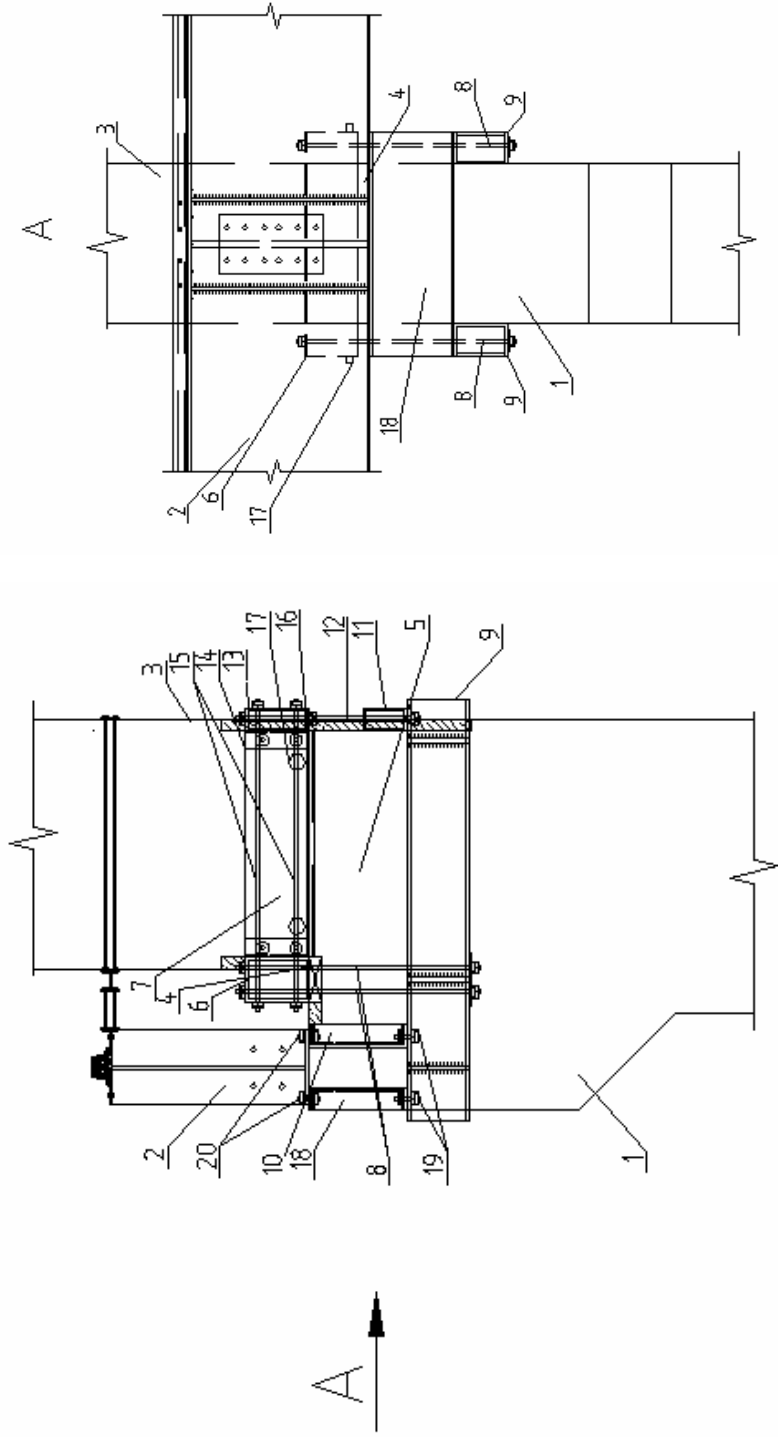


Рис. 2.6. Восстановление работоспособности с использованием опорных швеллеров:

- 1 – консоль колонны; 2 – подкрановая балка; 3 – верхняя часть колонны;
- 4 – опорное кольцо; 5 – нижняя часть колонны; 6 – центратор; 7 – верхняя обойма; 8 – тяж-регулятор;
- 9 – рычаги управления; 10 – распорка; 11 – соединительная балка; 12 – болты; 13 – балка верхней обоймы;
- 14 – стальные листы; 15 – тяжи; 16 – гнутый элемент; 17 – патрубki обоймы;
- 18 – опорный швеллер; 19, 20 – болты



## Методика расчета

Максимальную опорную реакцию  $D_{\max}$  определим по линии влияния:  
 $D_{\max} = \sum P_i y_i$ ;  $D_{\max} = 3 \cdot 2674,1(2,18 + 4)/6 = 8263$  гН.

Тяжи выполняются высокопрочными (сталь легированная 40Х "Селект").  
Наименьшее временное сопротивление  $R_{bun} = 1100$  МПа. Расчётное сопротивление после термической обработки  $R_{bh} = 0,7R_{bun} = 770$  МПа.

$$\sum A = \frac{D_{\max}}{\gamma R} = \frac{8263}{0,8 \cdot 770} = 13,41 \text{ см}^2,$$

где  $\gamma$  – коэффициент условия работы.

Примем восемь вертикальных тяжей по четыре с каждой из сторон колонны для подвески каждого из рычагов управления М20 [13, с.72, табл.62] с суммарной площадью поперечного сечения по нарезке  $2,45 \cdot 8 = 19,6 > 13,41 \text{ см}^2$  (сталь легированная 40 Х «Селект», тяжи термообработаны). Проверка прочности вертикальных тяжей М20 на растяжение:

$$\sigma = \frac{D_{\max}}{\sum A} < \gamma \cdot R_y; \quad \sigma = \frac{8263}{19,6} = 421,6 < 0,8 \cdot 770 = 616 \text{ МПа}.$$

Прочность восьми высокопрочных вертикальных тяжей М20 на растяжение по ослабленному нарезкой сечению обеспечена с запасом.

Расчёт центратора на изгиб в вертикальной плоскости. Примем сталь центратора – Вст3 сп5, ГОСТ 2 777 2–88.

$$\text{Нагрузка на единицу его длины } q = \frac{8263}{75} = 110,2 \frac{\text{гН}}{\text{см}}.$$

$$\text{Тогда изгибающий момент } M = \frac{ql^2}{8} = \frac{110,2 \cdot 75^2}{8} = 77484,4 \text{ гНсм}.$$

$$\text{Требуемый момент сопротивления двутаврового центратора } W_x = \frac{M}{\gamma \cdot R} = \frac{77484,4}{0,8 \cdot 230} = 421,1 \text{ см}^3.$$

Принимаем широкополочный двутавр I26Ш1:  $A = 54,37 \text{ см}^2$ ,  $J_x = 6225 \text{ см}^4$ . Фактический момент сопротивления  $W_x = 496 \text{ см}^3$ . Может быть применен и профиль коробчатый в сечении.

Проверка прочности центратора на изгиб:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} = \frac{77484,4}{496} = 156,2 < \gamma \cdot R_y = 0,8 \cdot 230 = 184 \text{ МПа}.$$

Прочность центратора на изгиб из двутавра I26Ш1 обеспечена. Боковой стопор, значительно менее нагруженный, примем из швеллера I24Ш1. К достоинствам этого способа можно отнести применение гидродомкрата при рихтовке подкрановых балок, удаление корродирующего

бетона и арматуры из-под подкрановой балки, возможности повторного применения.

К недостаткам способа можно отнести достаточно сложную конструктивную схему, которая может иметь существенный вес, что скажется на её итоговой материалоёмкости и трудоёмкости, а также необходимость проведения ряда монтажных работ на высоте.

## 2.4. Восстановление работоспособности с использованием объёмно предварительно напряжённой сталетрубобетонной обоймы

Принцип восстановления работоспособности с использованием объёмно предварительно напряжённой сталетрубобетонной обоймы основан на применении сталетрубобетонной обоймы. Способ разработан для усиления несимметричных консолей колонн.

### Технологическая последовательность выполнения монтажа конструкции усиления

Механизировано на заводе металлоконструкций изготавливают сборную обойму, состоящую из швеллерообразных гнутых сборных элементов с соосными совпадающими отверстиями в полках, копирующих с четырёх сторон внешнюю поверхность консоли, а также фиксатор–стопор с отверстиями на консолях его, для подвешивания обоймы. Удаляют вокруг по контуру аварийной консоли повреждённый коррозией защитный слой бетона толщиной 65...75 мм, транспортируют готовые элементы сборной обоймы в цех.

Монтируют фиксатор-стопор, выпуская его концы за боковые грани колонны на 200...250 мм, монтируют нижнюю часть обоймы, собирая её вокруг стержня колонны на нижней отметке с зазором по внешнему контуру 80...100 мм и, охватив колонну в круговую, замыкают обойму.

Монтируют верхнюю часть обоймы, совмещая соосные отверстия в отбортованных краях верхней и нижней частей обоймы и соединяют их в единую замкнутую обойму болтовым соединением. Подвешивают монтажный блок, например к тормозной балке. Монтируют монтажную лебёдку.

Стропят замкнутую обойму к крюкам мостового крана и лебёдки и синхронно мостовым краном и лебёдкой подтягивают замкнутую обойму вверх, скользя по колонне, до упора её в нижние пояса смежных подкрановых балок.

Совмещают отверстия для болтов в фиксаторе–стопоре и паре упоров замкнутой обоймы и стопорят обойму в проектном положении,

подвешивая её тязями к выступающим консолям фиксатора–стопора, а с тыльной стороны колонны к тормозной балке. Используя резиновые уплотнители, присоединяют болтами днища обоймы и уплотняют все щели обоймы, окончательно фиксируют и стопорят обойму в проектном положении.

Присоединяют гибкие бетонопроводы к патрубкам замкнутой обоймы, нагнетают через них в обойму способом «снизу вверх» мелкозернистый расширяющийся бетон, а при схватывании бетона объемно обжимают обоймой аварийную консоль колонны со всех сторон, преднапрягают её и преобразуют консоль в единую труботетонную консоль и полностью восстанавливают работоспособность аварийной консоли колонны (рис.2.7).

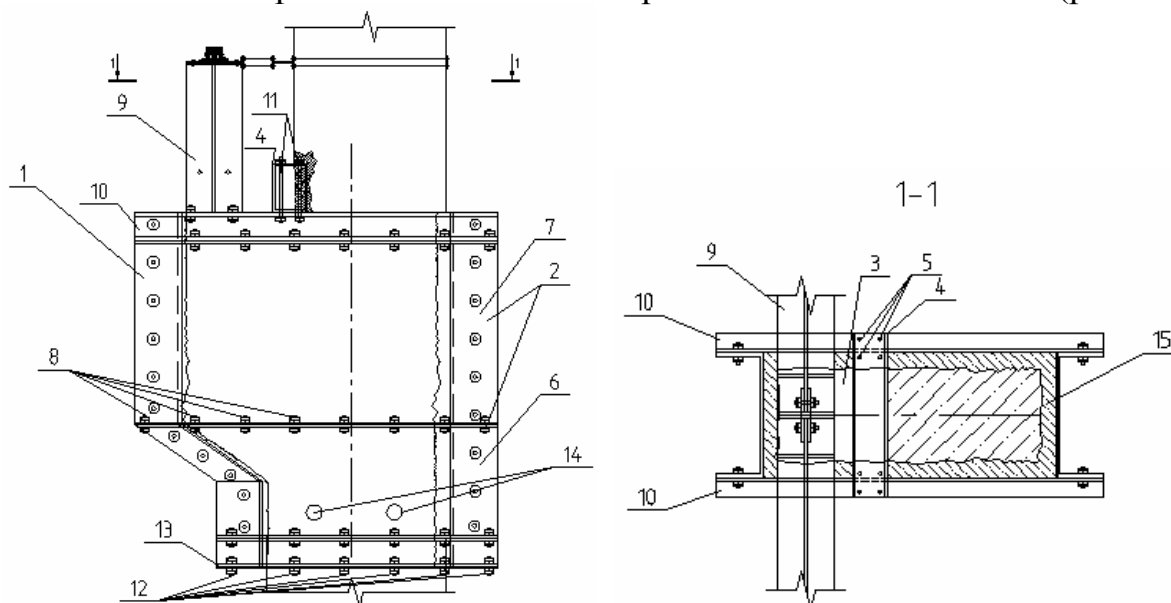


Рис. 2.7. Общий вид труботетонной обоймы:  
 1 – сборная обойма; 2 – швеллерообразный гнутый элемент; 3 – поверхность консоли; 4 – фиксатор–стопор; 5 – отверстия; 6 – нижняя часть обоймы;  
 7 – верхняя часть обоймы; 8 – болтовое соединение; 9 – подкрановая балка;  
 10 – упор замкнутой обоймы; 11 – тязи; 12 – болты; 13 – днище обоймы;  
 14 – патрубки; 15 – мелкозернистый расширяющийся бетон

Несмотря на его кажущуюся сложность, способ достаточно прост, поскольку не требует высотных монтажных работ и обладает относительно низкой материалоемкостью и трудоемкостью. За счет высокой прочности сталетруботетонных элементов усиливаемая конструкция также будет обладать высокой прочностью.

Одной из конструктивных разновидностей вышеописанного вида усиления является способ, в котором торцевые швеллеры обоймы обращены внутрь, а соединение конструкции производится с помощью сварки (рис 2.8).

Взятие консоли в сталетруботетонную обойму является эффективным способом, но обладает рядом недостатков, а именно: высокий удельный

вес (за счет цельности обоймы), невозможность передачи опорных реакций на нижнюю часть колонны.

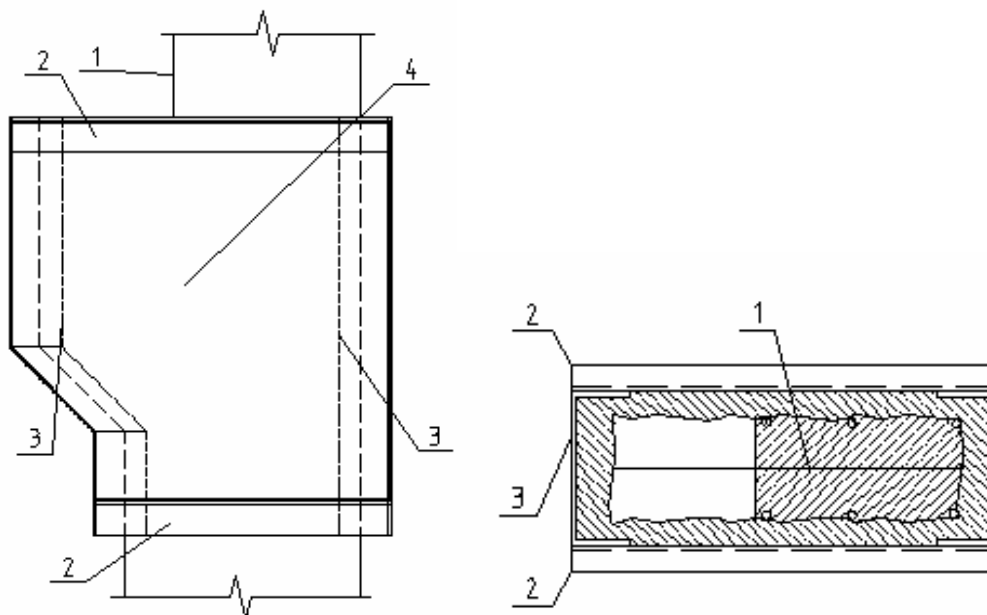


Рис. 2.8. Сталетрубобетонная обойма:  
1 – железобетонная колонна; 2 – соединительные уголки;  
3 – торцевые швеллеры; 4 – боковые пластины

## 2.5. Восстановление работоспособности с использованием двухуровневой обоймы

Принцип работы данного устройства основан на применении комбинированного типа, позволяющего создавать управляемые конструкции. Способ разработан для усиления симметричных консолей колонн.

### Технологическая последовательность выполнения монтажа конструкции усиления

Механизировано на заводе металлоконструкций изготавливают верхнюю и нижнюю части неподвижной обоймы, состоящие из швеллеров вдоль боковых граней аварийной консоли и двух коротких швеллеров с передней и тыльной стороны консоли. Все четыре швеллера снабжены ребрами и соединены друг с другом болтами в верхнюю обойму.

Днище присоединено к верхней обойме болтами. Верхняя обойма снабжена опорной стойкой, наклоненной под углом примерно  $60^\circ$  к вертикали. Нижняя полка верхней обоймы соединена через фланец с наклонным фиксирующим упором болтами. Нижний фланец упора соединен с нижней второстепенной обоймой болтовым соединением. На боковых элементах нижней обоймы имеются ребра и днища из листов присоединенные к нижней полке болтами. Удаляют защитный слой бетона (толщиной 60...75 мм) по контуру верхней и нижней обоймы консоли, промывают очищенную поверхность. Транспортируют готовые части верх-

ней и нижней сборных обойм в цех. На отметке перекрытия площадки охватывают нижнюю часть колонны, по контуру сечения сначала нижней, а затем и верхней обоймами соединяют их в замкнутую обойму болтами, совмещая при этом отверстия в вертикальных стенках длинных швеллеров и ребрах коротких швеллеров.

Высверливают отверстия в нижнем поясе подкрановой балки и прикрепляют болтами к нему опорный столик, состоящий из швеллера, стенка которого укреплена ребром жёсткости.

Во внешнем поясе тормозной балки высверливают отверстия для тяг и подвешивают их. На мостовом кране устанавливают кран типа «Пионер» так чтобы его стрела оказалась над центром тяжести собранной обоймы, поднимают её до упора в опорный столик.

Совмещаем тяги с отверстиями в обойме. Фиксируем обойму в проектное положение и фиксируем гайки. Аналогичным образом этим же краном поднимаем в проектное положение нижнюю часть и подвешиваем ее со стороны цеха к наклонному упору. Смонтировав нижнюю часть с верхней, присоединяют к нижней части днище.

Подготавливаем цементно-песчаный расширяющийся бетон, присоединяем шланги к патрубкам и методом «снизу вверх» нагнетаем расширяющийся бетон. После схватывания бетона при его расширении образуется единая сталетрубобетонная консоль.

Безопасность работ обеспечена. Используя отбойные молотки, удаляют поврежденный бетон с внутренней стороны консоли и открывают стальную закладную деталь и анкерные болты со стороны цеха. При необходимости анкерные болты заменяют. Освобождают место для опорного швеллера по ширине аварийно консоли. Монтируют швеллер, опирая его на сталетрубобетонную консоль.

Устанавливают под подкрановой балкой на опорные столики обоймы пару гидродомкратов, которыми поддомкрачивают соединенные подкрановые балки на проектную величину  $\Delta$ , затягивают и контрят гайками, полностью восстанавливая несущую способность аварийной консоли (рис.2.9).

За счет сегментного бетонирования конструкция обладает сниженной по сравнению с предыдущей массой. В силу конструктивных особенностей позволяет передать опорные реакции от смежных подкрановых балок на нижнюю часть колонны.

Таким образом, разработанные способы усиления консолей колонн позволяют передавать расчётный изгибающий момент в плоскости консоли через балансирные устройства, которые переносят опорную реакцию от действия мостовых кранов с края консоли максимально близко к центру тяжести колонны. Применение сталетрубобетонных конструкций позволяет полностью восстановить несущую способность исходной конструкции, невзирая на существующие повреждения.

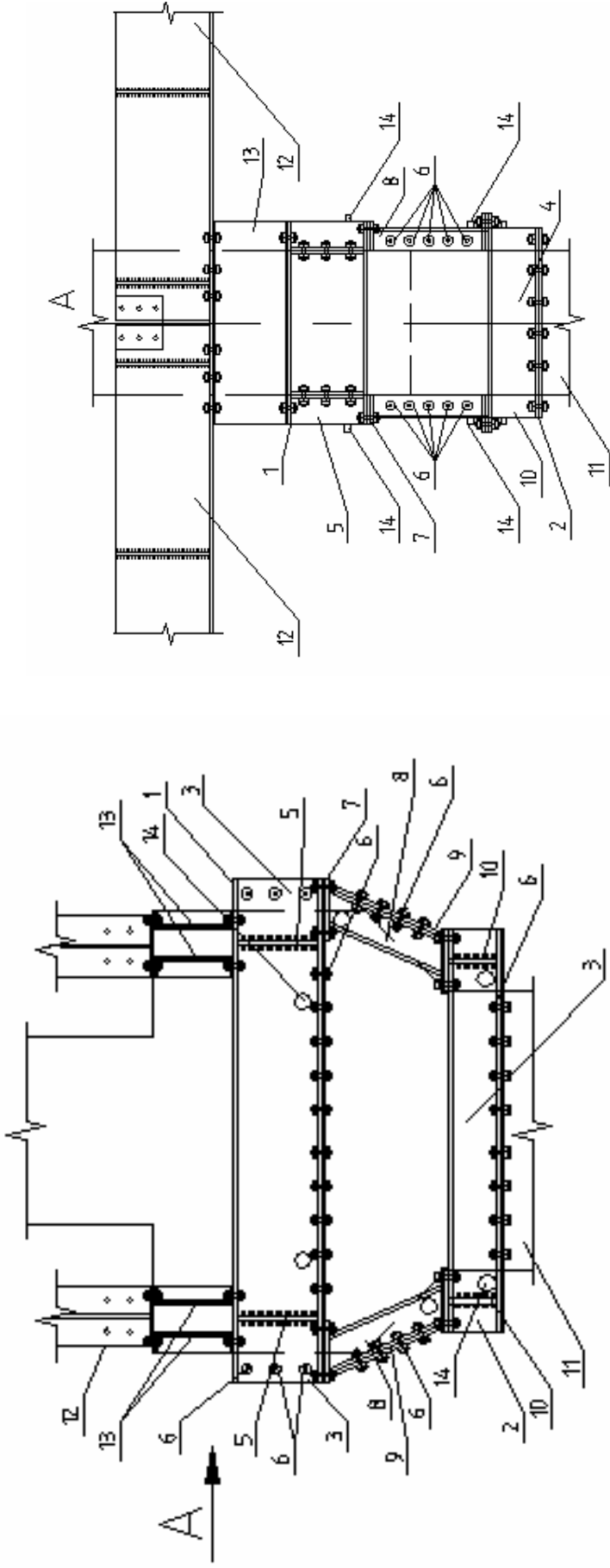


Рис. 2.9. Восстановление работоспособности с использованием двухуровневой обоймы:

- 1 – верхняя обойма, 2 – нижняя обойма, 3 – швеллеры; длинные (боковые), 4 – короткие (торцевые), 5 – вертикальные рёбра жёсткости, 6 – болты, 7 – днище, 8 – наклонные стойки, 9 – фланцы наклонных стоек, 10 – рёбра нижней обоймы, 11 – нижняя часть колонны, 12 – нижний пояс подкрановой балки, 13 – опорные століки из швеллеров, 14 – патрубки

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОДЕЛЕЙ КОНСОЛЕЙ КОЛОНН

#### 3.1. Цель и задачи экспериментального исследования

Цель исследования: изучение напряжённо-деформированного состояния моделей аварийной консоли колонны до и после усиления с применением балансирных устройств и сталетрубобетонных обойм.

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Провести тарировочные испытания всех элементов установки для определения коэффициента погрешности измерения, оценить прочность болтовых соединений.

2. Разработать и изготовить две модели консолей колонн, которые имитируют эксплуатируемые консоли на одной из ТЭЦ г. Пенза, предназначенные для опирания смежных подкрановых балок под мостовые краны грузоподъемностью 50/10 т, опорная реакция от сцепки из двух кранов равна 82,6 т.

3. Разработать методику проведения эксперимента моделей консолей колонн.

4. Провести испытания двух моделей консолей колонн по специально разработанной схеме с доведением их до разрушения.

5. Исследовать напряжённо-деформированное состояние консолей колонн при помощи проволочных тензорезисторов на бумажной основе, наклеенных на арматуру консолей.

6. Разработать и изготовить две модели балансирных устройств, состоящих из центратора, управляющих рычагов и задней опорной балки для консолей колонн и испытать их до разрушения.

7. Исследовать напряжённо-деформированное состояние конструкций для восстановления работоспособности с применением балансирных устройств при помощи проволочных тензорезисторов на бумажной основе, наклеенных в наиболее напряжённых местах.

8. Сравнить напряжённо-деформированное состояние консолей колонн до и после восстановления работоспособности с помощью балансирных устройств.

9. Разработать и изготовить масштабные конструкции восстановления работоспособности консолей колонн с применением сталетрубобетонных обойм с эффектом объёмного обжатия, состоящих из переднего и заднего торцевого швеллера, боковых накладок и соединительных уголков.

10. Провести прочностные испытания моделей восстановления работоспособности для консолей колонн с применением сталетрубобетонных

обойм с эффектом объёмного обжатия, состоящих из переднего и заднего торцевого швеллера, боковых накладок и соединительных уголков.

11. Исследовать напряжённо-деформированное состояние конструкций восстановления работоспособности с применением сталетрубобетонных обойм с эффектом объёмного обжатия при помощи проволочных тензорезисторов на фольговой основе, наклеенных в наиболее напряжённых местах.

12. Сравнить напряжённо-деформированное состояние консолей колонн до и после восстановления работоспособности с помощью предварительно напряжённых сталетрубобетонных обойм.

### 3.2. Расчёт прочности моделей аварийных консолей колонн по методике Т.И. Барановой

Расчет проведем по методике, предложенной доктором технических наук, профессором Т.И. Барановой [14] и в соответствии со СНиП [15], СП [16] и общим курсом железобетонных конструкций [17]. Расчётная схема моделей показана на рис.3.1.

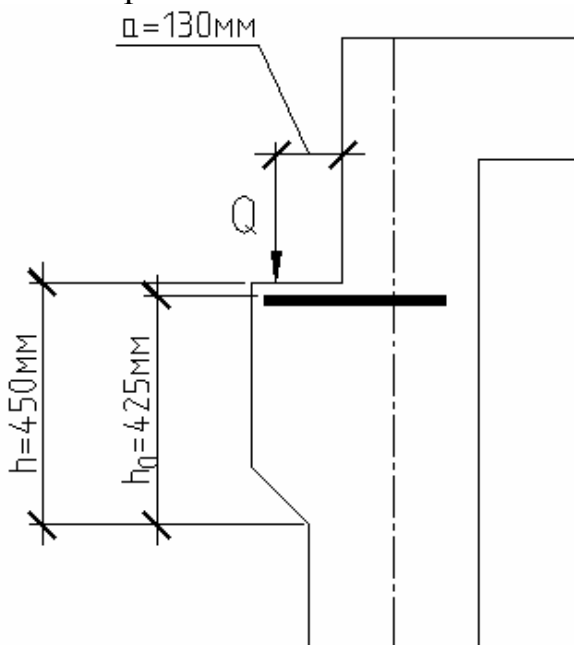


Рис. 3.1. Расчётная схема модели консоли колонны

Найдем максимальную поперечную силу воспринимаемую сечением:

$$Q = \frac{k_3 R_{bt} b h_0^2}{a} = \frac{1,2 \cdot 0,57 \cdot 16 \cdot 42,5^2}{13} = 152 \text{ кН (15,5 т)}, \quad (1)$$

где  $k_3$  – экспериментальный коэффициент, равный 1,2;  $R_{bt}$  – прочность бетона на растяжение;  $b$  – ширина консоли колонны в плане;  $h$  – расстояние



от растянутой арматуры до сжатой зоны бетона;  $a$  – расчётный эксцентриситет.

На основании разработанной теории [14, с.74] принимаем повышающий разрушающую силу коэффициент равный 1,25 за счет использования отогнутых в направлении сжатой полосы стержней арматуры. Таким образом,  $Q = 190$  кН (19,4 т).

При этом

$$Q < Q_{\max} = k_{\sigma 1} R_{bt} b h_0 \quad k_{\sigma 1} = 2,5 \cdot 0,57 \cdot 16 \cdot 42,5 = 97 \text{ кН (10 т)}, \quad (2)$$

где  $k_{\sigma 1}$  – экспериментальный коэффициент, равный 2,5.

С учетом повышающего разрушающую силу коэффициента равного 1,25 [14, с.74]  $Q_{\max} = 121,2$  кН (12,4 т).

### 3.3. Экспериментальные модели консолей колонны

На рис.3.2 показаны армирование, опалубка и размеры сечения моделей консоли. Рабочая арматура консоли принята в соответствии с аварийной арматурой консоли колонны, эксплуатируемой на одной из ТЭЦ г.Пензы, а именно  $2\varnothing 20$  А–III круглая в сечении, поперечная арматура класса А–III  $\varnothing 12$ .

Класс бетона выбран в соответствии с исследуемой моделью консоли реальной конструкции (колонна, эксплуатируемая на ТЭЦ). Пропорция и класс бетона рассчитывались по книге Баженова Ю.М. [18].

Находим водоцементное отношение:

$$\frac{B}{Ц} = \frac{A \cdot R_{ц}}{(R_0 + A \cdot 0,5 \cdot R_{ц})} = \frac{0,6 \cdot 37,5}{(10 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 37,5)} = 1,06. \quad (1)$$

По графику 3.32 [16] расход воды равен  $178$  л/м<sup>3</sup>.

Находим объём цемента:

$$Ц = \frac{B}{B/Ц} = \frac{178}{1,06} = 167,92 \text{ кг/м}^3. \quad (2)$$

Принимаем массу цемента, равной  $200$  кг.

Пустотность щебня равна:

$$\Pi_{щ} = 1 - \left( \frac{\rho}{\rho^I} \right) = 1 - \left( \frac{1,48}{2,6} \right) = 0,43. \quad (3)$$

Коэффициент раздвижки зёрен равен  $\alpha = 1,38$ .

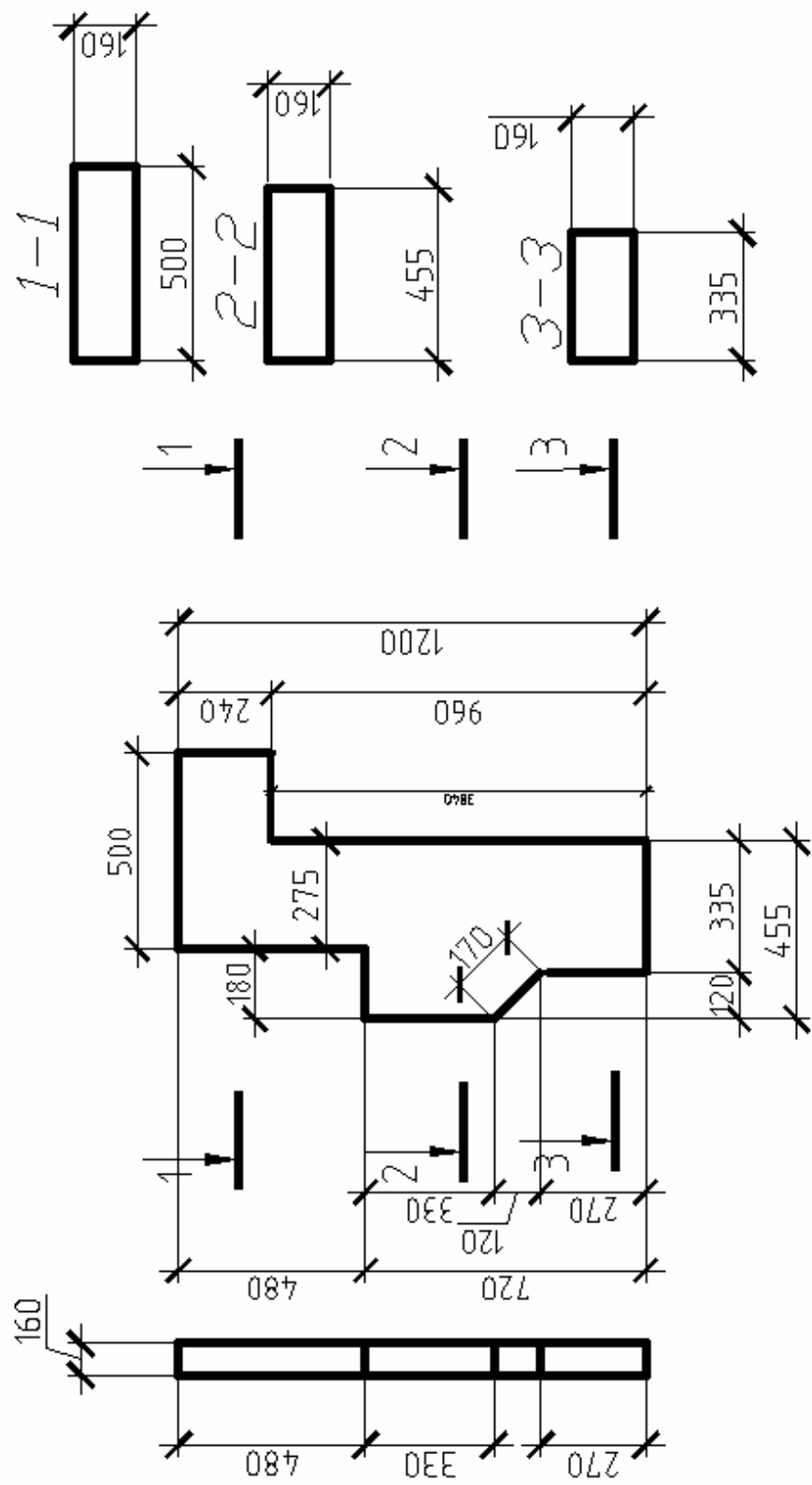


Рис. 3.2. Параметры исследуемых образцов

Расход щебня составляет:

$$\text{Щ} = \frac{1000}{\frac{\alpha \cdot \Pi_{\text{щ}}}{\rho'} + \frac{1}{\rho_{\text{щ}}}} = \frac{1000}{0,43 \cdot \frac{1,2}{1,48} + \frac{1}{2,6}} = 1373 \text{ кг/м}^3. \quad (4)$$

Расход песка:

$$\begin{aligned} \Pi &= \rho_n \left( 1000 - \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} - \text{В} - \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{ц}}} \right) = \\ &= 2,63 \left( 1000 - \frac{200}{3,1} - 178 - \frac{1373}{2,6} \right) = 603,3 \text{ кг/м}^3. \end{aligned} \quad (5)$$

Масса бетонной смеси равна:  $178+200+1373+603,29=2354,3\text{кг/м}^3$ .

Состав бетона, требующийся для изготовления одного образца объемом  $0,085 \text{ м}^3$  следующий:  $\text{В}=15,2\text{л}$ ,  $\text{Ц}=17\text{кг}$ ,  $\text{Щ}=116,7\text{кг}$ ,  $\text{П}=51,3\text{кг}$ .

Бетонная смесь после приготовления была уложена в подготовленные по размерам формы. Бетонную смесь уплотняли на вибростоле, изготовленном в лаборатории Пензенского ГУАС. Образцы вибрировались в течение 1...2 мин до образования на поверхности цементного молочка. После этого модели были закрыты полиэтиленовой плёнкой. Бетон увлажняли водой каждые 3 дня и укрывали плёнкой.

Опытные образцы моделей колонн изготавливали одновременно с бетонными кубиками размером  $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$  в количестве четырёх штук. Кубики хранились в непосредственной близости от образцов колонн. Класс бетона определялся экспериментально. После набора бетоном прочности в течение 28-ми суток кубики были испытаны на прессе с электронным управлением для определения класса бетона. Разрушающая нагрузка равнялась  $5,71 \text{ МПа}$ , что по СНиП [15] соответствует бетону класса В 10.

### 3.4. Подготовка приборов перед измерением деформаций

Тарировка тензостанции при помощи эталонной балки

Тензометрическая станция ММТС.64–01 была тарирована. Для тарировки применялась стандартная тарировочная балочка с поперечным сечением  $30 \times 6 \text{ мм}$  и длиной  $340 \text{ мм}$ . Для проведения тарировки применялось специальное устройство (рис.3.3). Использовалось 4 датчика на бумажной основе, которые наклеивались в зоне чистого изгиба тарировочной балочки (растяжение). Для тарировки применялись проволочные тензорезисторы с базой  $20 \text{ мм}$  на бумажной основе. Целью данного испытания было выявить процент погрешность тензостанции по

отношению к эталонным деформациям, задаваемым тарировочной балкой. Прогиб балки измерялся индикатором часового типа с точностью 0,01 мм. Известно, что при прогибе в 1 мм на поверхности балки, в зоне чистого изгиба, возникают относительные деформации, равные  $\varepsilon=60 \times 10^{-5}$ . В соответствии с законом Гука эталонные напряжения, возникающие на поверхности балочки в зоне чистого изгиба,  $\sigma=\varepsilon \cdot E=60 \cdot 10^{-5} \cdot 2,06 \cdot 10^5=123,6$  МПа. Тензостанция зафиксировала напряжение на поверхности тарировочной балочки равное 131,34 МПа. Отношение полученных тензостанцией напряжений к эталонным напряжениям равно  $131,34/123,6=1,06$ , следовательно, тензостанция завышает напряжения на 6 %. Погрешность измерения равна 6 %, что вполне приемлемо. В дальнейшем это завышение будет учтено при определении напряжений в арматуре путем деления на коэффициент 1,06.

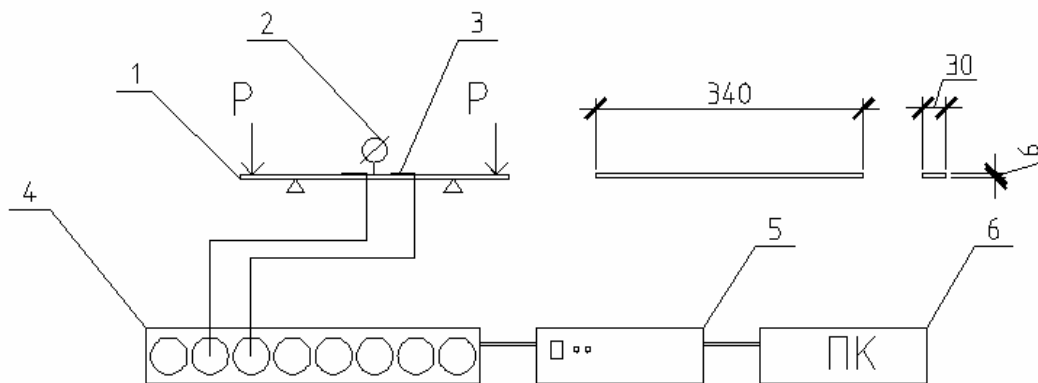


Рис. 3.3. Размеры тарировочной балки и схема испытания:  
 1 – тарировочная балка; 2 – индикатор часового типа; 3 – тензорезистор;  
 4 – модуль подключения кабелей; 5 – интерфейсный блок;  
 6 – персональный компьютер

Общий вид тарировочной установки приведен на рис.3.4.

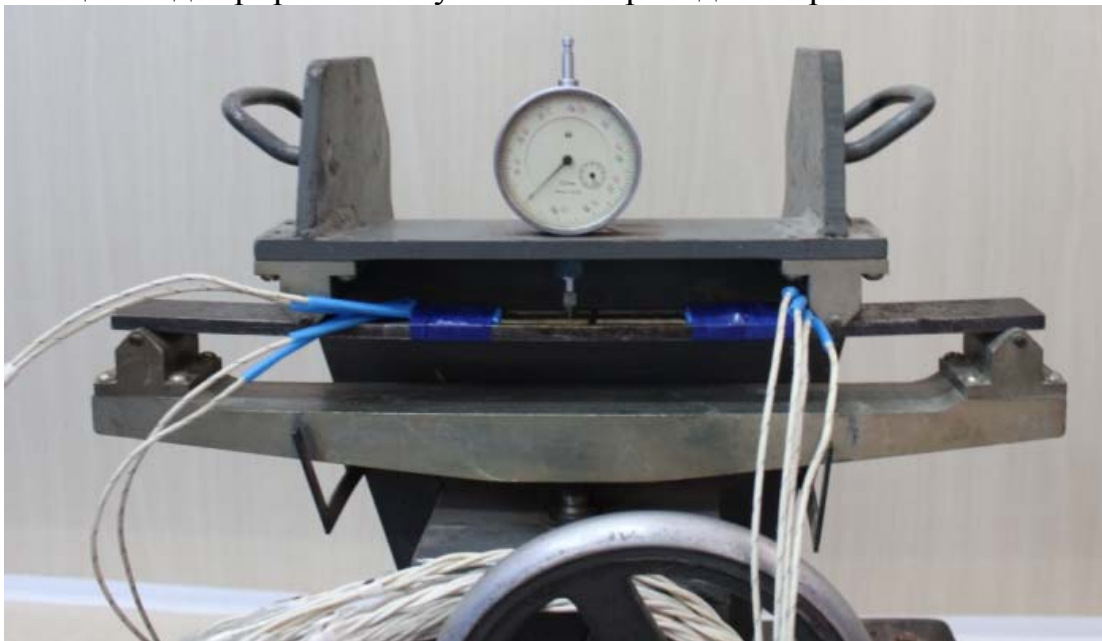


Рис. 3.4. Общий вид тарировочной установки

## Тарировка домкратов

В ходе подготовки эксперимента была проведена тарировка домкратов ДГ–50 на предмет погрешности с помощью прессы с электронным управлением, прошедшие государственную поверку (рис.3.5).



Рис. 3.5. Тарировка домкрата

В результате тарировки выявлено, что при давлении  $7,5 \text{ кгс/см}^2$  (1,5 деления на манометре) по манометру насосной станции значение нагрузки на прессе равнялось 1 т. Для выявления погрешности проведём теоретический расчёт нагрузки. Диаметр поршня  $D=13 \text{ см}$  измерялся с помощью штангенциркуля.

Площадь плунжера равна:

$$A_{\text{круга}} = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot 6,5^2 = 132,7 \text{ см}^2. \quad (6)$$

Теоретическая нагрузка равна:

$$N_{\text{теор}} = S_{\text{круга}} \cdot P = 132,7 \cdot 7,5 = 995,25 \text{ кг (9,76 кН)}. \quad (7)$$

Разделим нагрузку, полученную при тарировке домкрата на прессе, на теоретически рассчитанную, и получим разницу измерения  $1000/995,225 = 1,005$  раза. Таким образом, получаем погрешность измерения домкратом равную 0,5 %, что является достаточно хорошим результатом.

## Проверочные испытания болтов на растяжение до разрушения



Рис. 3.6. Вид шпилек после разрыва

В опытной конструкции усиления консолей колонн применялось высокотехнологичное болтовое соединение. Шпильки длиной  $L=1000$  мм с метрической нарезкой М12 мм, разрезанной под необходимый размер. Испытание проводилось на прессе с электронным управлением. Испытывалась выборочная партия из 4 шпилек длиной 220 мм и 2 шпильки длиной 500 мм. Шпильки были разорваны при силе 4 т (39,24кН) (рис.3.6).

### 3.5. Исследование изменения напряжений в арматуре моделей консолей с помощью методов тензометрии

#### Общие данные о применяемых тензорезисторах

Для детального исследования на арматуру каркаса были наклеены тензометрические датчики. Тензорезисторы выполнены из константановой проволоки на бумажной основе с базой 20 мм (сопротивление  $R=201,4$  Ом, коэффициент тензочувствительности  $K=2,19$ ). Соединение тензодатчика с кабелем измерительной станции выполнено с помощью клеммы в пластиковой оболочке через провод типа МГТФ диаметром 0,7 мм. Кабели изготовлены из проводов МГТФ и БПВЛ. Схема расположения тензодатчиков на арматуре консоли показана на рис.3.7. Общее количество датчиков на каждый арматурный каркас модели консоли принято равным 12, которые наклеены в наиболее напряжённых зонах каркаса.

Наклейка датчиков производилась в следующей технологической последовательности [19]:

- поверхность арматуры зачищалась наждачной бумагой № 100;
- поверхность промывалась техническим ацетоном [20] до полной очистки;
- кисточкой наносился тонкий слой клея БФ–2 [21] на подготовленную поверхность арматуры и тензорезистор;



- в течение 30–40 секунд клей на поверхности арматуры и тензодатчика подсушивался феном при температуре 100–110 °С;
- наносился следующий слой клея на поверхность арматуры;
- тензодатчики приклеивались к арматуре продольно (соосно);
- на датчик укладывалась полиэтиленовая пленка и прижималась резиновым валиком для удаления излишка клея;
- производилась просушка клея феном в течение 10–15 минут, после чего конструкции досушивались в естественных условиях в течение 3–5 дней.

Для исследования напряжённо-деформированного состояния консоли датчики, приклеенные на арматуру, были гидроизолированы следующим образом:

- выводы датчиков изолированы термоусадочной трубкой диаметром 2 мм, которая при нагревании открытым огнем уменьшается в размере в несколько раз, тем самым отсекая доступ влаги к тензорезистору (рис.3.8А);

- на каждый датчик был нанесен слой силиконового герметика (рис.3.8Б);

- от проникновения влаги каждый тензорезистор защищён изоляционной лентой (рис.3.8В), вследствие чего герметик при обжатии изоляционной лентой расширился и заполнял все пустоты.



Рис. 3.8. Последовательность гидроизоляции тензорезисторов:  
 А – вид проводов, обжатых термоусадочной трубкой;  
 Б – вид датчика, обработанного силиконовым герметиком;  
 В – вид датчика, защищённого изоляционной лентой

### Общие данные о ММТС 64–01, применяемой при проведении эксперимента

Для записи данных изменения деформаций с тензорезисторов использовалась «Многоканальная тензометрическая станция ММТС–64.01»



Рис. 3.9. Общий вид тензометрической системы

производства НИИ им. Чаплыгина, г. Новосибирск (рис.3.9).

Микропроцессорная многоканальная тензометрическая система ММТС–64.01 обеспечивает сбор и измерение электрических сигналов с тензодатчиков, наклеенных на рабочую арматуру с целью контроля за упругими деформациями арматурных стержней, работающим в испытываемой конструкции, в дальнейшем относительные деформации регистрируют средствами вычислительной техники. Система ММТС–64.01 обеспечивает измерение по следующим схемам включения датчиков:

- измерение по схеме «1/4 мост»;
- измерение по схеме «термопреобразователь»;
- измерение по схеме «мост»;
- измерение по схеме «1/2 мост».

Тензометрическая система ММТС–64.01 рассчитана на работу в условиях умеренного климата при температурах окружающего воздуха от 10 до 35 °С, относительной влажности воздуха до 80 % при температуре + 25 °С, атмосферном давлении от 84 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм рт. ст.).

Тензометрическая система ММТС–64.01, поставляемая по ТУ–02/2062.01.01, удовлетворяет требованиям ГОСТ 12997–84 в части к ним относящимся. Программное обеспечение для обслуживания ММТС–64.01 требует для работы операционную систему не ниже Windows XP.

Общий вид таблицы исходных данных представлен на рис.3.10. Для проведения эксперимента в таблицу были введены следующие данные:

- адреса датчиков в системе, начиная с 8-го датчика, т.к. подключение кабелей (шлейфов) осуществлялось со второго разъёма;
- диапазон, характерный для этого типа датчиков (высчитывается автоматически);
- коэффициент тензочувствительности равный 2,19 (из паспорта датчика);
- модуль упругости для стали 206000МПа (21000 кг/мм<sup>2</sup>);
- коэффициент Пуассона для стали, равный 0,3;



Версия	Текст	Просмотр	Эксперимент	Тестирование	Окно	Файл	Редактирование														
1 М=0 А=8	8	2Диапазон	3Программа	4Ктензор	5Материал	6Модуль упр	7Тип	8Подключен	9Компенсат	10КПусассон	11Хдатч	12Удатч	13Хдан	14Уд	15В	16В	17К	18Смещени	19Номинал	20Рядочки	21Кусилени
2 М=0 А=9	9	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	1	2574	
3 М=0 А=10	10	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	2	2574	
4 М=0 А=11	11	253	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	3	2574	
5 М=0 А=12	12	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	4	2574	
6 М=0 А=13	13	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	5	2574	
7 М=0 А=14	14	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	6	2574	
8 М=0 А=15	15	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	7	2574	
9 М=0 А=16	16	251	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	8	2574	
10 М=0 А=17	17	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	9	2574	
11 М=0 А=18	18	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	10	2574	
12 М=0 А=19	19	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	11	2574	
13 М=0 А=20	20	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	12	2574	
14 М=0 А=21	21	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	13	2574	
15 М=0 А=22	22	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	14	2574	
16 М=0 А=23	23	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	15	2574	
17 М=0 А=24	24	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	16	2574	
18 М=0 А=25	25	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	17	2574	
19 М=0 А=26	26	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	18	2574	
20 М=0 А=27	27	253	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	19	2574	
21 М=0 А=28	28	253	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	20	2574	
22 М=0 А=29	29	252	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	21	2574	
23 М=0 А=30	30	253	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	22	2574	
24 М=0 А=31	31	253	40	2.19	0	21000	0	1	Тензодатчи	0.33	0	0	0	0	1	1	0	200	23	2574	

Рис. 3.10. Таблица исходных данных

– номинал сопротивления датчиков, равный 200 Ом.

Остальные столбцы таблицы приняты в соответствии с рекомендациями инструкции по эксплуатации [22].

### 3.6. Экспериментальное исследование моделей консолей колонн

#### Последовательность проведения эксперимента

Для проведения эксперимента по доведению консолей колонн до неработоспособного состояния разработана схема испытания. Общая схема установки представлена на рис.3.11–3.12. Стенд представляет собой стальную П-образную раму, нижняя часть которой вмонтирована и жёстко соединена с силовым полом. Анкеровка П-образной рамы осуществлена в ручьях силового пола, окантованного швеллерами.



Рис. 3.11. Вид испытательного стенда сбоку консоли колонны

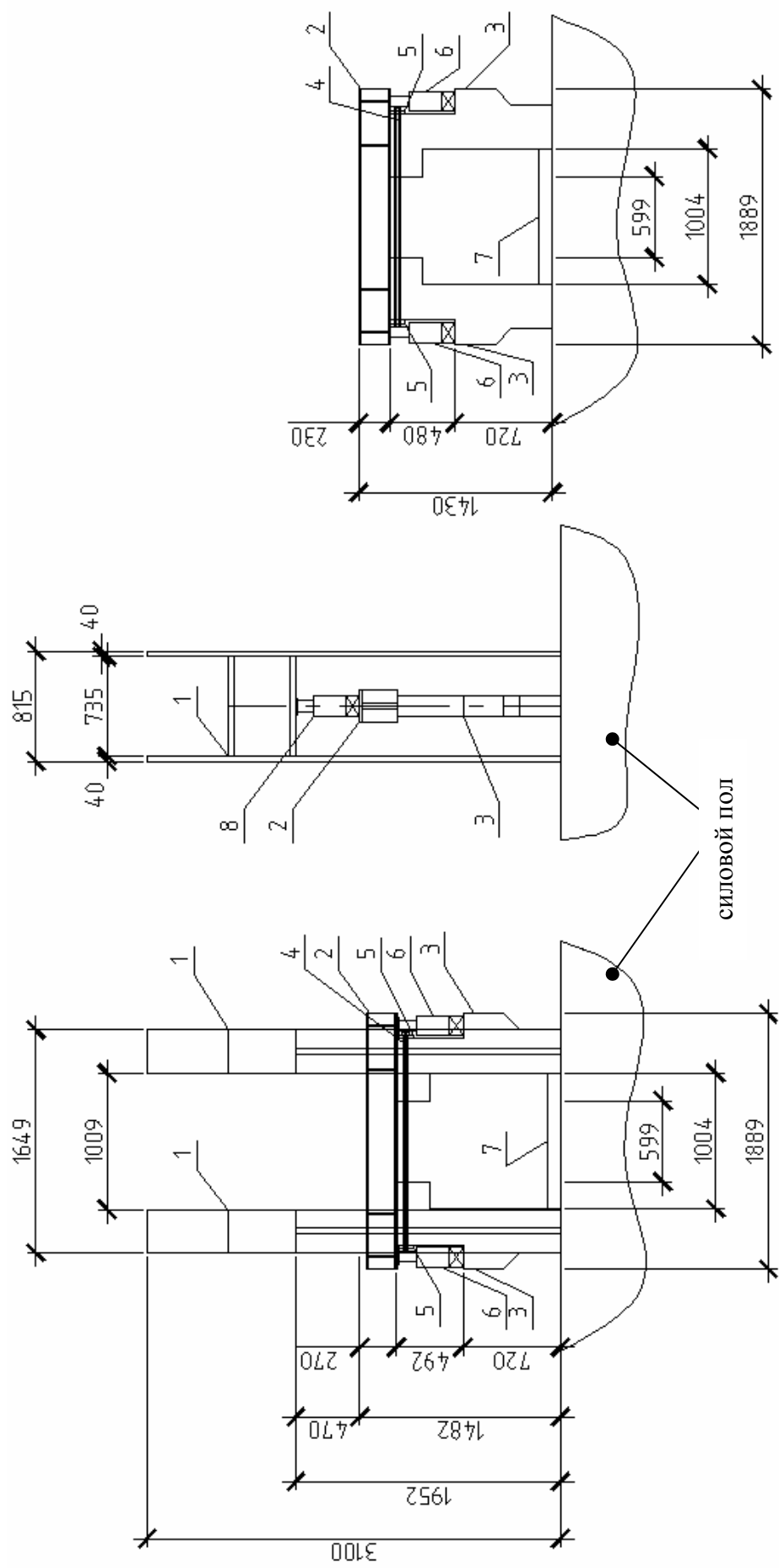


Рис 3.12. Общий вид испытания модели консолей на силовом полу:

- 1 – П-образная рама, жёстко зашцеplённая в силовом полу; 2 – опорная сварная балка; 3 – модели консолей колонны;
- 4 – стальная затяжка, связывающая модели консолей; 5 – опорная деревянная прокладка, предохраняющая бетон от смятия;
- 6 – домкрат ДГ-50; 7 – распорка; 8 – опорный домкрат

Первоначально модели железобетонных консолей были установлены в вертикальном положении, вертикальность проверялась строительным уровнем, после чего на них была установлена сварная опорная балка из двух сваренных между собой швеллеров №27 и усиленных листом стали толщиной 12 мм. Для погашения распора в плоскости колонны в верхней части были связаны между собой затяжкой, сваренной их двух стержней диаметрами 12 мм. Для предотвращения смятия бетона с обеих сторон затяжки были установлены деревянные подкладки. По низу конструкции поставлен распорный брус поперечным сечением 100×100 мм (рис.3.12) и длиной 1000 мм, предотвращающий скольжение моделей консолей по силовому полу.

Были установлены автомобильные гидравлические домкраты. Для того чтобы зафиксировать испытываемые модели в стальной П-образной раме, использовалась пара гидравлических автомобильных домкратов грузоподъемностью 2 т каждый. Автомобильные домкраты ставились по обе стороны от основного гидравлического домкрата грузоподъемностью 50 т, и путём последовательного поддомкрачивания осуществляли фиксацию моделей в проектном положении. Под основным домкратом были уложены подкладки из листовой стали.

Два домкрата ДГ–50 грузоподъемностью 50 т нижней частью опирались на квадратную в сечении опорную площадку размером 10×10 см, что соответствует масштабной ширине подкрановой балки, а верхней частью – в опорную балку. Площадка для опирания домкрата была выложена мокрым песком или листовой резиной (для равномерного распределения нагрузки) по всей площади контакта моделей консолей с поверхностью силового пола.

### Проведение эксперимента

В ходе эксперимента были испытаны две модели консолей колонны с доведением их до полного разрушения. Модели были испытаны на специально разработанном и вышеописанном стенде. Величина расчётной разрушающей силы составила 190 кН (19,4 т). Шаг нагружения определён равным 9,81 кН (1 т) с выдержкой в 3 минуты. За разрушение принят момент времени, когда увеличение показаний на манометре останавливается. Результаты экспериментального исследования модели консоли №1 приведены в табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1

Результаты экспериментального исследования модели консоли №1

Этап нагружения	Разрушения
до 107,91 кН	Образование микротрещин без видимых деформаций
117,72 кН	Образование наклонной трещины в растянутой зоне консоли (длина – 20-25 мм, ширина – 0,1 мм)
166,77кН	Образование вертикальных и горизонтальных трещин по всей высоте сечения консоли (ширина не более 0,1 мм)
176,58 кН	Образование вертикальных и горизонтальных трещин вдоль боковой грани консоли под опорной площадкой (длина – до 30-35 мм, ширина – не более 0,1 мм), раскрытие вертикальных трещин (длина – до 70-75 мм, ширина – до 0,5-0,8 мм)
186,39 кН	Раскрытие вертикальных трещин (длина – 75-120 мм, ширина – 1-1,5 мм)
196,2 кН	Раскрытие вертикальной трещины в четырёх сантиметрах от грани консоли до сжатой наклонной грани (длина – около 300 мм, ширина – 3-4 мм) (рис.4.13)
206,01 кН	Сдвиг бетона по наиболее раскрытой трещине на высоту сечения консоли



Рис. 3.13. Вид 1-й консоли колонны при разрушении

В ходе проведения эксперимента были получены экспериментальные данные с тензометрической системы, которые приведены в табл.1П (приложение). Все данные скорректированы с учётом коэффициента

тарировки 1,06 в сторону завышения. Изменения напряжений в арматуре, полученные измерениями в тензометрических датчиках, представлены на графике (приложение, рис.1П), построенном по данным таблицы (приложение, табл.1П).

Испытание второй модели консоли осуществлялось по такой же схеме, но характер разрушения был другой (табл. 3.2).

Т а б л и ц а 3.2

Результаты экспериментального исследования модели консоли №2

Этап нагружения	Разрушения
до 117,72 кН	Образование микротрещин без видимых деформаций
127,53 кН	Образование трещин в растянутой зоне примыкания консоли к вертикальной грани верхней части модели (длина – 25-30 мм, ширина – до 0,1 мм)
137,34 кН	Незначительное раскрытие существующих трещин
147,15 кН	Внезапное обрушение защитного слоя бетона без значительного раскрытия трещин (рис.3.14)

Попытка увеличить силу более 147,15 кН привела к развитию в зоне контакта опорной площадки неравномерного смятия, причём смятие увеличилось у передней грани консоли (см. рис.3.14). Схема расположения датчиков представлена на рис. 3.15. Данные тензометрической системы представлены в приложении (табл.2П, рис.2П).



Рис. 3.14. Трещины в бетоне при нагрузке 147,15 кН (15 т)

Таким образом, разрушающая сила для первой и второй моделей составила 206,01 кН (21 т) и 147,15 кН (15 т) соответственно. Максимальные

растягивающие напряжения возникли в рабочей арматуре консоли в зоне датчиков 6 и 7 (165 МПа для модели №1 и 100 МПа для модели №2), а сжимающие – в рабочей арматуре консоли в месте, где она параллельна наклонной грани (65 МПа для модели №1 и 40 МПа для модели №2), в зоне датчиков 2 и 4.

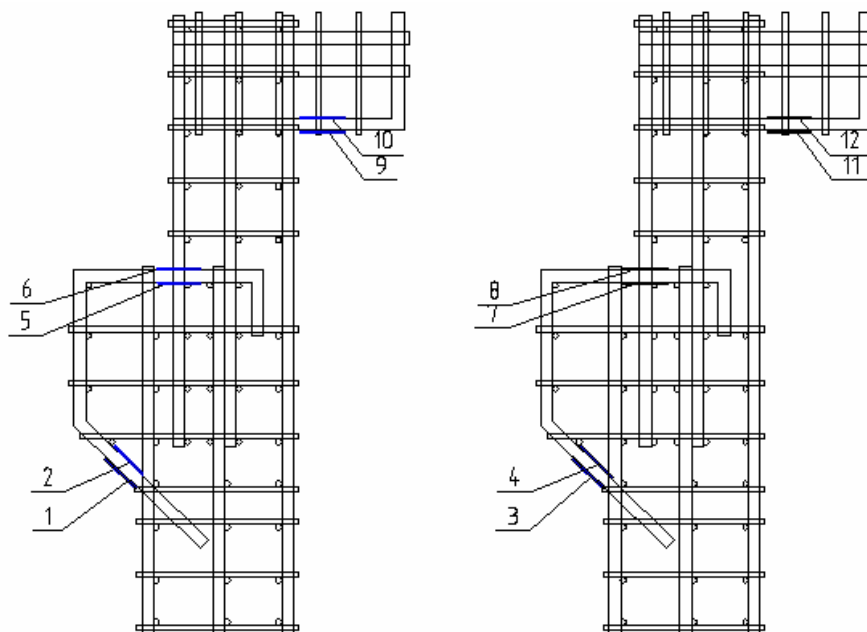


Рис. 3.15. Схема расположения датчиков:  
1...12 – порядковый номер датчика

### 3.7. Испытание при восстановлении работоспособности моделей консолей колонн балансирными устройствами

Экспериментальные уменьшенные модели балансирных устройств.  
Принципиальная схема работы балансирных устройств

Для проведения эксперимента по усилению консоли разработаны и изготовлены две опытные модели из малоуглеродистой стали ВСтЗсп5. Конструкция усиления состоит из рычагов управления, центратора и составной опорной балки. Рычаги и центратор выполнены из двух соединённых сваркой друг с другом швеллеров №8П, опорная балка из швеллеров №5П. Основные элементы конструкции представлены на рис.3.16–3.17.

Сварные работы выполнялись на заводе «ХИММАШ» согласно требованиям СНиП. Сварка выполнялась полуавтоматом постоянного тока А-573 в среде углеродистого газа с содержанием углекислоты 98 %, с помощью проволоки СВ-08-2Г2С диаметром 4 мм при подаче её со скоростью 453 мм/мин и напряжением 32...35В. Сварка осуществлялась в указанном режиме профессиональным сварщиком.

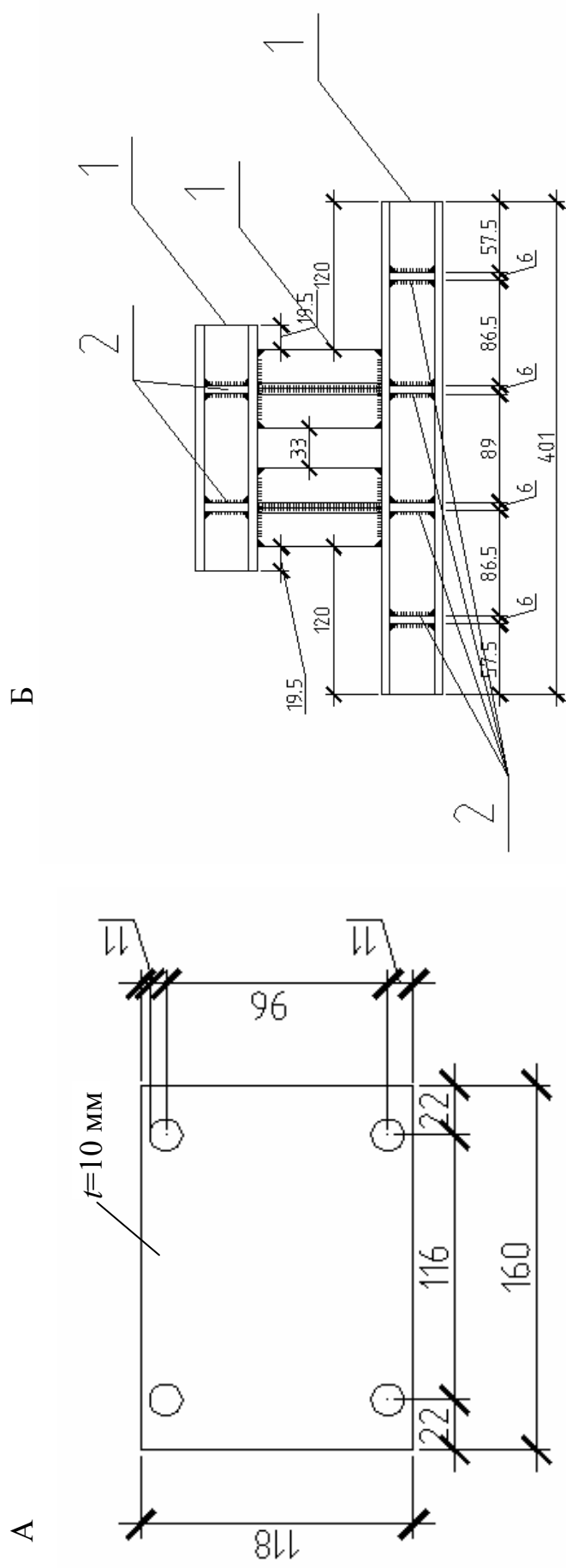
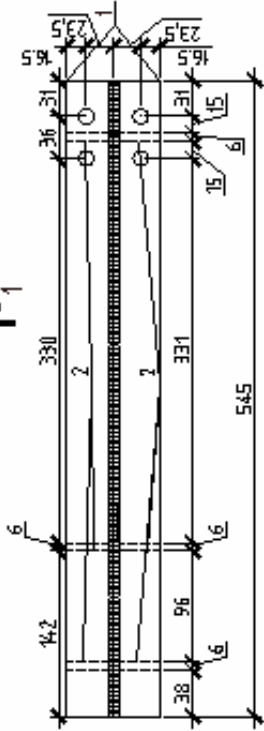
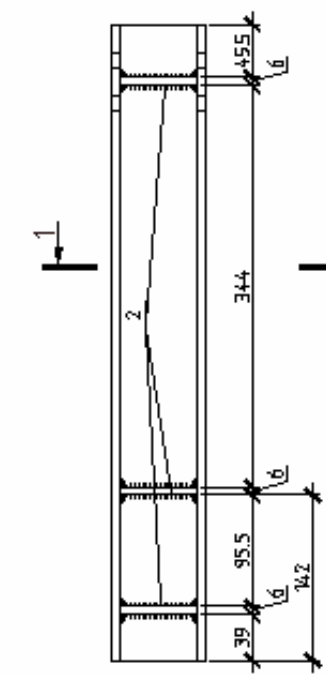
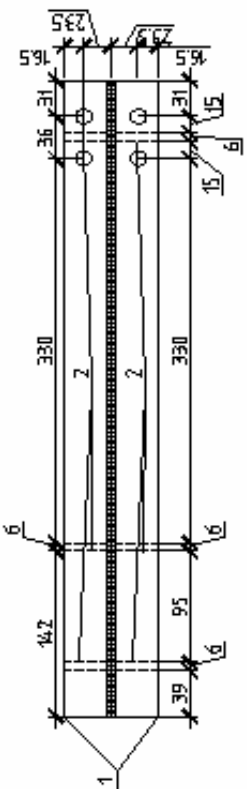


Рис. 3.16. Основные элементы балансирующего устройства:  
 А – опорная шайба для тяжёлой подвески; Б – опорная балка в сборе с тыльной стороны консоли;  
 (1 – двутавр, сваренный из швеллеров, 2 – рёбра жёсткости)



РЫЧАГИ УПРАВЛЕНИЯ



ЦЕНТРАТОР

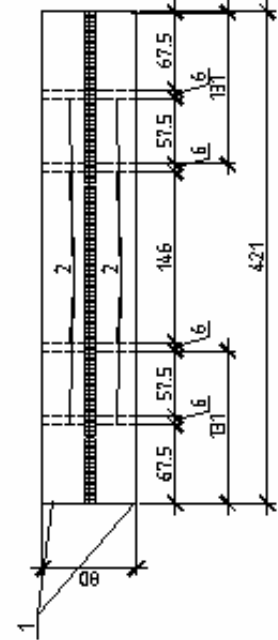
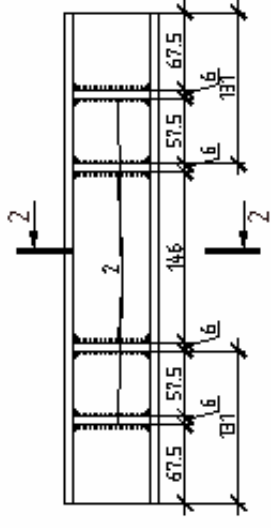
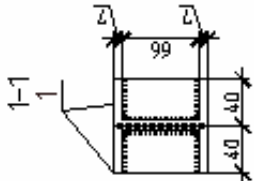
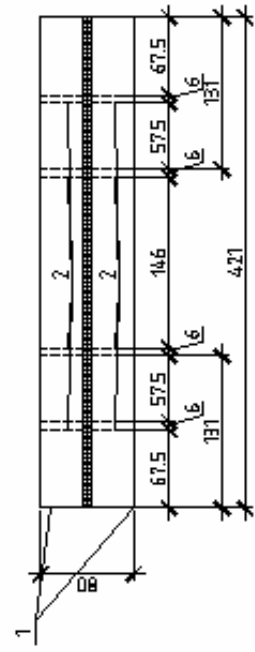


Рис. 3.17. Общий вид элементов балансирующего устройства (рычаги управления и центратор):  
1 – сваренные между собой швеллеры; 2 – рёбра жёсткости

Модели для испытания получены следующим образом (рис.3.18):

- 1) по предоставленным размерам были нарезаны швеллеры и пластины для изготовления элементов конструкции;
- 2) швеллеры были сварены между собой и в необходимых местах добавлены рёбра жёсткости;
- 3) на сверлильном станке были выполнены все необходимые отверстия для болтов диаметром 12 мм;
- 4) в лаборатории ПГУАС была произведена сборка конструкций с балансируемыми устройствами на болтах.

Соединение рычагов с центратором и рычагов с опорной балкой выполнено на болтах через опорные пластины, что повышает технологичность монтажа и простоту изготовления. Соединение рычагов управления и опорной балки выполнено на болтах.

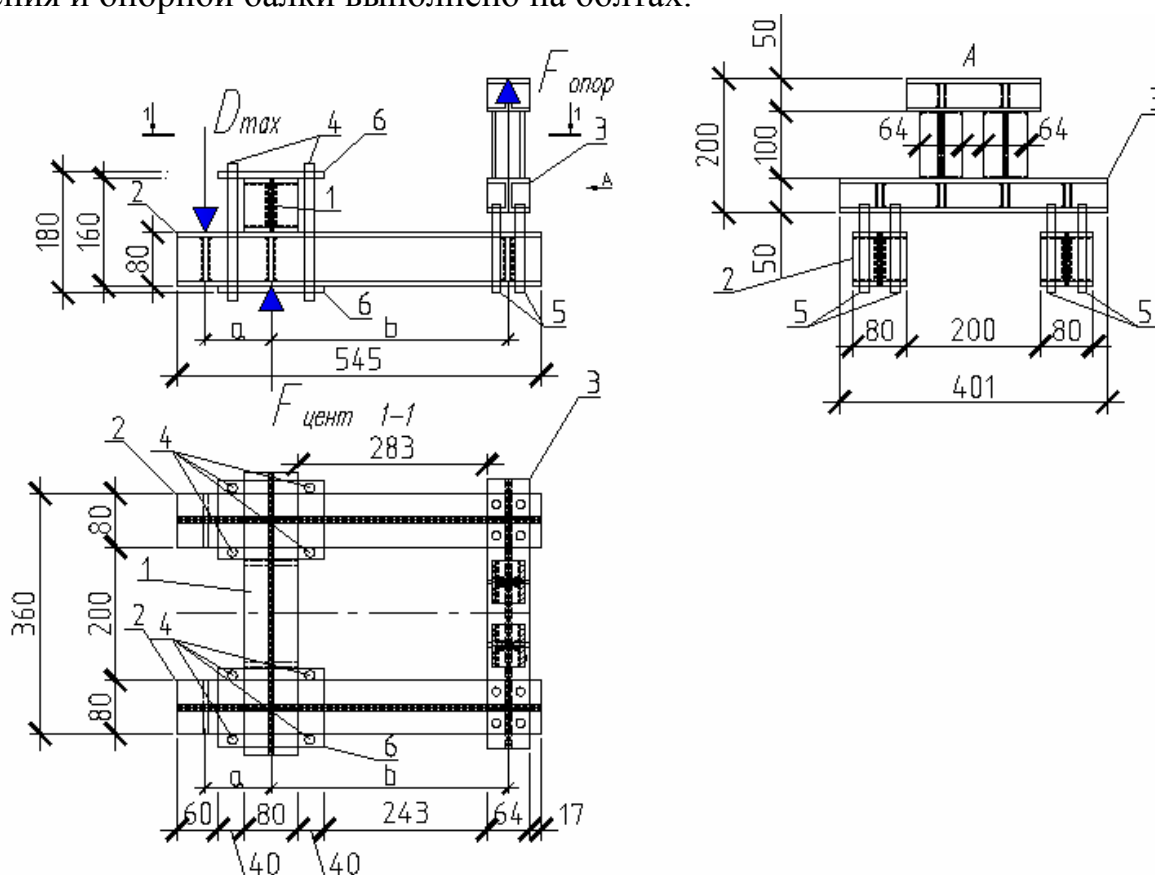


Рис. 3.18. Балансирное устройство в сборке:

- 1– центратор; 2– пара рычагов управления; 3– задняя опорная балка;  
4,5–тяги; 6–опорные шайбы

Принцип полной разгрузки аварийной консоли от воздействия  $D_{\max}$  и  $M_{\max}$  заключается в том, что при воздействии опорной реакции на короткую часть рычага управления  $a$  (рис.3.18) конструкция стремится повернуться вокруг опорного центратора, который установлен вблизи центра тяжести около грани верхней части колонны. При этом часть нагрузки передаётся через длинную часть рычагов  $b$  и балку составного

сечения в железобетонную балку перекрытия, которая находится с противоположной стороны от консоли колонны. В это время на консоль колонны через короткую часть рычагов управления  $a$  и опорный центратор передаётся основная сила, при этом уменьшается эксцентриситет приложения силы со 130 до 40 мм, т.е. более чем в 3 раза по сравнению с работой консоли колонны до усиления. Надо учесть, что при таком способе усиления опорная реакция от центратора возрастает, по сравнению с неусиленной консолью, на 15–20 % и равна  $D_{\max} +$  опорная реакция задней опорной балки. Схема работы конструкции до и после усиления представлена на рис.3.19.

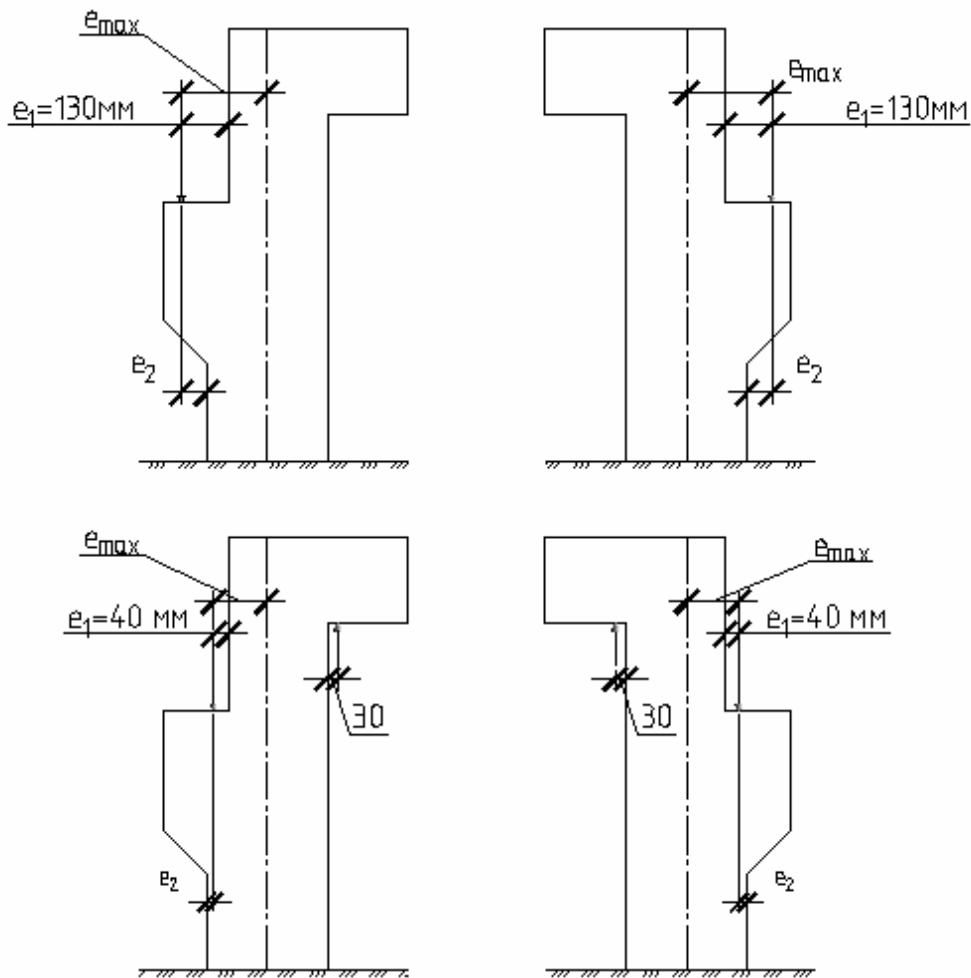


Рис. 3.19. Схема работы опытной конструкции:  
 $D_{\max}$  – опорная реакция от подкрановой балки;  $e_{\max}$  – максимальный эксцентриситет;  $e_1$  – эксцентриситет от точки приложения силы  $D_{\max}$  до оси нижней части колонны;  $e_2$  – эксцентриситет от точки приложения силы  $D_{\max}$  до внутренней грани верхней части колонны после усиления;  
 $F$  – опорная реакция задней опорной балки

### Схема наклейки тензорезисторов на балансирные устройства

Для исследования напряжённого состояния балансирных устройств так же, как и на арматуру консоли, были наклеены тензорезисторы. Основные характеристики тензорезисторов приняты идентичными тем, что наклеены на арматуру. Провода приняты идентичными. Схема наклейки тензорезисторов показана на рис.3.20.

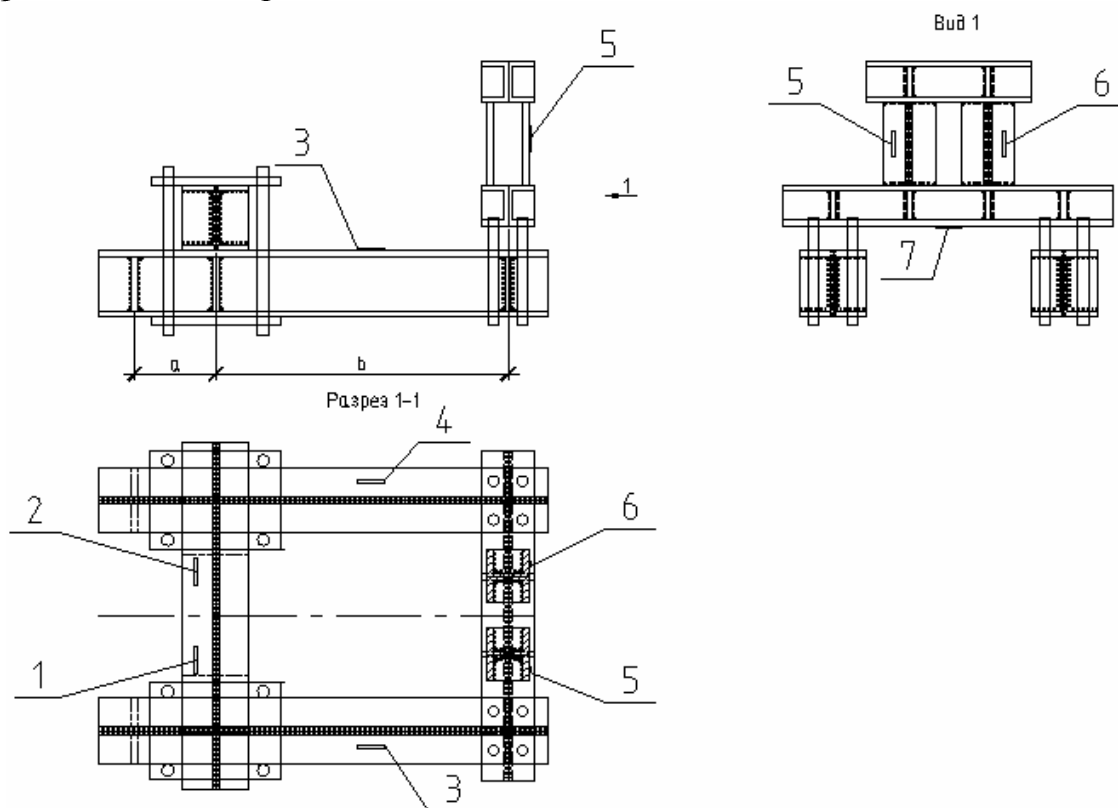


Рис. 3.20. Контрольная сборка со схемой наклейки тензорезисторов на образцы усиления:  
1...7 – порядковый номер тензорезистора

### Испытание моделей балансирных устройств, полностью разгружающих аварийные консоли

При испытании этапы нагружения определены равными 9,81 кН (1 т) с выдержкой в 3 минуты. За разрушение принят момент времени, когда показания манометра останавливаются. На рис. 3.21 показан общий вид модели балансирного устройства при испытании. Результаты испытаний первой модели балансирного устройства приведены в табл. 3.3.

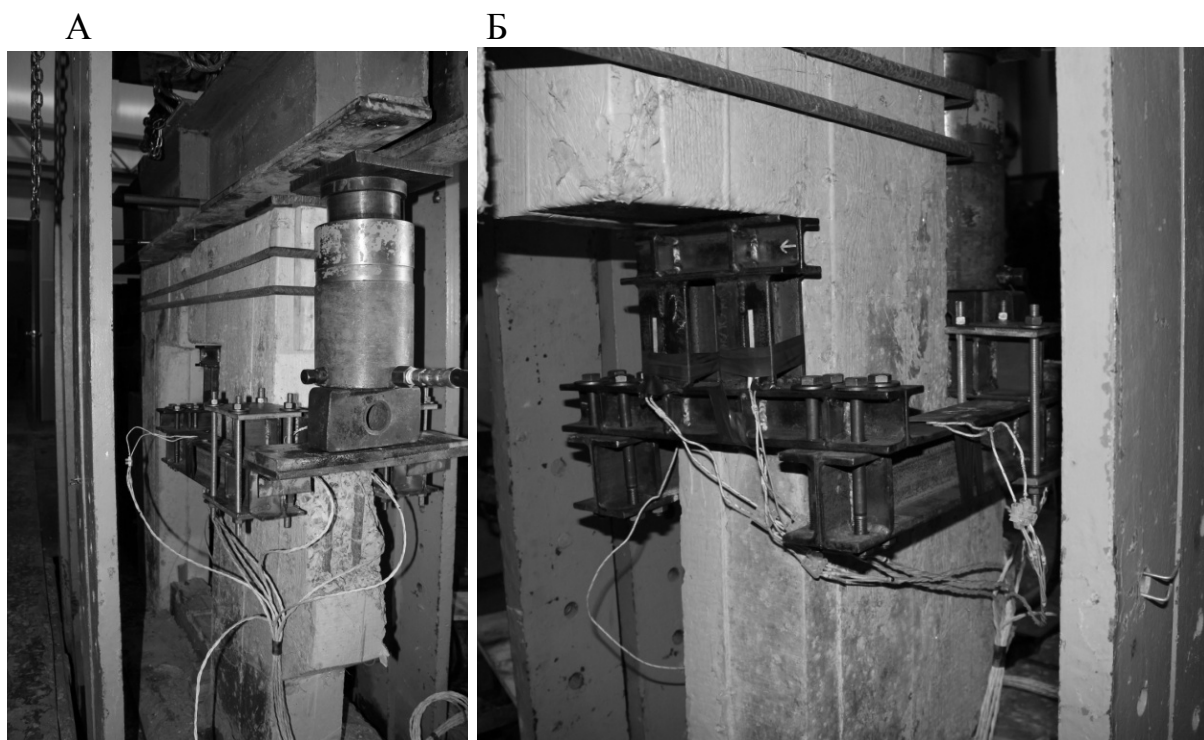


Рис. 3.21. Общий вид модели балансирующего устройства при испытании:  
 А – вид со стороны консоли; Б – вид с тыльной стороны

Т а б л и ц а 3.3

Результаты испытаний модели №1 балансирующего устройства

Этап нагружения	Разрушения
127,53 кН	Смятие бетона под центратором, изгиб опорных шайб
176,58 кН	обрушение защитного слоя бетона вдоль боковой грани консоли колонны
196,2 кН	Существенное смятие защитного слоя под опорной частью центратора, небольшой изгиб балки центратора и общий поворот его конструкции, трещины в растянутой зоне консоли (ширина до 0,4 мм)
206,01 кН – 225,63 кН	Увеличение общего поворота центратора, смятие защитного слоя бетона под центратором, увеличение числа мелких трещин на боковой части консоли
235,44 кН	Значительное отклонение модели консоли колонны по вертикали (3 см), существенное смятие бетона консоли под центратором и частичное обрушение защитного слоя с боков колонны (рис.3.22-3.25)

Во время демонтажа конструкции было обнаружено существенное смятие центратора в зоне контакта с бетоном. Имели место как общий изгиб балки центратора, так и локальное смятие его нижней полки. Возникло второе предельное состояние – невозможность нормальной эксплуатации ввиду чрезмерных прогибов и изменения формы конструкции балансирующего устройства. В результате было принято решение об усилении конструкции центратора.

В ходе проведения эксперимента были получены деформации в различных точках балансирующего устройства, измеренные тензорезисторами. Показания датчиков представлены в таблице (приложение, табл.3П) и на графиках (приложение, рис.3–4П). Все данные скорректированы с учётом коэффициента погрешности 1,06, полученного при тарировке.



Рис. 3.22. Отклонение балансирующего устройства от модели консоли



Рис. 3.23. Общий вид смятия бетона и полки центратора в зоне контакта



Рис. 3.24. Общий вид модели консоли после испытания

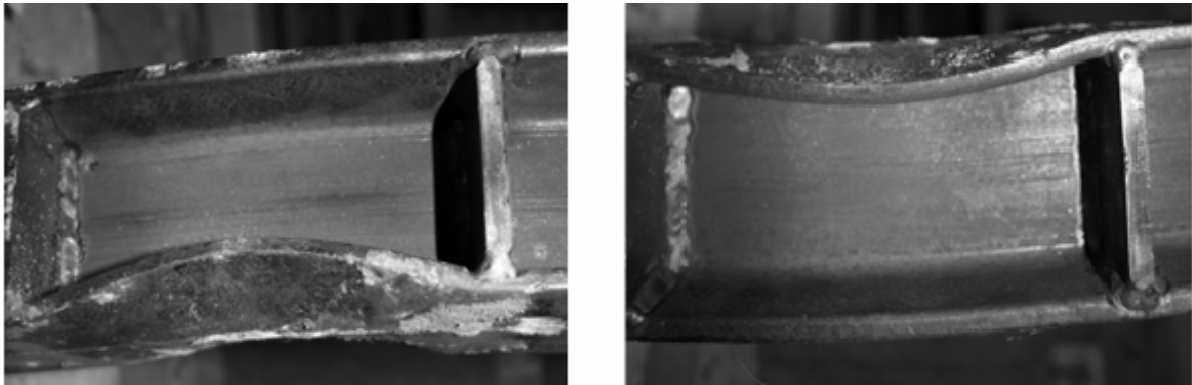


Рис. 3.25. Смятие полки центратора в зоне контакта с бетоном консоли

По такой же схеме испытывалась и вторая модель консоли колонны. Для большей жёсткости центратор в середине его длины превращён в коробчатый стержень путём приварки дополнительных пластин с боков толщиной 8 мм и шириной 66 мм в соответствии с высотой сечения центратора (рис.3.26). Результаты испытаний второй модели балансирного устройства приведены в табл. 3.4.

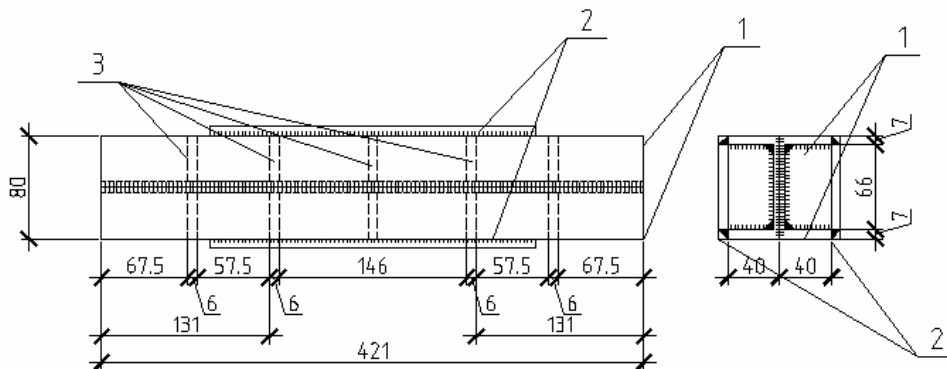


Рис. 3.26. Общий вид усиленного центратора:  
1 – сваренные между собой швеллеры; 2 – усиливающие пластины;  
3 – рёбра жёсткости

Таблица 3.4

## Результаты испытаний модели №2 балансирующего устройства

Этап нагружения	Разрушения
147,15 кН	Образование трещин (ширина – 0,1 мм) вдоль боковых граней консоли, изгиб опорных шайб (не более 1 мм), с помощью которых через шпильки к центратору подвешены рычаги управления
156,96 кН	Погиби шпилек вследствие изгиба шайб
166,77 кН – 176,56 кН	Образование трещин в защитном слое бетона консоли под центратором
186,39 кН	Увеличение изгиба центратора (1–1,5 мм)
196,2 кН	Отслоение бетона с боковых граней консоли, замена одного из болтов (разрушение соединения рычага и центратора произошло в виде среза витков резьбы) вследствие отсутствия контргаек, добавление контргаек на все болты
215,82 кН – 225,63 кН	Раскрытие трещин в защитном слое бетона по бокам колонны (1,5–2 мм)
235,44 кН	Раскрытие трещин в защитном слое бетона по бокам колонны (3–4 мм), изгиб опорных шайб (3–4 мм)
245,25 кН	Осадка рычагов управления относительно друг друга на 5 мм
255,06 кН – 264,87 кН	Общий поворот балансирующего устройства на 1–2 мм, существенные погибы верхних шайб и шпилек (рис.3.27)
274,68 кН	Изгиб центратора (2–3 мм), смятие бетона под центратором
284,49 кН	Изгиб опорной балки (рис.3.28)
294,3 кН	Образование трещин вдоль рабочей арматуры консоли от центратора (длина 4–6 см, ширина – 0,1–0,3 мм), увеличение осадки рычагов
304,11 кН	Вертикальные трещины вдоль рабочей арматуры (длина – 12–15 см, ширина – 0,4–0,5 мм) (рис.3.29-3.31)



Рис. 3.27. Погибы опорных шайб и шпилек соединения





Рис. 3.28. Изгиб опорной балки

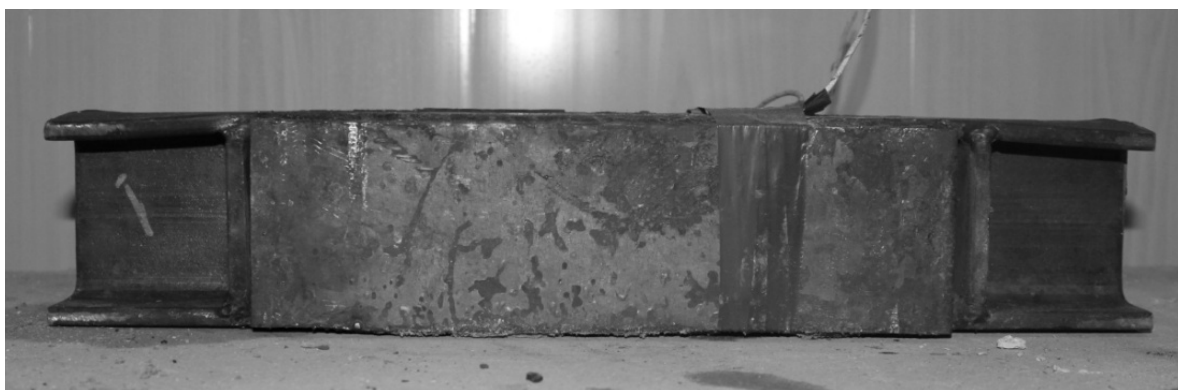


Рис. 3.29. Общий вид центратора после демонтажа



Рис. 3.30. Изгиб полков центратора



Рис. 3.31. Общий вид разрушения бетона консоли

За разрушающую принята нагрузка 304,11 кН (31 т), при этом давление по манометру перестало расти. После демонтажа конструкций усиления была обнаружена трещина в растянутой зоне, чуть выше стыка консоли и верхней части колонны. Трещина распространилась на всю ширину колонны и заходила на боковые грани. В ходе проведения эксперимента были получены данные с тензорезисторов. Показания тензорезисторов представлены в таблице (приложение, табл.4П) и на графиках (приложение, рис.5П–6П).

### Результаты эксперимента

В результате проведения эксперимента были получены экспериментальные данные об изменении напряжённо–деформированного состояния балансирных устройств. Наиболее напряжённая зона в балансирных устройствах – центратор, напряжения в котором достигли 202,2 МПа при испытании второй модели консоли. Напряжение в первом случае определить не удалось из-за отказа датчика при силе 166,77 кН. При этом растягивающие напряжения в рабочей арматуре консоли достигли значения 53,3 МПа, что в 4 раза меньше, чем в случае без балансирного устройства. Напряжения, зафиксированные датчиками № 1–4, расположенными на наклонной арматуре, поменяли знак, что объясняется её изгибом. Растягивающие усилия в управляющих рычагах достигли значения в 124,7 МПа. Напряжения сжатия в вертикальных стойках опорной балки с тыльной стороны модели консоли находились в пределах от 70,2 до 152,8 МПа. В горизонтальной части опорной балки растягивающие напряжения достигли значения 118,7 МПа.

Таким образом, при восстановлении работоспособности консолей колонн при помощи балансирных устройств с рычагами управления несущая способность исследуемой модели возросла с 206,01 до 235,44 кН для первой модели и с 147,15 до 304,11 кН – для второй модели, коэффициент усиления составил 1,15 и 2,07 соответственно, что является хорошим результатом. При этом напряжения в арматуре модели консоли существенно уменьшились. После восстановления работоспособности модель консоли имеет повышенный ресурс. Продление эксплуатации увеличено на 20...30 лет с периодическим осмотром балансирных устройств. Балансирные устройства технологичны, просты в изготовлении и при монтаже. Обрушение консолей колонн вместе с подкрановыми балками становится невозможным.

### 3.8. Испытание при восстановлении работоспособности моделей консолей колонн сталетрубобетонными обоймами

#### Подготовка к проведению эксперимента

Суть способа заключается в том, что для восстановления работоспособности была изготовлена стальная обойма, состоящая из пары швеллеров, боковых накладок из листовой стали и соединительных уголков. Монтажные соединения обоймы производилось при помощи сварочного аппарата в следующей технологической последовательности:

- 1) составные элементы были разрезаны и подготовлены к монтажу;
- 2) сделаны треугольные разрезы в полках переднего швеллера со стороны консоли, после чего при помощи прессы путёмгиба в проектных точках ему придана форма консоли колонны;
- 3) поверхность старого бетона была промыта водой до полного насыщения;
- 4) приварены соединительные уголки к одному из торцевых швеллеров;
- 5) передний швеллер с приваренными уголками монтировался на модель консоли колонны, с противоположной стороны монтировался второй швеллер с тыльной её стороны;
- 6) по бокам к обойме последовательно приваривались боковые накладки из листовой стали, замыкающие её по контуру;
- 7) замкнутая обойма устанавливалась в проектное положение при помощи строительного уровня;
- 8) подготавливался мелкозернистый расширяющийся бетон;
- 9) бетон укладывался в полость между обоймой и консолью, после чего конструкция вибрировалась на вибростоле.

Для приготовления мелкозернистого расширяющегося бетона применялась расширяющая добавка РД–Н производства CONSOLIT BARS [23]. Характеристики преднапрягающей добавки представлены в табл. 3.5.

Расширяющая добавка РД–Н представляет собой тонкоизмельчённую смесь, состоящую из алюминатных или сульфоалюминатных и сульфатных компонентов. РД–Н вводится в обычный бездобавочный портландцемент для получения цемента с уникальными специфическими свойствами. Портландцемент с добавкой РД–Н обладает всеми положительными качествами бездобавочного портландцемента и дополнительно обеспечивает в бетонах (растворах):

- полную водонепроницаемость (W10... W20), при этом дополнительной гидроизоляции не требуется;
- исключение усадки и возникновения усадочных трещин;
- повышенную морозостойкость;
- повышенную стойкость бетона к коррозии в агрессивных средах;
- значительное повышение прочности при растяжении.

Т а б л и ц а 3.5

Общие характеристики расширяющейся добавки РД–Н

Цвет	Серый
Удельная поверхность	Не менее 350 м <sup>2</sup> /кг
Массовая доля ангидрида серной кислоты (SO <sub>3</sub> )	Не менее 17,0 и не более 25,0%
Массовая доля оксида алюминия (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Не менее 19,0 и не более 27,0%
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, согласно НРБ–99 (п. 5.3.4), соответствует 1-му классу стр. материалов	Не превышает 370 Бк/кг
<b>Технические характеристики вяжущего, приготовленного из 90 % портландцемента ПЦ400–ДО и 10 % расширяющейся добавки (РД–Н)</b>	
Прочность на сжатие через 28 суток твердения	Не менее 42 МПа
Самонапряжение в возрасте 28 суток	Не менее 2,0 МПа
Линейное напряжение в возрасте 28 суток	Не более 1,5%
Марка по морозостойкости	Не менее F 300
Марка по водонепроницаемости	Не менее W 10

Пропорции соответствуют рекомендациям производителя: расход на 1 м<sup>3</sup> раствора: РД–Н – 80 кг; ПЦ 500–ДО (бездобавочный) – 570 кг; песок (чистый, мытый, с модулем крупности M<sub>кр</sub>=2,0..3,0 и содержанием глинистых включений до 1 %) – 950 кг; вода (чистая) – 250 л. Общий вид трубобетонной обоймы после монтажа её на модель консоли колонны представлен на рис.3.32.

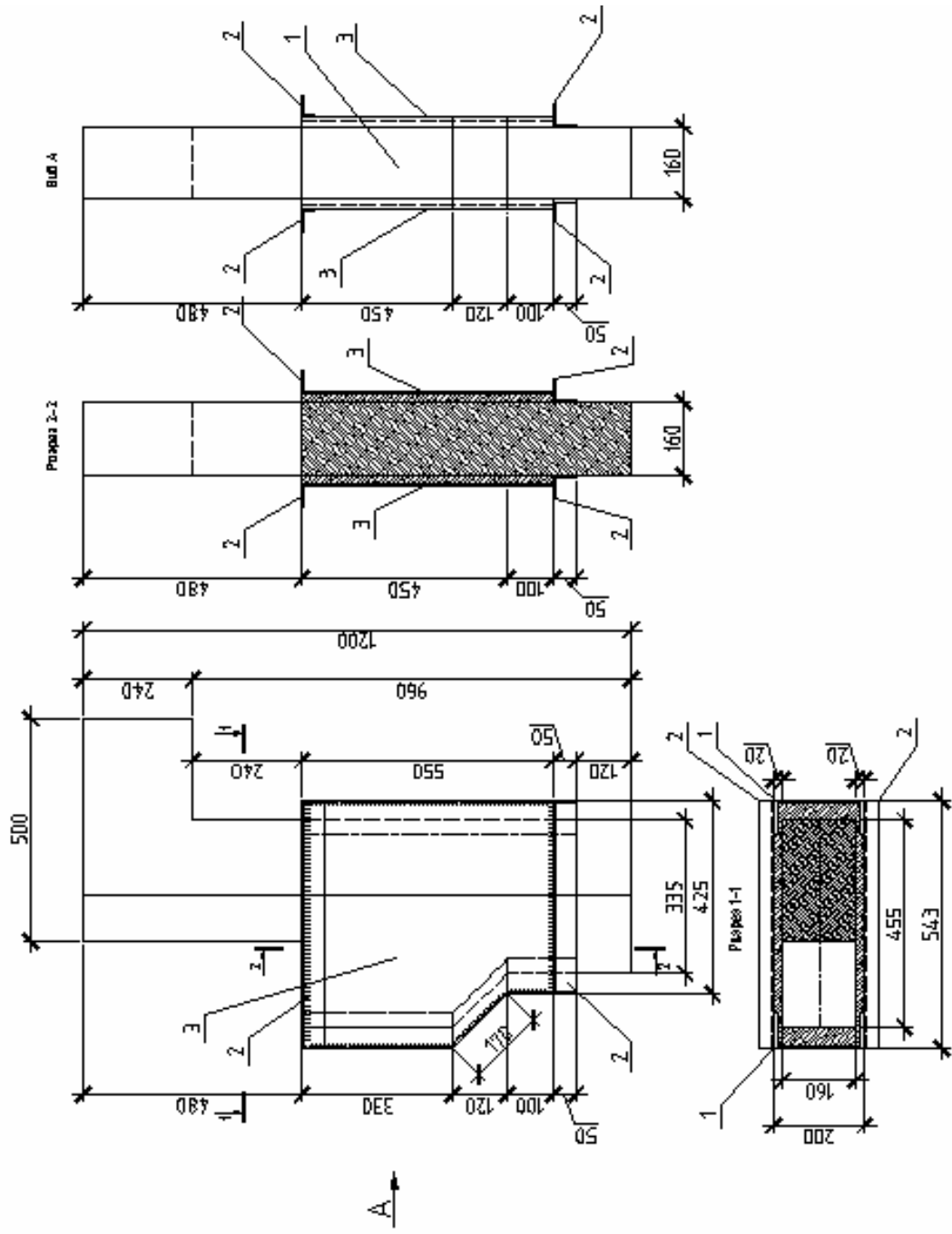


Рис. 3.32. Общий вид сталетрубобетонной облоймы, установленной на модель консоли.  
 1 – торцевые швеллеры; 2 – соединительные уголки; 3 – соединительные накладки из листовой стали

Для исследования напряжённо-деформированного состояния на поверхность облоймы наклеены тензорезисторы. Тензорезисторы выполнены из константановой проволоки на фольговой основе с базой 10 мм (сопротивление  $R=111,5$  Ом, коэффициент тензочувствительности  $K=2,16$ ). Общее количество датчиков на каждой из облойм принято равным 28, которые наклеены в наиболее напряжённых её зонах. Уплотнение расширяющегося бетона, заполняющего всю полость по контуру восстанавливаемой модели консоли, выполнялось вибрированием. Восстановленные модели испытывались поочередно, поэтому после проведения первого эксперимента количество тензорезисторов для второй модели было скорректировано и принято равным 18. Схема расположения тензодатчиков при проведении первого и второго эксперимента показаны на рис. 3.33. В скобках показаны номера датчиков второго образца.

В ходе подготовки эксперимента были проведены тарировочные испытания тензорезисторов, которые показали погрешность в 5 %, что будет учтено при обработке данных путём деления на коэффициент 1,05.

Для проведения эксперимента по разрушению моделей сталетрубо-бетонных консолей колонн схема проведения испытаний была модернизирована. Для большей устойчивости, вследствие возросшего крутящего момента в плоскости колонны, установлены дополнительная наклонная распорка между моделями консолей и гидравлический автомобильный домкрат на зеркальной консоли колонны для повышения устойчивости всей конструкции (рис. 3.34). Распорка выполнена из швеллера №18, нижняя часть распорки упирается в массивный стальной «башмак», а верхней частью через уголки 100×10 в угол зеркальной модели консоли. Общая схема монтажа моделей сталетрубо-бетонных консолей представлена на рис. 3.35-3.36. Нагрузка на конструкцию создаётся с помощью домкратов ДГ-100, работающих от насосной станции. В ходе подготовки эксперимента была проведена тарировка домкратов ДГ-50 на предмет погрешности с помощью прессы с электронным управлением, прошедшие государственную поверку. Коэффициент погрешности равен 1,005. Опираие домкрата на бетон трубобетонной консоли выполнено через сферический шарнир.

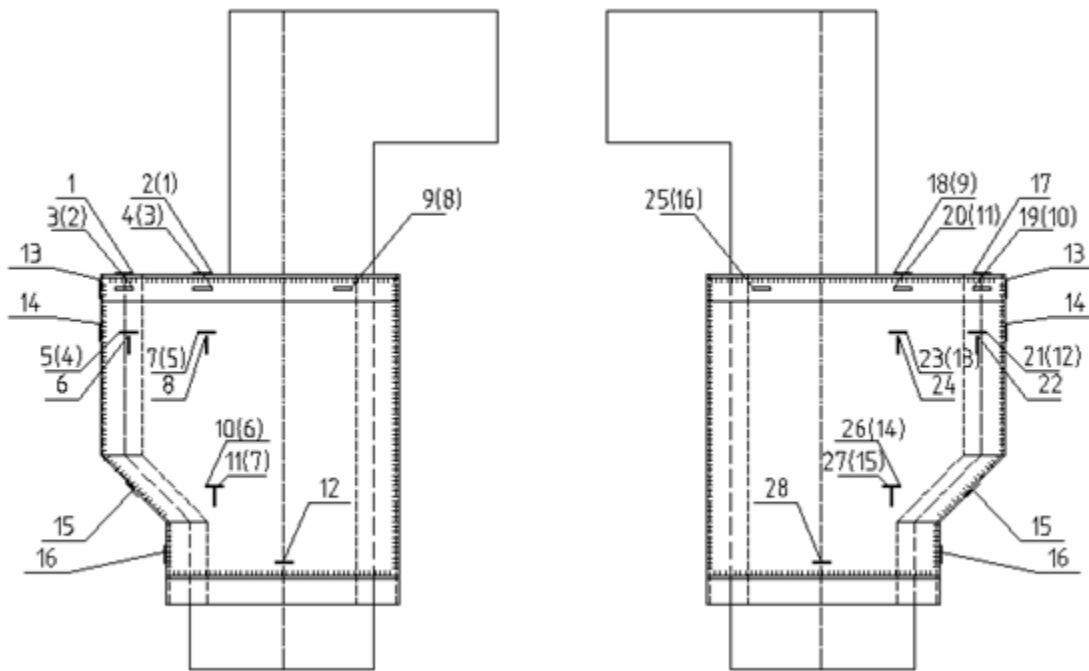


Рис. 3.33. Схема наклейки тензорезисторов  
(в скобках номера датчиков второго испытания)

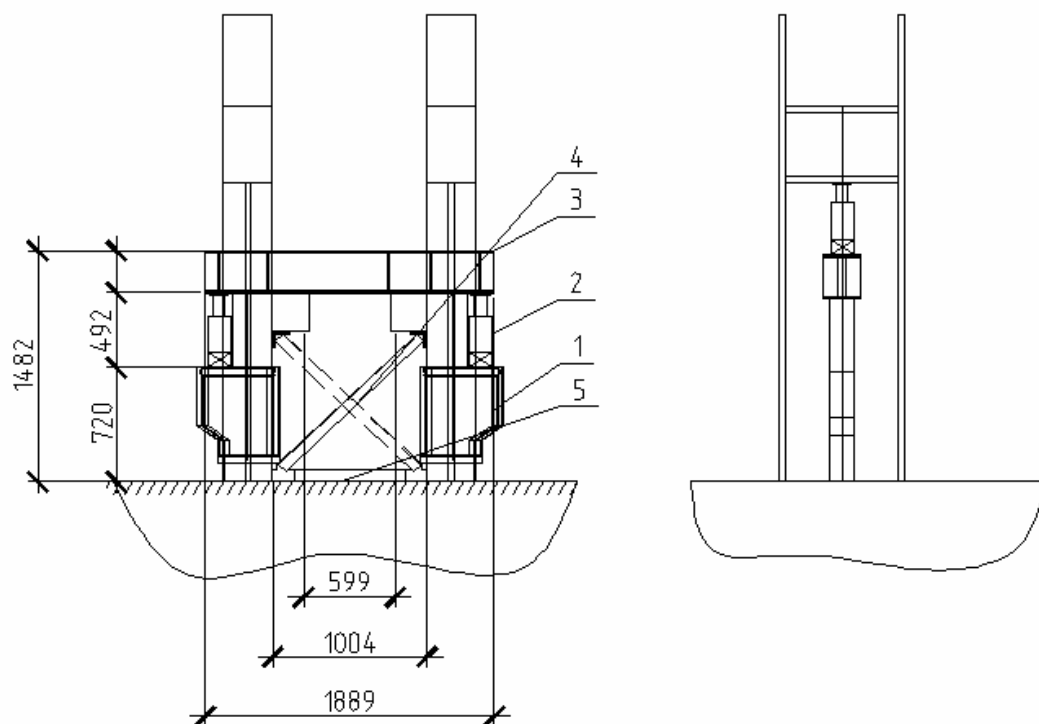


Рис. 3.34. Общий вид моделей консолей после восстановления их работоспособности замкнутыми обоймами, смонтированных на силовом полу:  
1 – сталебетонная модель консоли; 2 – домкрат ДГ-100;  
3 – упорная сварная балка; 4 – крестовая распорка; 5 – распорный брус





Рис. 3.35. Общий вид стенда для испытания



Рис. 3.36. Общий вид конструкции перед испытанием



### Проведение эксперимента

Испытанные до разрушения модели консолей были восстановлены с помощью замкнутых стальных обойм с использованием расширяющегося мелкозернистого бетона. Расширению бетона, при схватывании, препятствовала замкнутая обойма, в результате чего произошло всестороннее обжатие бетона, и возникло предварительное напряжение в каждой из моделей. Результаты испытаний сталетрубобетонных обойм приведены в табл. 3.6.

Т а б л и ц а 3.6

Результаты испытаний модели №2 балансирующего устройства

Этап нагружения для модели		Разрушения
№1	№2	
230 кН	273,99 кН	Смятие бетона на опоре в зоне контакта с силовым полем
245,16– 259,57 кН	317,25 кН	Образование трещин в верхней части модели, расположенных выше консоли на 15-20 см, образование трещин вдоль грани нового и старого бетона по большему размеру колонны (ширина 0,1 мм)
302,83 кН	–	Образование трещины вдоль грани нового и старого бетона по меньшему размеру колонны (ширина 0,1 мм)
317,25 кН	360,52 кН	Существенное смятие защитного слоя на опоре, увеличение количества трещин в верхней части колонны (ширина 0,1 мм)
331,7– 360,52 кН	–	Раскрытие существующих трещин (ширина 0,5-0,8 мм)
374,93–418,2 кН		Увеличение ширины наклонной трещины, расположенной выше консоли на 15-20 см, с раскрытием со стороны консоли (ширина 3-4 мм), сильное смятие бетона в зоне контакта с силовым полем (рис. 3.37)
432,62–462,87 кН		Раскрытие трещин верхней части колонны со стороны консоли (ширина 6-9 см), значительное смятие бетона на опоре (до 4,5 см во внешнем углу колонны) (рис. 3.38-3.39)



Рис. 3.37. Общий вид трещины со стороны консоли при силе 374,93 кН:  
А – вид справа на модель консоли; Б – вид слева

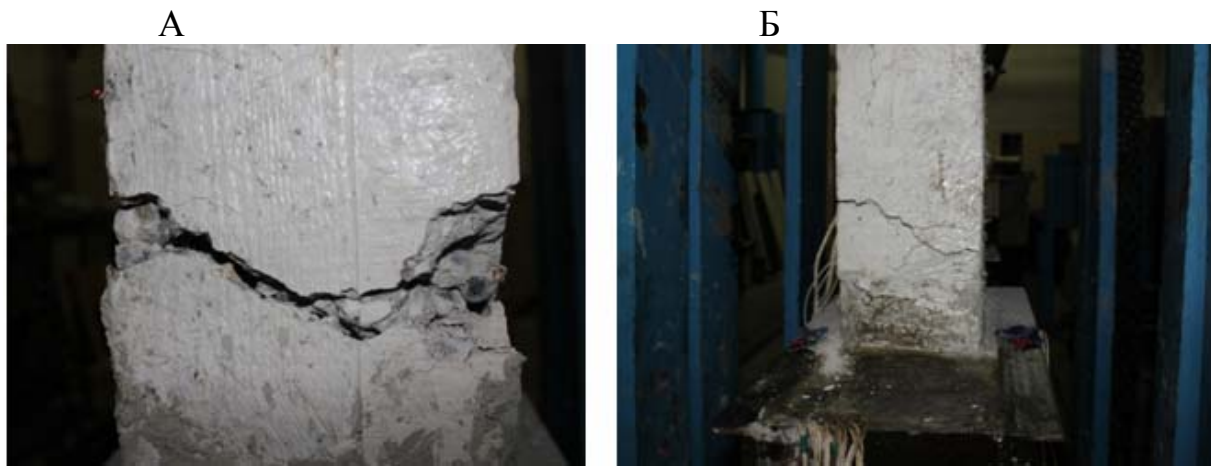


Рис. 3.38. Общий вид трещины при разрушении:  
А – со стороны консоли; Б – с тыльной стороны модели консоли



Рис. 3.39. Общий вид опорной части колонны при разрушении  
в зоне контакта её с силовым полом (вид снизу)

На трубобетонной консоли деформации и повреждения обнаружены не были. Полученные экспериментальные данные для первого образца представлены в таблице (приложение, табл.5П) и на графиках (приложение, рис.7–10П). Показания датчиков для второй модели представлены в таблице (приложение, табл.6П) и на графиках (приложение, рис.11–12П).

### Результаты эксперимента

В результате проведения эксперимента были получены экспериментальные данные об изменении относительных деформаций  $\varepsilon$  и напряжения в зонах наклейки тензорезисторов. Самые напряжённые места обоймы – это верхние соединительные уголки по грани верхней части колонны (датчики № 2, № 18 для модели №1 и №1, №9 для модели №2) напряжения растяжения составили 33,79 МПа, 45,81 МПа и 68,41 МПа, 85,18 МПа соответственно.

Таким образом, способ усиления консоли колонны с использованием предварительно напряжённой сталетрубобетонной обоймы обеспечил увеличение несущей способности исследуемой конструкции с 206,1 до 461,46 кН в первом случае и с 147,15 до 461,46 кН – во втором, коэффициент усиления составил 2,24 и 3,136 соответственно. В ходе анализа данных, полученных при проведении эксперимента, установлено, что напряжения во всех опрашиваемых датчиках несущественны для стальных конструкций. Учитывая характер разрушения и имеющиеся напряжения, можно сказать, что консоль при таком способе усиления становится надёжным элементом каркаса с многократным запасом прочности. Установлена несущая способность моделей колонн №1 – 21 т и модели №2 – 15 т.

Разработаны и изготовлены две модели балансирных устройств. Каждое балансирное устройство состоит из центратора, управляющих рычагов и опорной балки составного сечения. В ходе проведения испытания балансирного устройства установлено, что оно позволяет разгрузить аварийную консоль и передать опорные реакции на стержень колонны с минимальным эксцентриситетом. Коэффициент усиления равен 1,15 и 2,07 (в зависимости от прочности исходной консоли).

Разработаны и изготовлены масштабные конструкции восстановления работоспособности консолей колонн с применением предварительно напряжённых сталетрубобетонных обоек. При испытаниях с использованием предварительно напряжённого сталетрубобетона отмечена его высокая прочность ( $K_y = 2,24$  и  $3,136$  в зависимости от прочности исходной консоли) и высокая надёжность при нагрузках, близких к предельным, для остальных элементов конструкции.

## 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОНСОЛЕЙ КОЛОНН

### 4.1. Общие сведения и исходные данные для моделирования

Использование современных систем автоматизированного инженерного анализа (Computer Aided Engineering – CAE) является на сегодня одним из способов оценки прочности, прогнозирования долговечности, а также оптимизации и технологических процессов производства конструкций. Среди систем автоматизированного инженерного анализа получили применение следующие программные комплексы: SCAD [24], Lira [25], ANSYS [26], NASTRAN [27] и др. Моделирование восстановления работоспособности конструкций осуществлялось с помощью программно-вычислительного комплекса ANSYS. Программа ANSYS является одной из наиболее эффективных CAE-систем, позволяющая получить высокоточные результаты.

ANSYS (ANSYS, Inc) – многоцелевая программа, предназначенная для решения задач механики деформируемого твердого тела, механики жидкости и газа, теплопереноса, электромагнетизма, оптимизации, а также связанных задач механики деформированного твердого тела [28].

Задачами данного численного моделирования являются:

- доказательство правильности проведения физического эксперимента;
- сравнение напряженно-деформированных состояний, полученных при физическом и численном моделировании.

В дальнейшем с использованием этих данных планируется провести ряд экспериментов, в том числе и физических, для выявления качественных зависимостей прочности и деформативности элементов восстановления работоспособности железобетонных консолей колонн.

### Выбор конечных элементов для моделирования бетона

Для моделирования бетонных конструкций принят элемент SOLID65. Данный элемент восьмиузловой, имеющий три степени свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей X, Y и Z узловой системы координат.

Элемент SOLID65 используется для трехмерного (3D) моделирования объёмных тел, имеющих или не имеющих арматуру. Объёмный элемент имеет возможности образования трещин при растяжении и дробления при сжатии. Данный элемент наилучшим образом подходит для моде-

лирования бетонных и железобетонных конструкций. Геометрия, расположение узлов и система координат элемента показаны на рис. 4.1 [29].

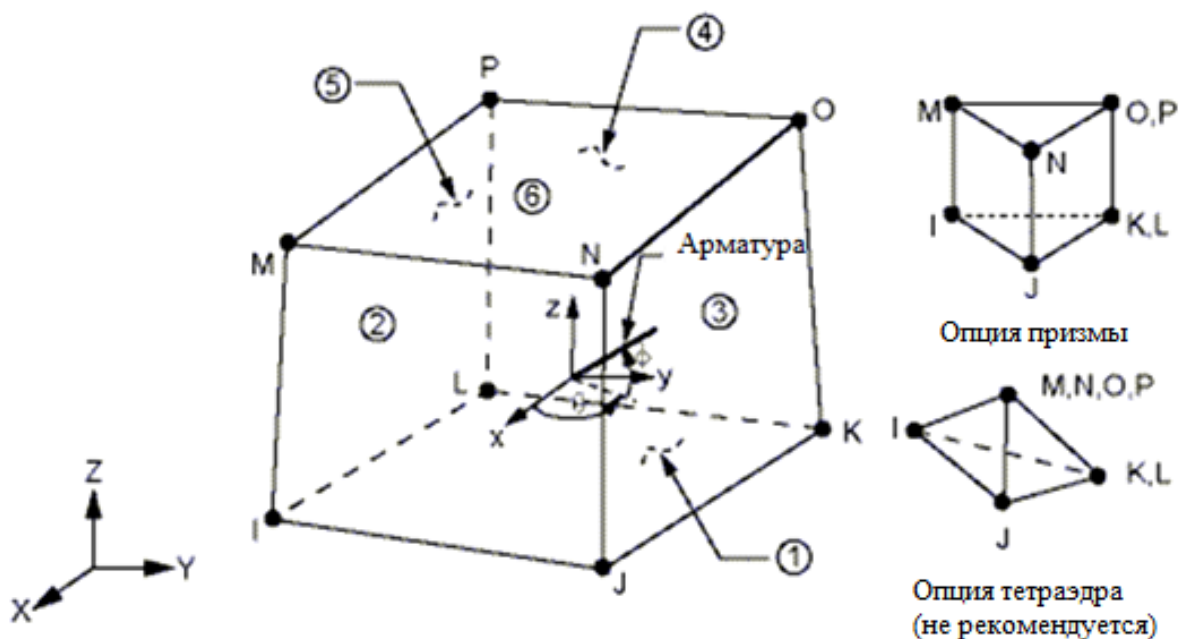


Рис. 4.1. Геометрия и расположение узлов элемента SOLID65

### Выбор конечных элементов для моделирования стальных конструкций

Для моделирования стальных конструкций, а именно балансирных устройств и стальной части стелтрубобетонной обоймы принят элемент SOLID186. Элемент SOLID186 является трехмерным (3D) квадратичным элементом задач МДТТ с двадцатью узлами. Элемент определяется двадцатью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей X, Y и Z узловой системы координат. Элемент может иметь произвольную ориентацию в пространстве. Элемент SOLID186 имеет свойства пластичности, гиперупругости, ползучести, изменения жесткости при приложении нагрузок, больших перемещений и больших деформаций; смешанную формулировку для расчёта почти несжимаемых упруго-пластичных материалов и полностью несжимаемых гиперупругих материалов. Данный элемент за счет наличия промежуточных узлов позволяет оценить НДС конструкции более полно по сравнению с другими элементами (например, SOLID185), поэтому

SOLID186 выбран для моделирования стальных конструкций. Геометрия, расположение узлов и система координат элемента показаны на рис. 4.2.

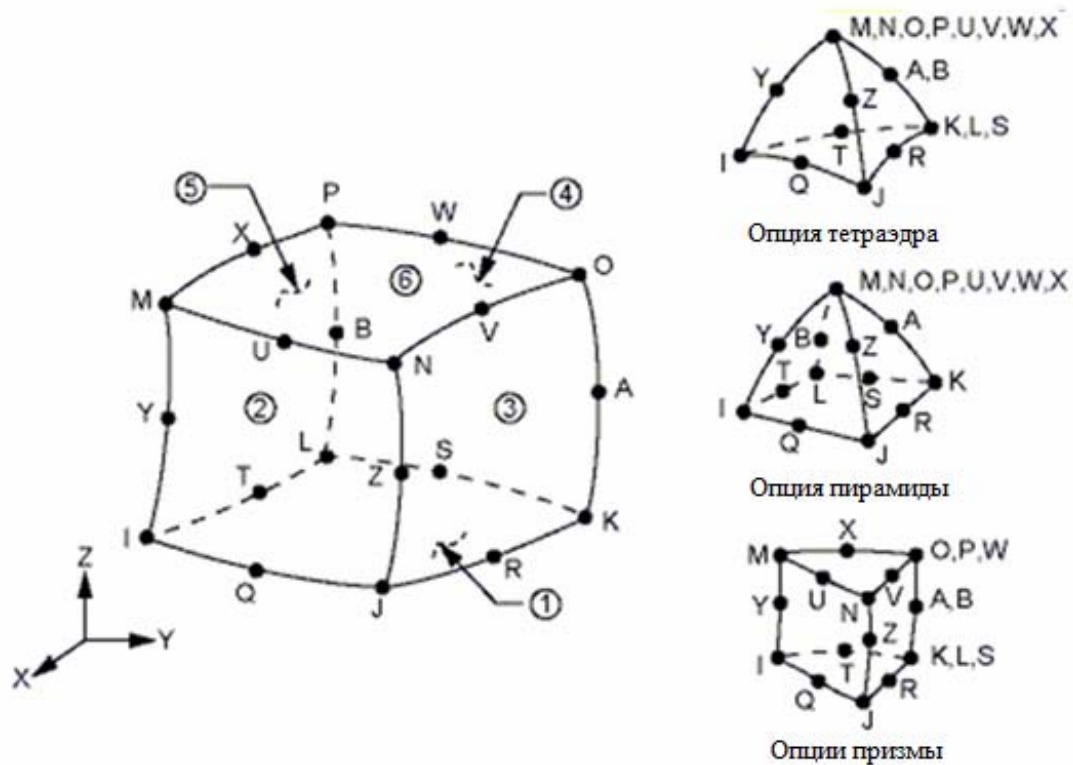


Рис. 4.2. Геометрия и расположение узлов элемента SOLID186

### Выбор конечных элементов для моделирования арматуры

Для моделирования арматуры использовался элемент LINK180. Трёхмерный (3D) элемент LINK180 является стержневым, имеет одну ось, может воспринимать растяжение и сжатие и имеет три степени свободы в каждом узле - перемещения в направлении осей X, Y и Z узловой системы координат. Элемент имеет свойства пластичности, ползучести, вращения, больших перемещений и больших деформаций. По умолчанию элемент LINK180 учитывает увеличение жёсткости при наличии нагрузок при использовании команды NLGEOM,ON. Геометрия, расположение узлов и система координат элемента показаны на рис. 4.3.

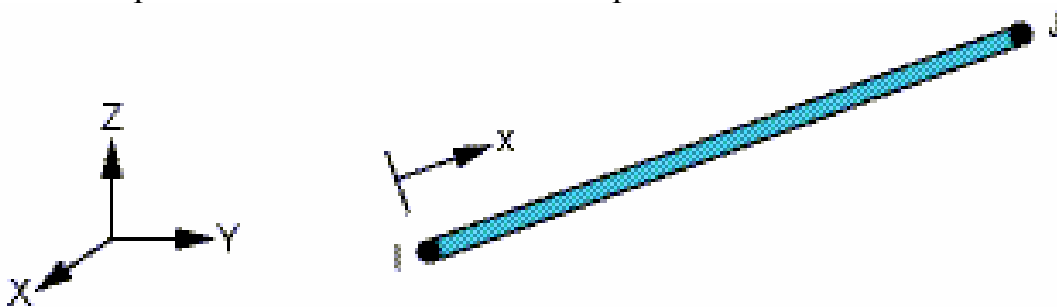


Рис. 4.3. Геометрия и расположение узлов элемента Link 180

## Выбор конечных элементов для решения контактной задачи

В процессе моделирования балансирного устройства и сталетрубобетонной обоймы решались контактные задачи. Для решения контактных задач в модели балансирного устройства использовался расширенный метод Лагранжа, а для сталетрубобетонной обоймы – метод внутренних многоточечных связей.

Для моделирования контактной задачи были выбраны следующие элементы CONTA174 (трехмерный восьмиузловой контактный элемент типа «деформируемая поверхность – деформируемая поверхность») – для моделирования контактной поверхности, TARGE170 – для моделирования целевой поверхности.

При создании контактной пары элементам, как целевой поверхности, так и контактной поверхности назначается один и тот же номер набора геометрических характеристик. Путём использования этих элементов для недеформируемых ответных поверхностей можно моделировать прямые и искривленные двумерные и трехмерные поверхности.

Элемент CONTA174 (рис. 4.4) используется для моделирования контактного взаимодействия и скольжения между трехмерными ответными поверхностями и деформируемой поверхностью. Имеет те же самые геометрические размеры, что и связанные с ним объёмные элементы. Контакт происходит при внедрении контактного узла в элемент ответной поверхности TARGE170, который определяется восемью узлами (прилегающие объёмные элементы имеют промежуточные узлы).

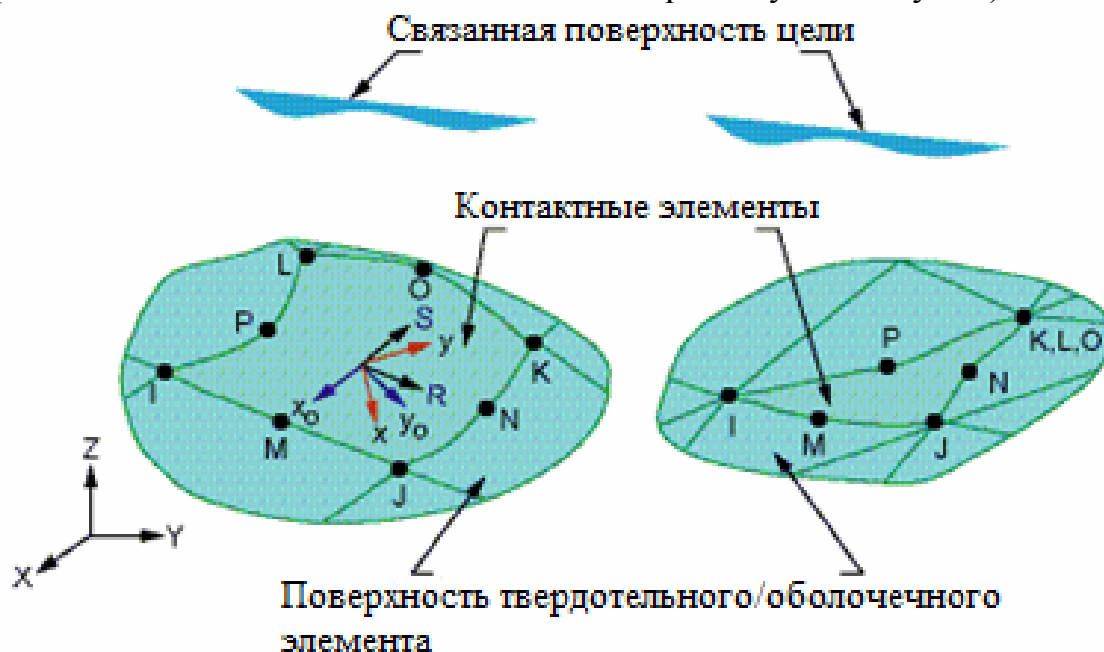


Рис. 4.4. Геометрия и расположение узлов элемента CONTA174

TARGE170 (рис. 4.5) используется для моделирования различных 3-D элементов целевой поверхности для соответствующих контактных элементов (CONTA173, CONTA174, CONTA175, CONTA176, и CONTA177).

**Целевой элемент TARGE170**

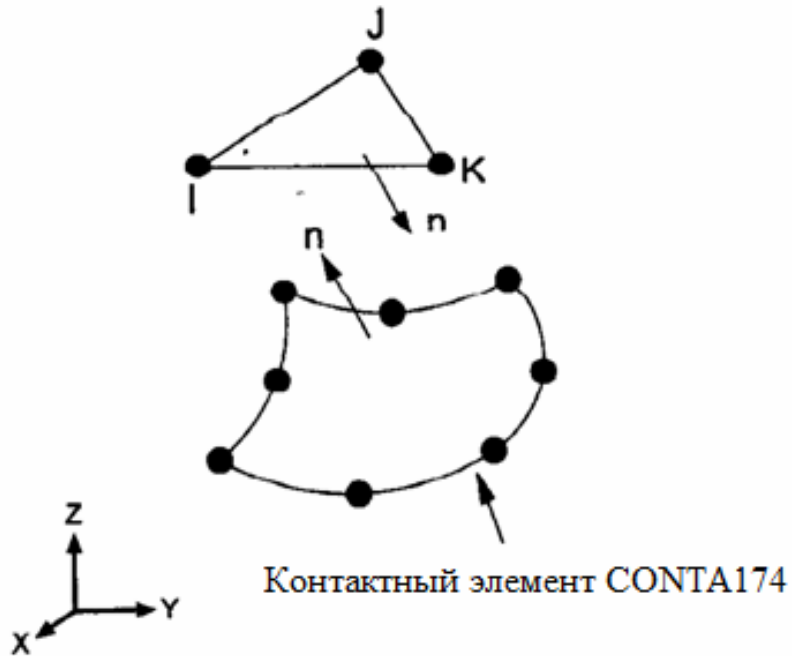


Рис. 4.5. Геометрия и расположение узлов элемента TARGE170

Исходные данные моделирования, определение граничных условий, постановка задачи, выбор решателя

Исходные данные моделирования представлены в табл. 4.1. Постоянные величины для элементов Link180 (арматура) представлены в табл. 4.2.

Т а б л и ц а 4.1

**Исходные данные моделирования**

Материал	Сталь арматуры	Бетон консоли	Сталь балансирующего устройства	Бетон стале-трубобетонной обоймы	Сталь стале-трубобетонной обоймы
1	2	3	4	5	6
Тип конечного элемента	Link180	Solid65	Solid186	Solid65	Solid186
Линейные свойства					
Объёмный вес, кг/м <sup>3</sup> (Density)	7850	2500	7850	2500	7850
Модуль упругости, МПа (Linear Isotropic)	206000	17000	206000	32500	206000



Окончание табл. 4.1

1	2	3	4	5	6
Коэффициент Пуассона (Linear Isotropic)	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3
Нелинейные свойства					
Предел текучести, МПа (Bilinear Isotropic)	240	-	240	-	240
Модуль сдвига, МПа (Bilinear Isotropic)	79000	-	79000	-	79000
Коэффициент передачи нагрузки по раскрытой трещине (Concrete)	-	0,35	-	-	-
Коэффициент передачи нагрузки по закрытой трещине (Concrete)	-	0,75	-	-	-
Осевое растяжение, МПа (Concrete)	-	0,57	-	-	-
Осевое сжатие, МПа (Concrete)	-	6	-	-	-

Таблица 4.2

Постоянные величины для элементов Link 180

Постоянные величины для арматуры	Площадь поперечного сечения, см <sup>2</sup>	Масса, кг
диаметр 20мм	3	2,47
диаметр 12мм	1,131	0,888

Соединение арматуры и бетона производилось через уравнения связей. Конструкция закреплена по верхнему и нижнему граням модели колонны по всем направлениям, имитируя жёсткую заделку (рис. 4.6 –4.7). Нагрузка прикладывалась через функцию «Давление» к области предполагаемого опирания подкрановой балки в размере 13,175 МПа. Приложение нагрузки в размере 0,24 МН (центратор без усиления) и 0,31 МН (усиленный центратор) выполнено с помощью команды Force (сила), область нагружения аналогична физическому эксперименту. Нагрузка на сталетрубобетонную

обойму прикладывалась через функцию «Давление» к области предполагаемого опирания подкрановой балки в размере 29,375 МПа.

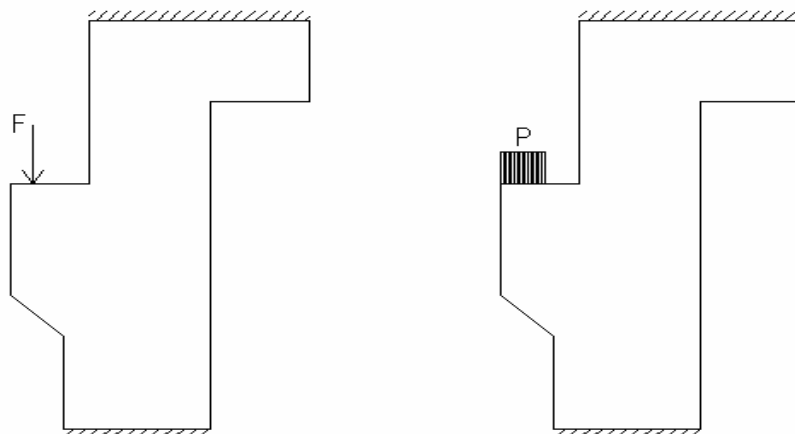


Рис. 4.6. Схема закрепления консолей колонн

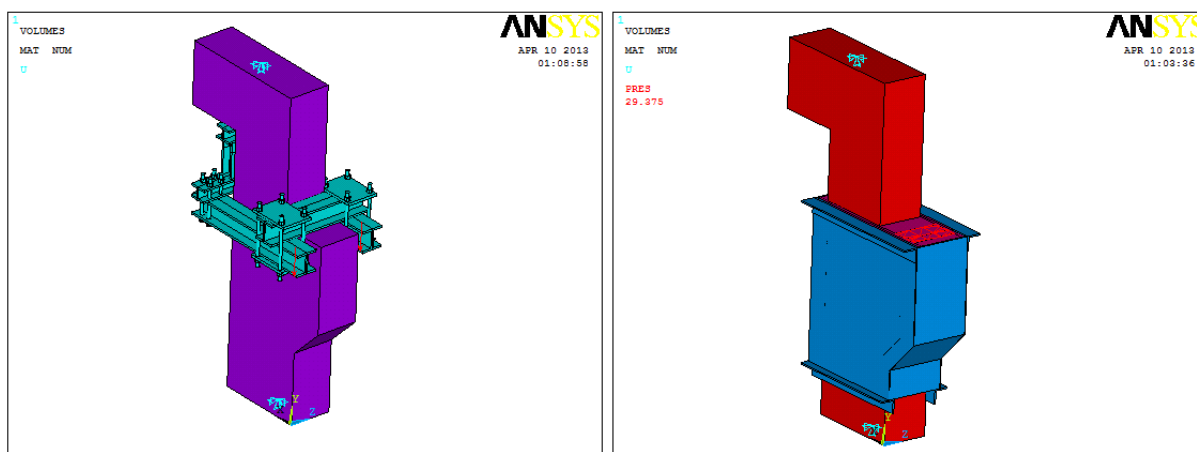


Рис. 4.7. Схема закрепления консолей колонн с конструкциями восстановления работоспособности

Задача для консоли колонны и усиления балансирными устройствами решалась в упруго-пластичной постановке из-за напряжений выше предела пропорциональности по результатам натуральных испытаний. Задача определения НДС для сталебетонной обоймы решалась в упругой постановке, так как напряжения были существенно ниже предела пропорциональности.

В качестве решателя был выбран Sparse direct solver – прямой метод расчёта разреженных матриц. Прямой метод основан на прямом удалении уравнений, в противоположность итерационным методам, в которых решение получается косвенными средствами (итерационным путём). Поскольку прямой способ основан на прямом исключении, он не встречает затруднений при использовании плохо обусловленных матриц [30]. Этот решатель применяется при линейном и нелинейном анализе, для статических и динамических задач, где требуется совместить надёжность результатов с малыми затратами времени. Sparse direct solver выгодно

использовать как при нелинейном анализе, когда статус контактных элементов может менять топологию модели, так и при любом другом анализе, для которого расчетная модель представляет собой разветвленную структуру [31].

### Модели поведения бетона и металла

Для конечно-элементного моделирования поведения бетона в программном комплексе ANSYS используется критерий текучести Вильяма – Варнке, представляющий собой функцию, которая используется для прогнозирования момента разрушения бетона и других фрикционно-связанных материалов, таких как горная порода, грунт и керамика. Этот критерий выражается следующим уравнением

$$f(I_1, J_2, J_3)=0,$$

где  $I_1$  – первый инвариант тензора напряжений Коши;  $J_2, J_3$  – второй и третий инварианты девиаторной составляющей тензора напряжений Коши.

Существуют три характеристики материала ( $\sigma_1$  – сопротивление одноосному сжатию,  $\sigma_2$  – сопротивление одноосному растяжению,  $\sigma_3$  – сопротивление эквивалентному двухосному сжатию), которые должны быть определены до того, как критерий Вильяма – Варнке может быть применен для прогнозирования разрушения (рис.4.8-4.10) [32].

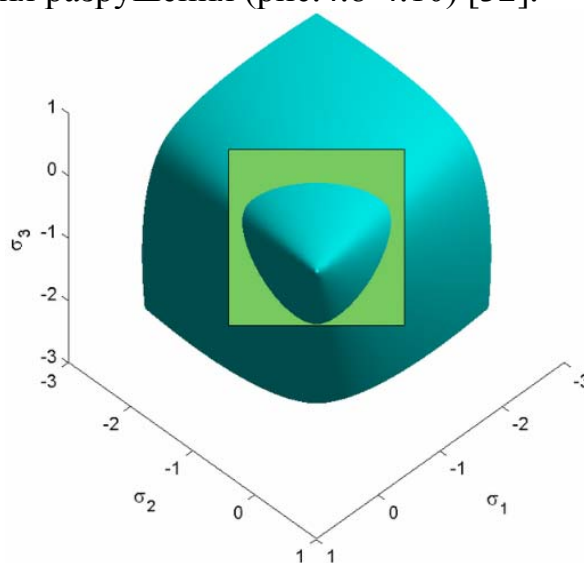


Рис. 4.8. Трехпараметрическая поверхность текучести Вильяма – Варнке

Исходя из значений  $I_1, J_2, J_3$ , критерий текучести Вильяма – Варнке может быть выражен следующим образом

$$f = \sqrt{J_2} + \lambda(J_2, J_3) \left( \frac{F_1}{3} - B \right) = 0,$$

где  $\lambda$  – функция, зависящая от  $J_2, J_3$  и от трех характеристик материала, и  $B$  зависит только характеристик материала.

Функция  $\lambda$  интерпретируется как угол трения, который зависит от угла Лоде ( $\theta$ ).  $B$  интерпретируется как когезионное давление. Поэтому критерий текучести Вильяма – Варнке может быть представлен как комбинация критериев текучести Мора – Кулона и Друкера – Прагера.

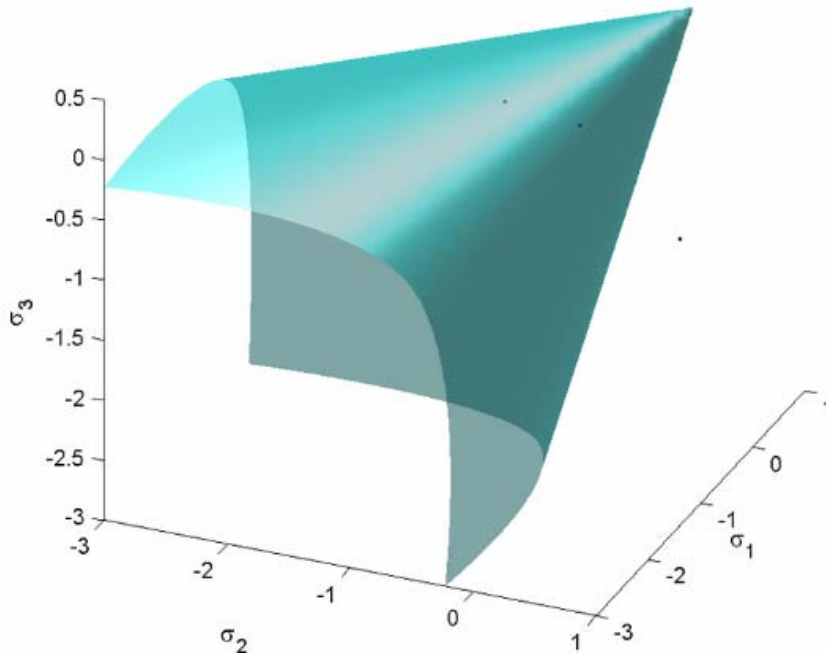


Рис. 4.9. Трехпараметрическая поверхность текучести Вильяма – Варнке по главным напряжениям для  $\sigma_1=1, \sigma_2=0,3, \sigma_3=1,7$

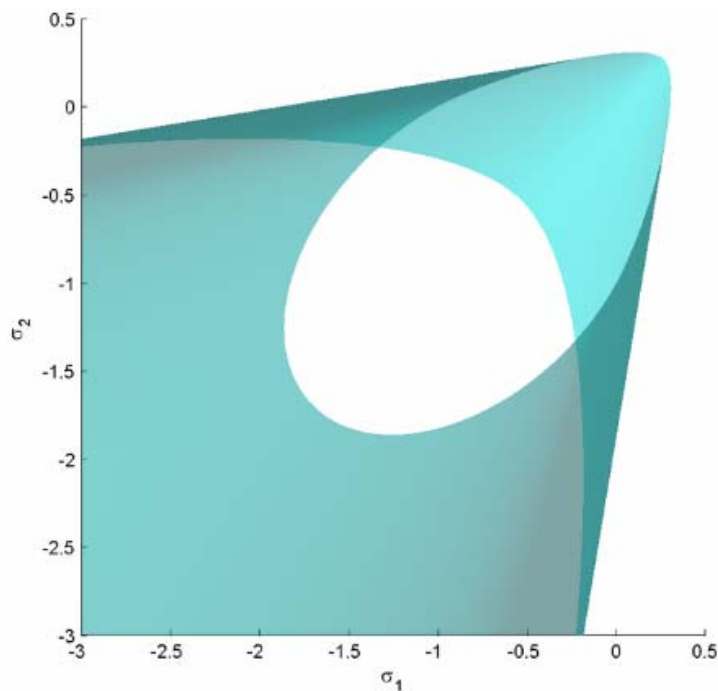


Рис. 4.10. Трехпараметрическая поверхность текучести Вильяма – Варнке в осях  $\sigma_1$ – $\sigma_2$  для  $\sigma_1=1, \sigma_2=0,3, \sigma_3=1,7$

В оригинальной работе трехпараметрический критерий текучести Вильяма – Варнке выражен как

$$f = \frac{1}{3z} \frac{I_1}{\sigma_1} + \sqrt{\frac{2}{5}} \frac{1}{r(\theta)} \frac{\sqrt{J_2}}{\sigma_1} - 1 \leq 0,$$

где  $I_1$  – первый инвариант тензора напряжений;  $J_2$  – второй инвариант девиаторной составляющей тензора напряжений;  $\sigma_c$  – предел текучести при одноосном сжатии, а  $\theta$  – угол Лоде, полученный по формуле

$$\theta = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left( \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_2}{J_2^{3/2}} \right).$$

Точка на границе пересечения поверхности напряжений и девиаторной плоскости напряжений выражается в полярных координатах величиной  $r(\theta)$ , полученной по формуле

$$r(\theta) = \frac{u(\theta) + v(\theta)}{w(\theta)},$$

где  $u(\theta) = 2r_c (r_c^2 - r_t^2) \cos \theta$ .

$$v(\theta) = r_c (2r_t - r_c) \sqrt{4(r_c^2 - r_t^2) \cos^2 \theta + 5r_t^2 - 4r_t r_c},$$

$$w(\theta) = 4(r_c^2 - r_t^2) \cos^2 \theta + (r_c - 2r_t)^2.$$

Величины  $r_c$  и  $r_t$  описывают радиус-векторы для углов  $\theta=0^\circ$ ,  $60^\circ$  и могут быть выражены с помощью  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  как

$$r_c = \sqrt{\frac{6}{5}} \left[ \frac{\sigma_3 \sigma_2}{3\sigma_3 \sigma_2 + \sigma_1 (\sigma_3 - \sigma_2)} \right]; \quad r_t = \sqrt{\frac{6}{5}} \left[ \frac{\sigma_3 \sigma_2}{\sigma_1 (2\sigma_3 + \sigma_2)} \right].$$

Параметр  $z$  в модели выражается следующим образом

$$z = \frac{\sigma_3 \sigma_2}{\sigma_1 (\sigma_3 - \sigma_2)}.$$

Для конечно-элементного моделирования поведения металла в программном комплексе ANSYS используется критерий текучести Мизеса, предполагающий, что текучесть материалов начинается тогда, когда второй девиаторный инвариант напряжения  $J_2$  достигает критического значения. По этой причине его иногда называют  $J_2$  пластичность или теории течения  $J_2$ . Она является частью теории пластичности, которая

более применима для пластичных материалов, таких как металлы. Предполагается, что до момента текучести поведение материала является эластичным [33, 34, 35].

В области материаловедения и инженерии критерий текучести Мизеса может быть также сформулирован исходя из напряжений по Мизесу или эквивалентных растягивающих напряжений,  $\sigma_v$ , скалярного значения напряжений, которые могут быть вычислены из тензора напряжений. В этом случае материал, как говорят, становится текучим, когда напряжение по Мизесу достигает критического значения, известный как предел текучести,  $\sigma_y$ . Напряжения по Мизесу используются для прогнозирования текучести материалов при любых условиях нагружения по результатам простых испытаний на одноосное растяжение. Напряжения по Мизесу обладают тем свойством, что два напряженных состояния с одинаковой энергией формоизменения имеют равные напряжения по Мизесу.

Поскольку критерий текучести Мизеса не зависит от первого инварианта напряжений,  $I_1$ , он применим для анализа пластической деформации для пластичных материалов, таких как металлы, так как начало текучести для этих материалов не зависит от гидростатического компонент тензора напряжений.

Математически критерий текучести Мизеса выражается как

$$J_2 = k^2,$$

где  $k$  – предел текучести материала в чистом сдвиге.

В начале процесса текучести величина предел текучести при сдвиге в чистом сдвиге в  $\sqrt{3}$  раза ниже, чем предел текучести при растяжении в случае простого растяжения. Таким образом, имеем:

$$k = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}},$$

где  $\sigma_y$  – условный предел текучести материала.

Если мы установим, что напряжения по Мизесу равны пределу текучести и объединим приведенные выше уравнения, критерий текучести Мизеса может быть выражен как:

$$\sigma_v = \sigma_y = \sqrt{3J_2} \quad \text{или} \quad \sigma_v^2 = 3J_2 = 3k^2.$$

Замещая  $J_2$  с условиями через компоненты тензора напряжений

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{2} \left[ (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6(\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 + \sigma_{12}^2) \right].$$

Это уравнение определяет поверхность текучести в виде цилиндра круглого сечения, кривая текучести которой или пересечение с девиаторной плоскостью, представляет собой круг с радиусом  $\sqrt{2k}$  или  $\sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_y$ . Это означает, что условие текучести не зависит от гидростатических напряжений (рис. 4.11).

Приведенные уравнения Мизеса при различных напряженных состояниях

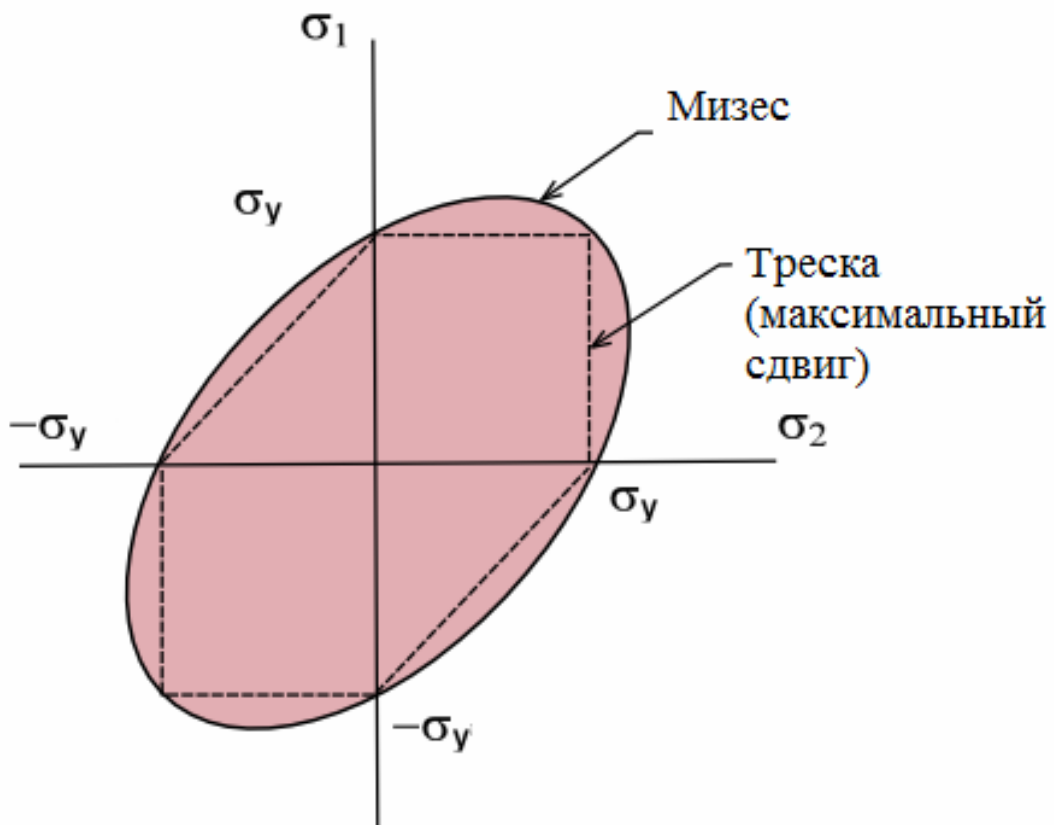


Рис. 4.11. Проекция критерия текучести Мизеса в плоскости  $\sigma_1$ – $\sigma_2$

В табл. 4.3 приведены формулы критерия текучести Мизеса для различных напряжённых состояний.

Таблица 4.3

Формулы критерия текучести Мизеса для различных напряжённых состояний

Сценарий нагружения	Ограничения	Упрощенный критерий текучести Мизеса
Общий	нет ограничений	$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6(\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 + \sigma_{12}^2) \right]}$
Главные напряжения	$\sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right]}$
Плоское напряженное состояние	$\sigma_3 = 0$ $\sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 + 3\sigma_{12}^2}$
Чистый сдвиг	$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ $\sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{3}\sigma_{12}$
Одноосный	$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ $\sigma_{12} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sigma_1$



## 4.2. Моделирование конструкций

Численное моделирование, как и физический эксперимент, проводилось в три этапа:

- моделирование консоли колонны с арматурой;
- моделирование балансирующего устройства;
- моделирование сталетрубобетонной обоймы.

На рис. 4.12 представлена конечно-элементная **модель консоли колонны с арматурой**.

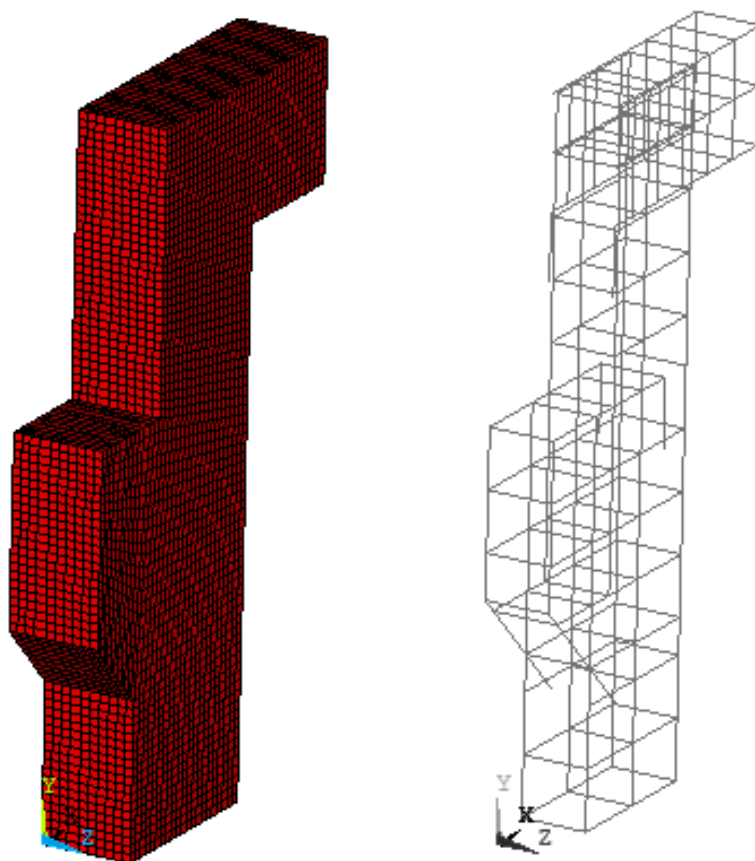


Рис. 4.12. Конечно-элементная модель консоли и арматуры

Приложение нагрузки в размере 13,125 МПа выполнено с помощью команды Pressure (давление), область нагружения аналогична физическому эксперименту [36, 37, 38]. На рис. 4.13–4.14 представлены результаты расчета.

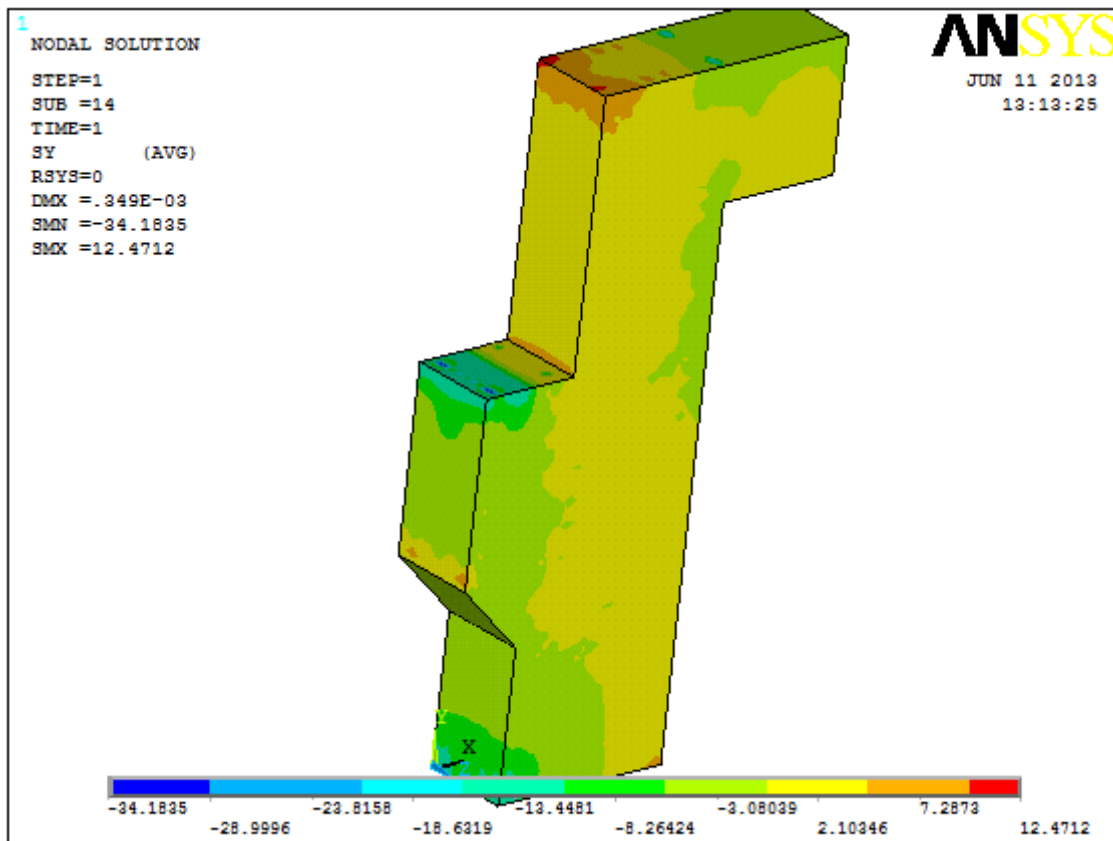


Рис.4.13. Напряжения по оси Y

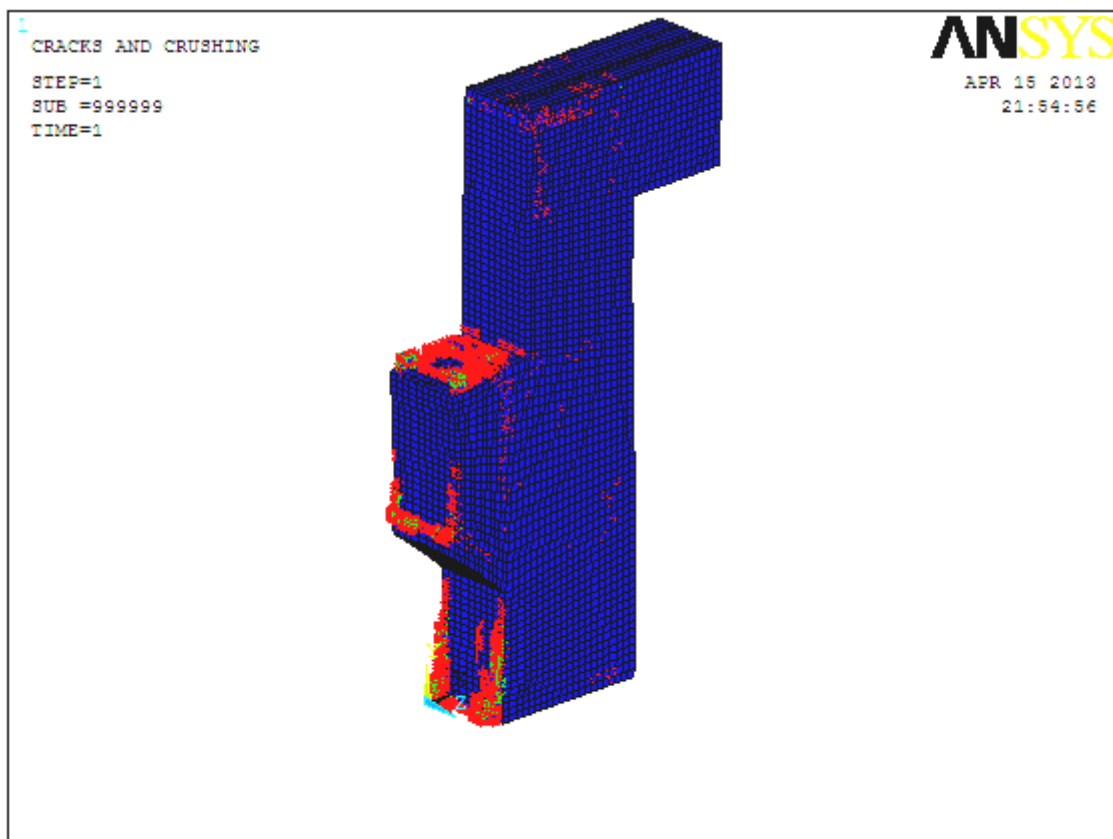


Рис.4.14. Схема возможного образования трещин

На рис. 4.15 представлена модель консоли, работоспособность которой восстановлена с помощью балансирных устройств. Расчет конструкции выполнялся в двух вариантах: с центратором без усиления и с усиленным центратором. Приложение нагрузки в размере 235,44 кН (центратор без усиления) и 294,3 кН (усиленный центратор) выполнено с помощью команды Force (сила), область нагружения аналогична физическому эксперименту. В ходе конечно-элементного моделирования были решены контактные задачи с помощью расширенного метода Лагранжа, который представляет итеративный ряд штрафных корректировок при поиске точечных множителей (коэффициентов) Лагранжа (т.е. контактных сил сцепления) [39]. Контакт накладывался в области пересечения объемных элементов конструкции. На рис. 4.16–4.18 представлены результаты расчета балансирных устройств с центратором без усиления.

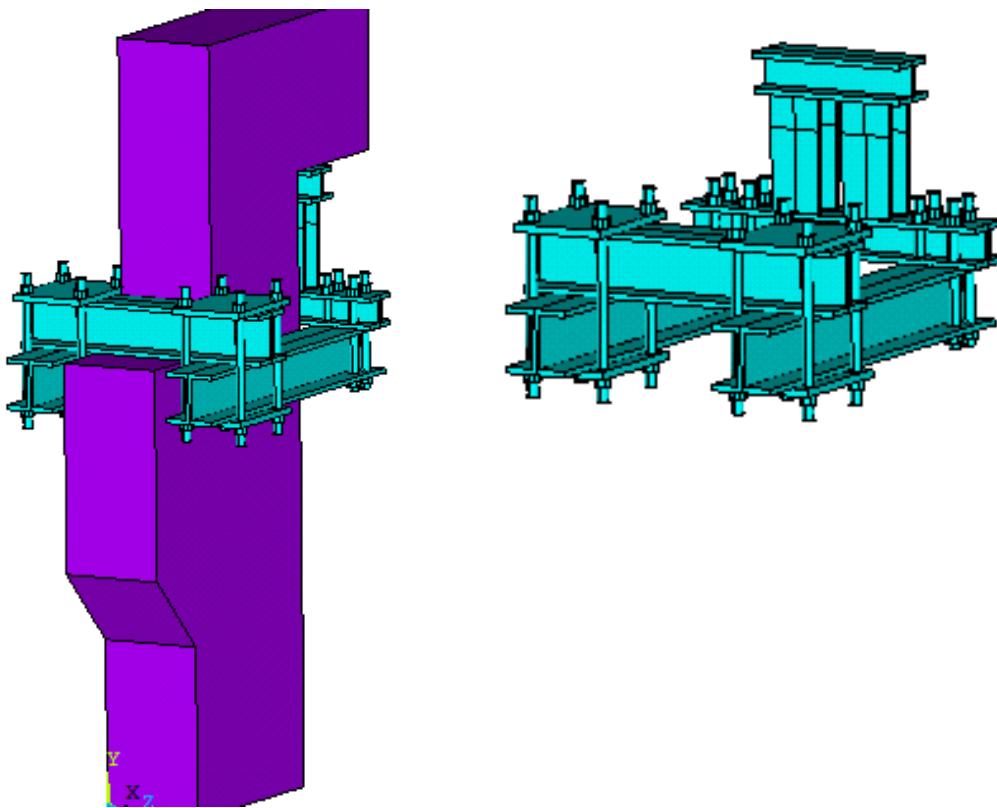


Рис.4.15. Геометрическая модель балансирного устройства

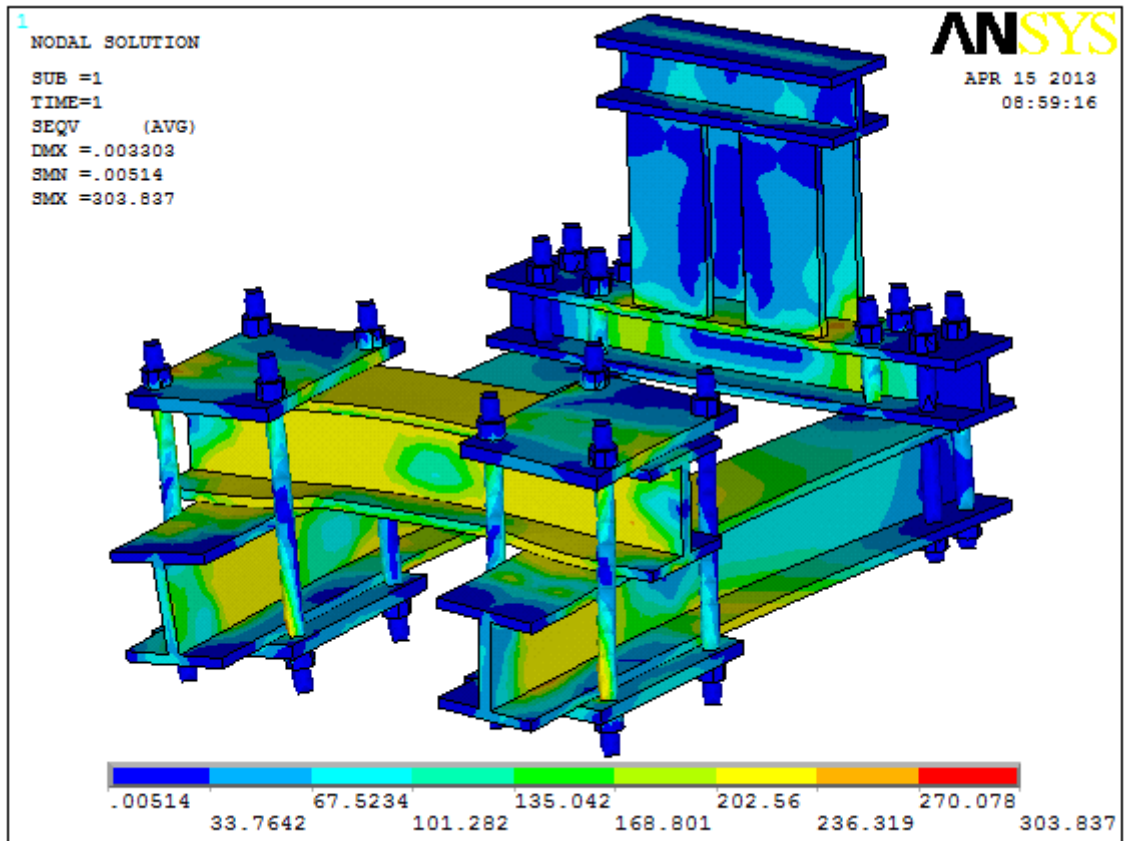


Рис.4.16. Напряжения по Губеру-Мизесу

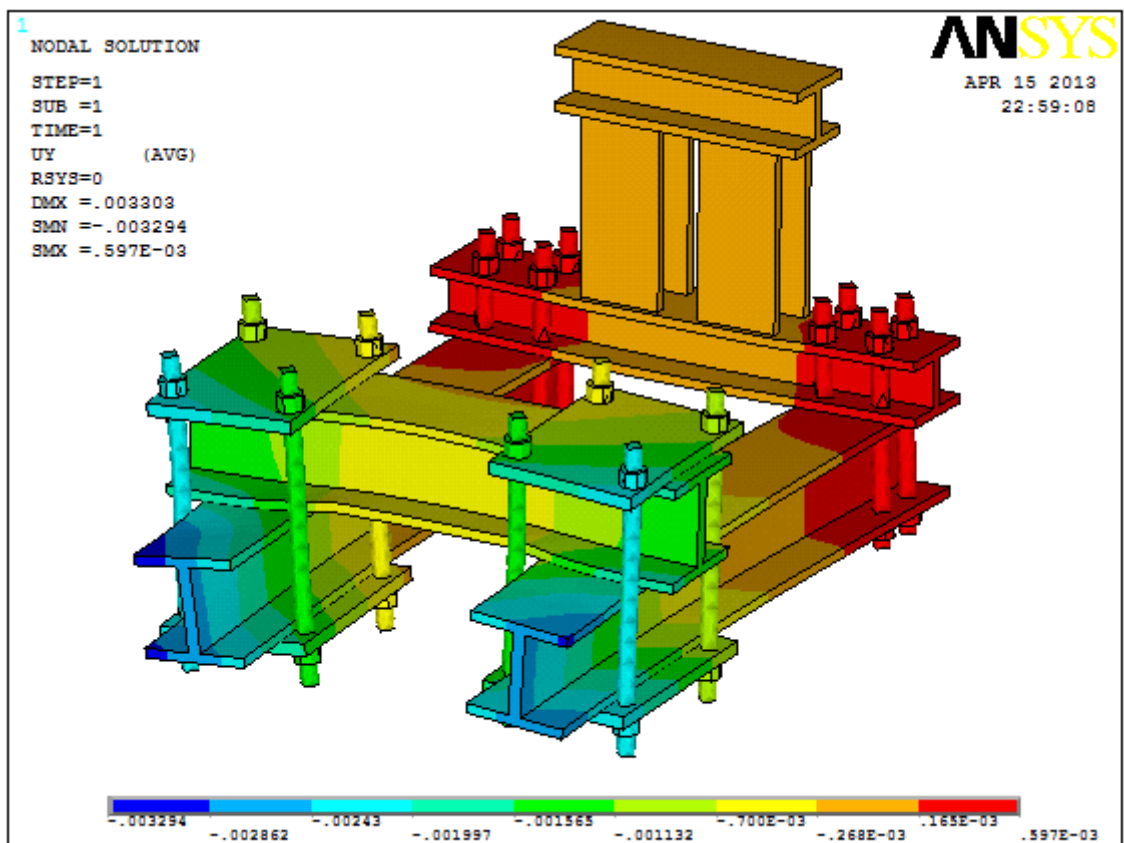


Рис. 4.17. Перемещения по оси У

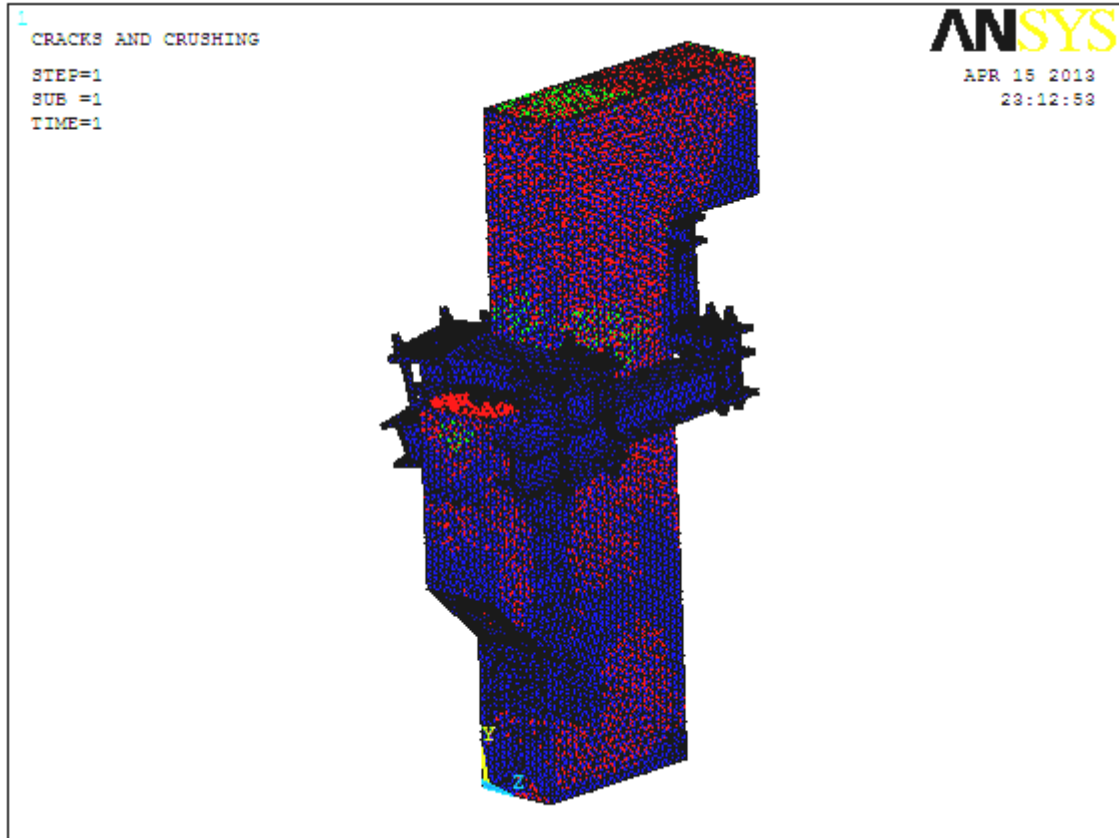


Рис. 4.18. Схема возможного образования трещин

На рис. 4.19 представлена модель консоли, работоспособность которой восстановлена с помощью **балансирных устройств с усиленным центратором**. На рис. 4.20–4.22 представлены результаты расчета.

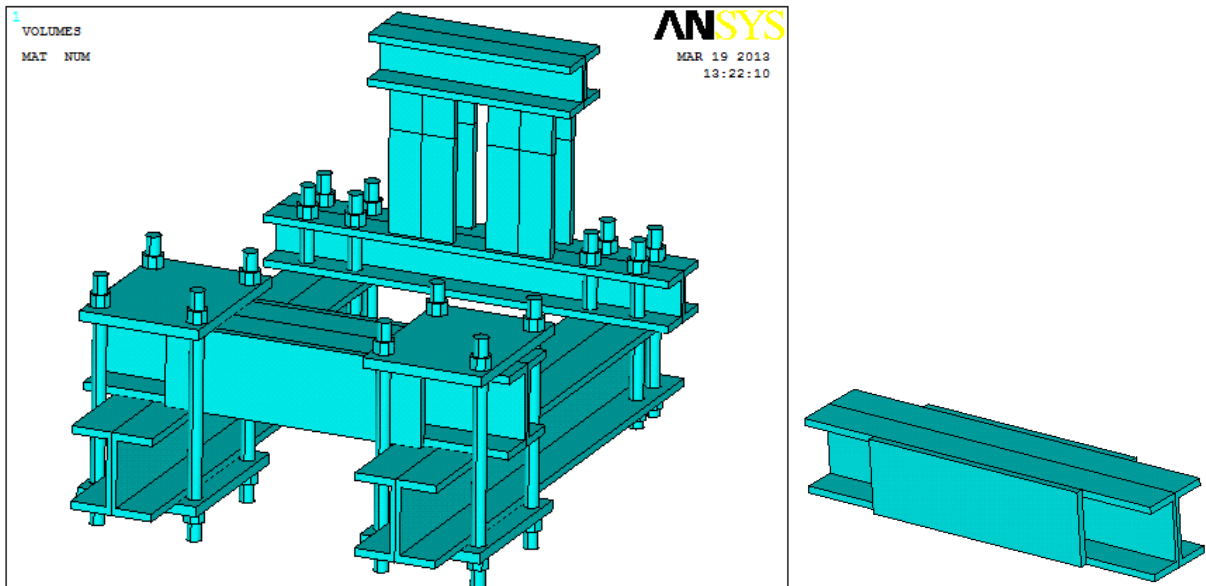


Рис. 4.19. Геометрическая модель балансирного устройства с усиленным центратором

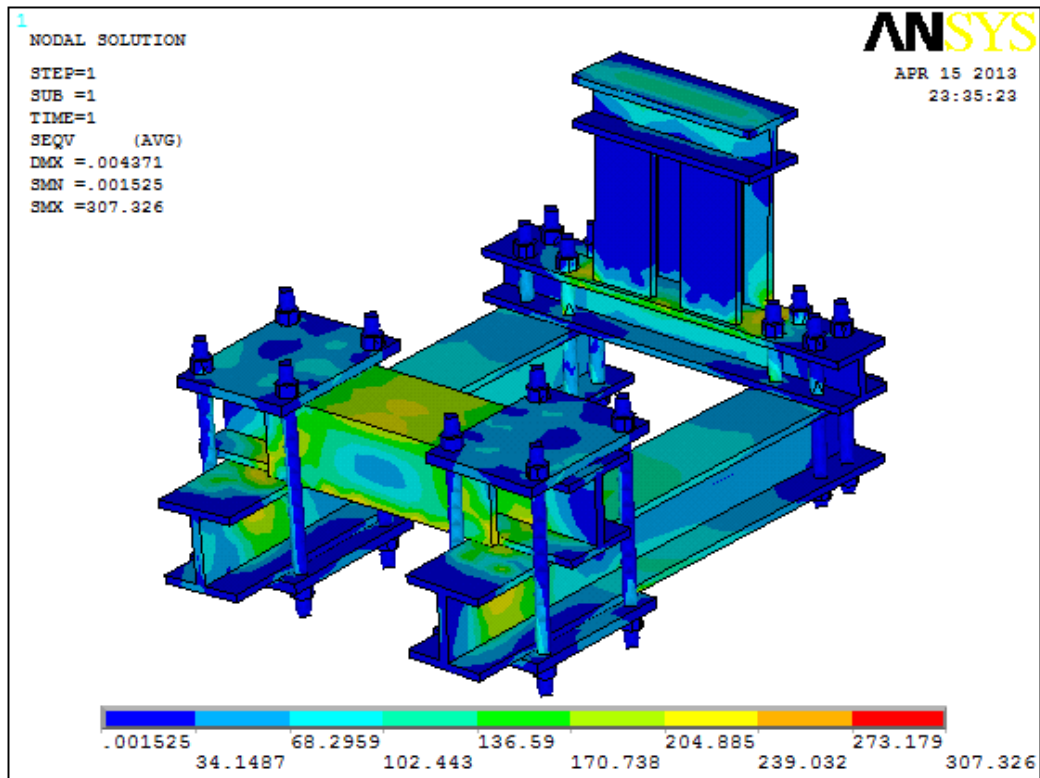


Рис. 4.20. Напряжения на балансирном устройстве с усиленным центратором по Губеру – Мизесу

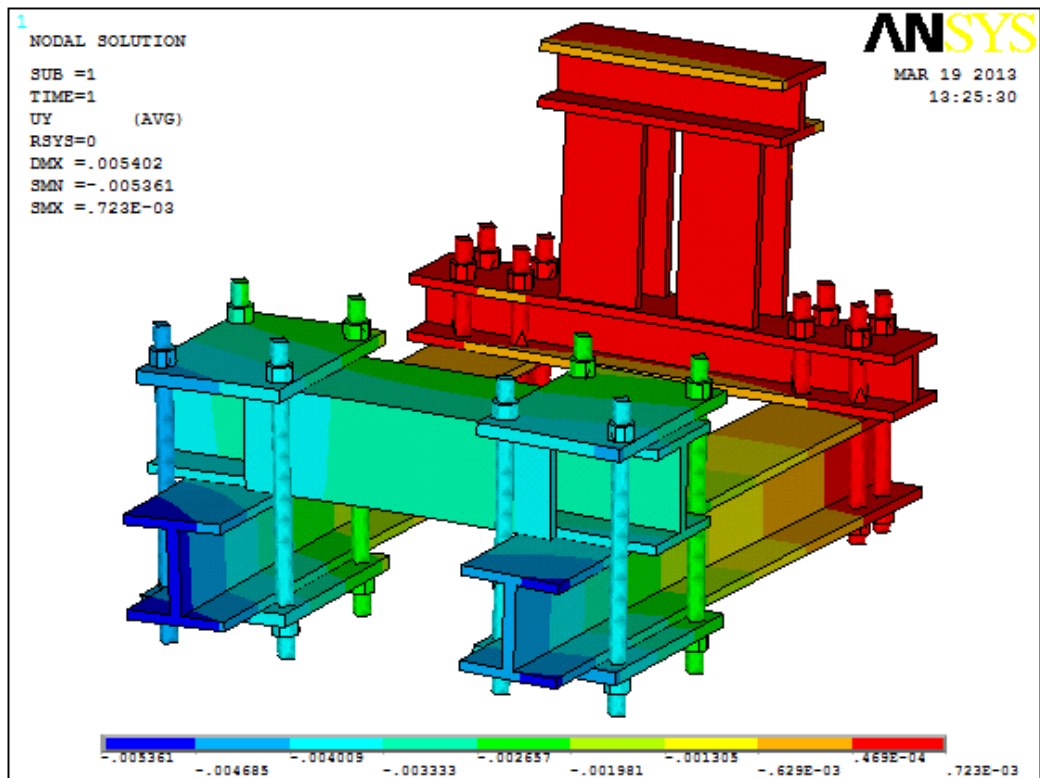


Рис. 4.21. Перемещения по оси У на балансирном устройстве с усиленным центратором

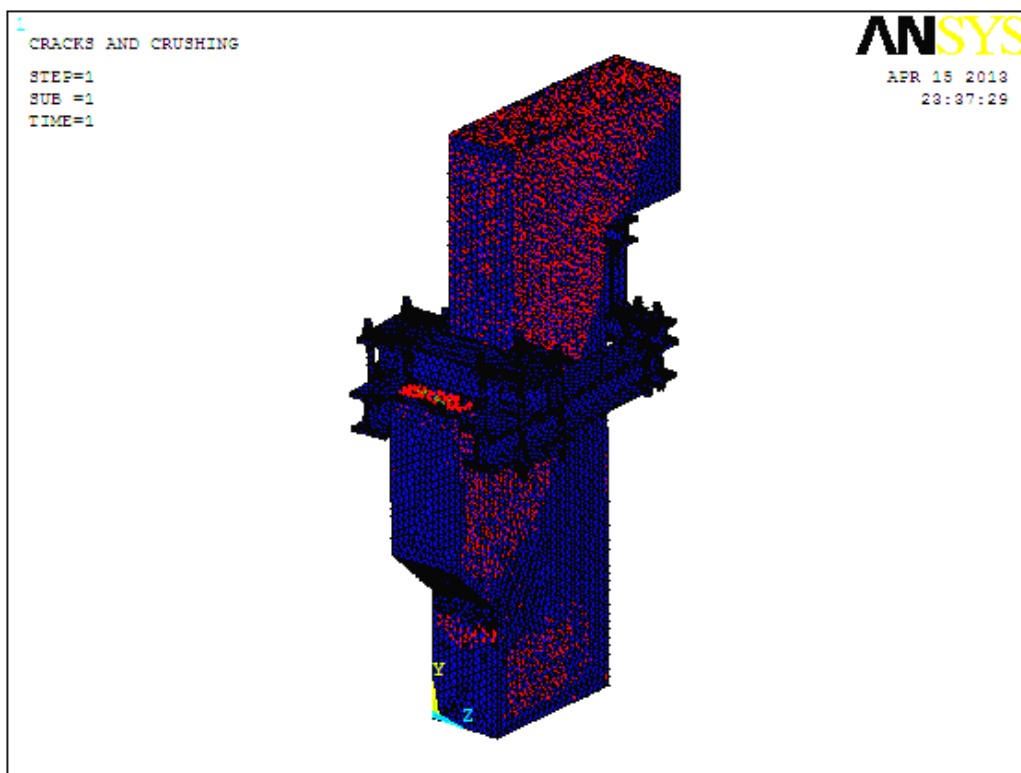


Рис.4.22. Схема возможного образования трещин

На рис. 4.23 представлена модель консоли, работоспособность которой восстановлена с помощью сталетрубобетонных обойм. Соединение элементов сталетрубобетонной обоймы между собой выполнялось через уравнения связей. На рис. 4.24–4.27 представлены результаты расчета.

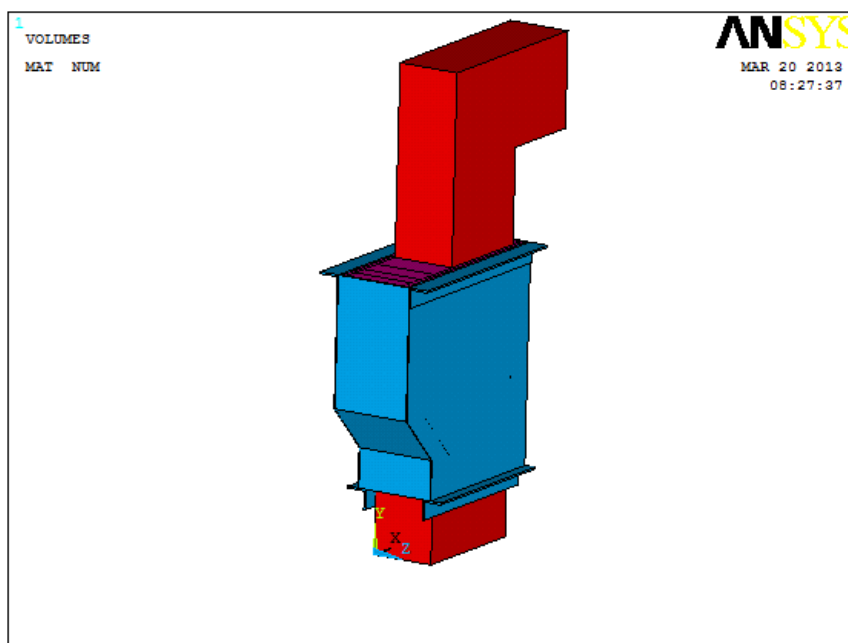


Рис. 4.23. Геометрическая модель сталетрубобетонной обоймы



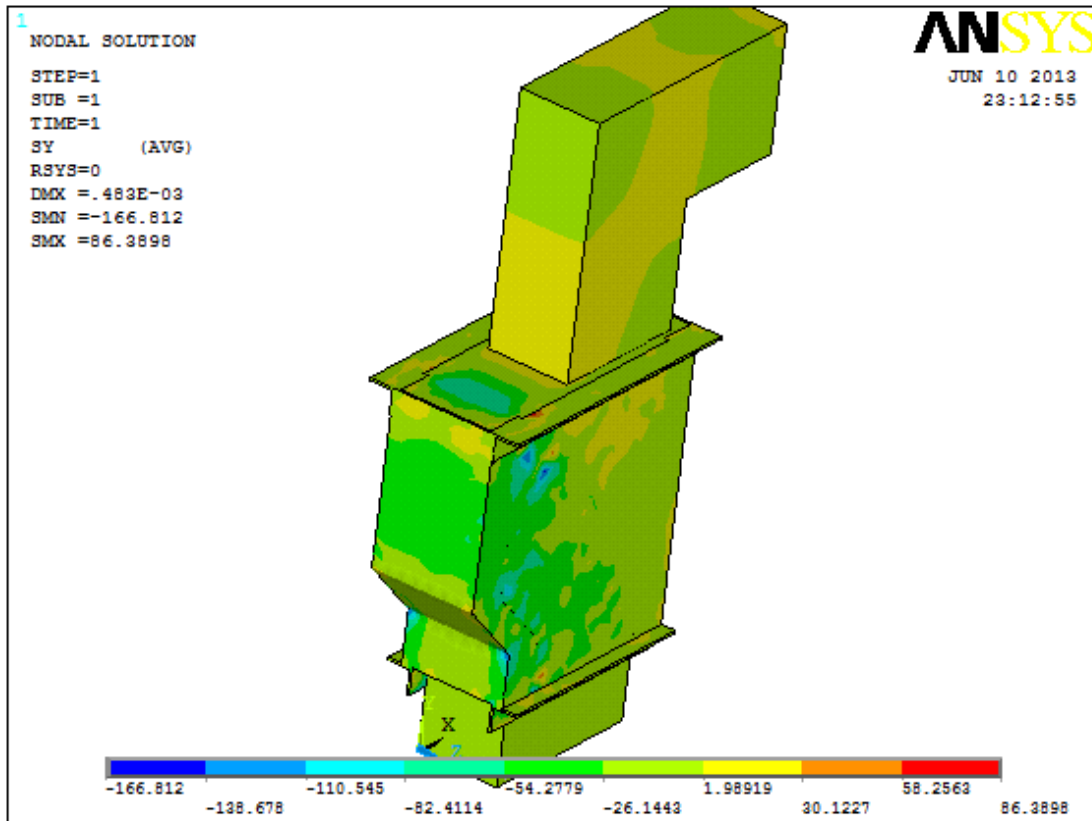


Рис. 4.24. Напряжения в стелтрубобетонной обойме по оси Y

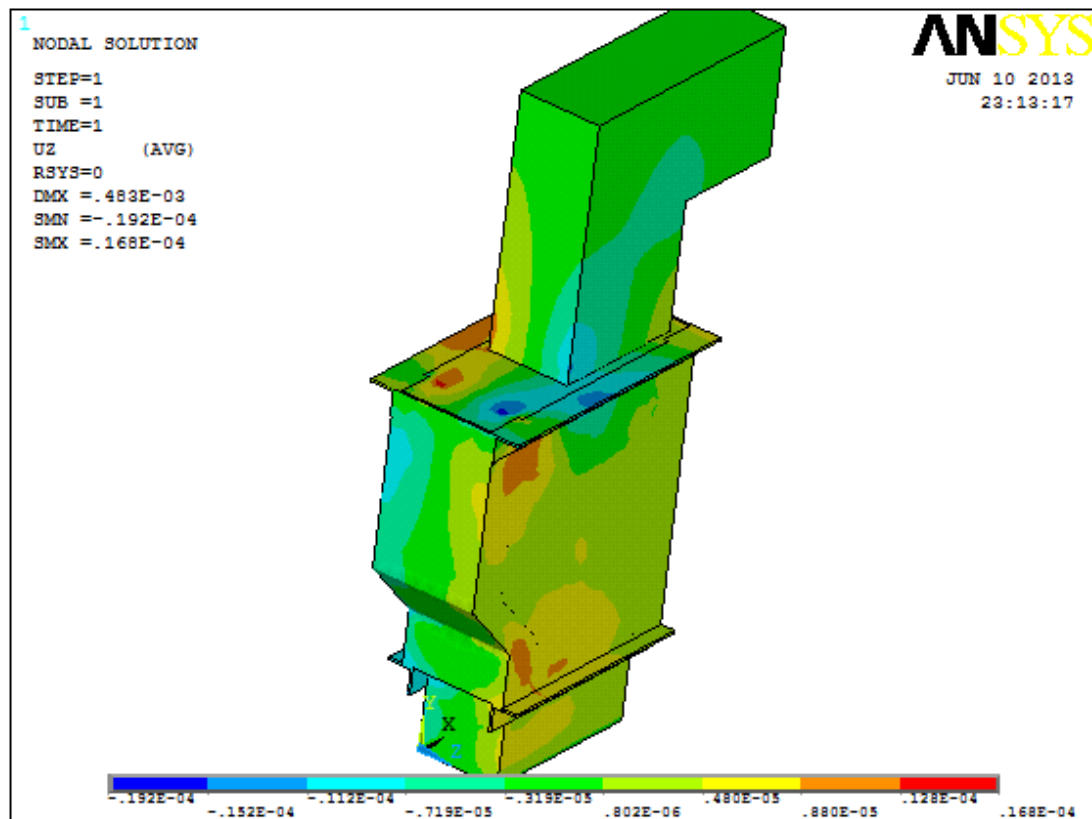


Рис. 4.25. Перемещения стелтрубобетонной обоймы по оси Z



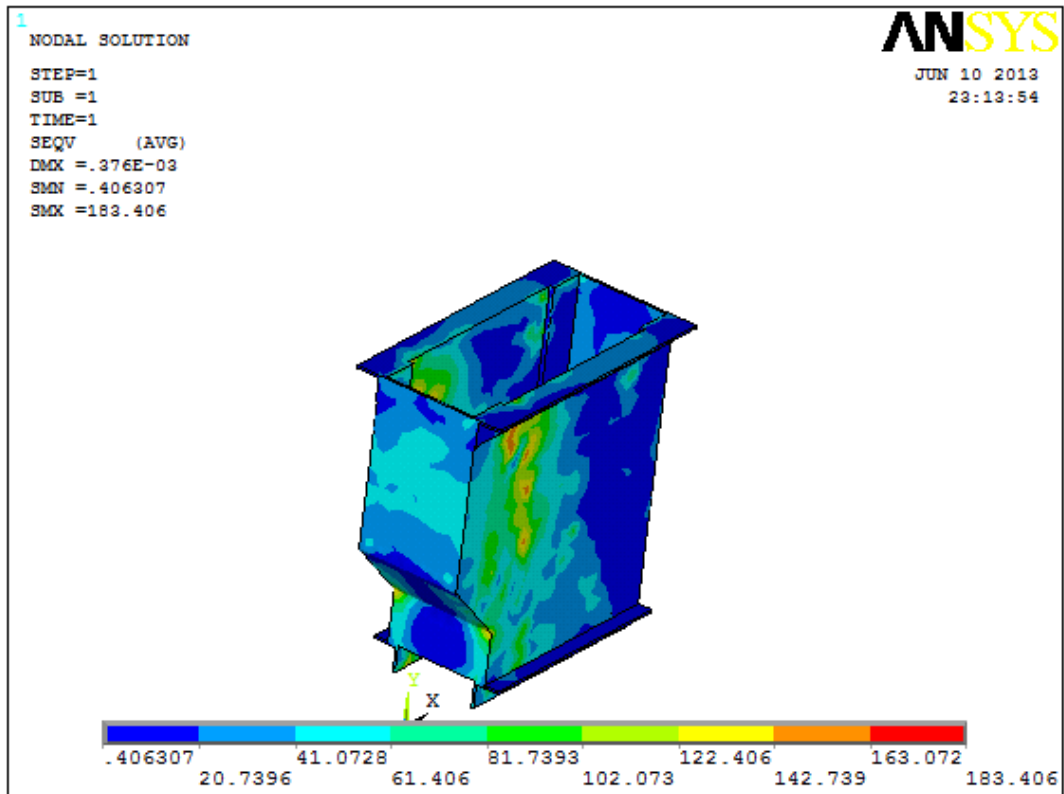


Рис. 4.26. Напряжения в сталетрубобетонной обойме по Губеру-Мизесу

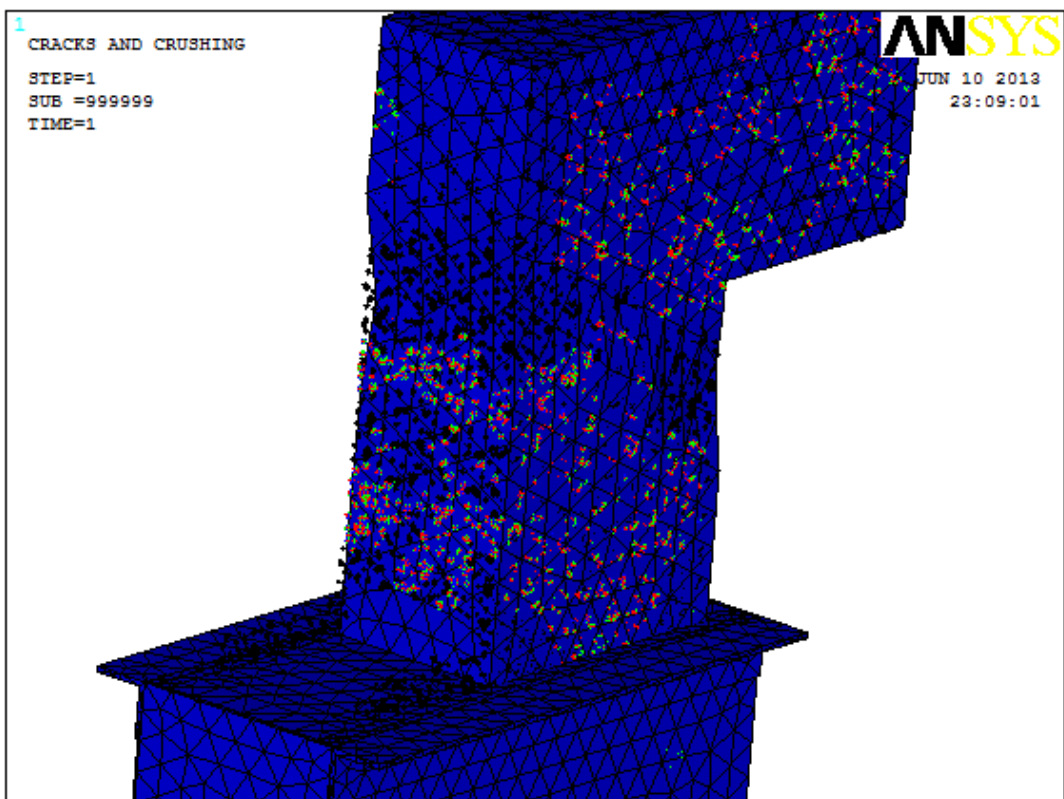


Рис. 4.27. Схема возможного образования трещин

### 4.3. Сравнение результатов физического и численного экспериментов

Сравним результаты физических испытаний и численного моделирования (табл.4.4, 4.5).

Т а б л и ц а 4.4

Сравнение напряжений в элементах балансирных устройств

Номер датчика	Напряжения физического эксперимента, МПа		Напряжения численного эксперимента, МПа		Разница, %		Примечание
	№1	№2	№1	№2	№1	№2	
1	-	202,22	257,89	218,33	-	8,0	Отказ датчика на модели №1
2	-	149,3	250,36	133,42	-	11,9	Отказ датчика на модели №1
3	-	-	221,20	130,52	-	-	Отказ датчика на моделях №1 и №2
4	-	124,66	217,28	133,07	-	6,7	Отказ датчика на модели №1
5	-80,21	-70,21	-73,67	-62,80	8,9	11,1	
6	-76,19	-	-68,95	-62,65	10,5	-	Отказ датчика на модели №2
7	118,66	-	131,05	78,23	10,4	-	Отказ датчика на модели №2

Анализ результатов расчета балансирного устройства показывает, что данные в контрольных точках сопоставимы с данными физического эксперимента с разницей не более 12 % (см. табл.4.4). Анализ результатов численного эксперимента показал, что при замене сечения центратора на коробчатое происходит уменьшение напряжений в контрольных точках от 10 % на стойках опорной балки до 206 % на рычагах управления (табл.4.4).

Деформативность всей конструкции, напротив, выросла от 30 до 80 % с учетом возросшей нагрузки на 29 % и не превышает 5,4 мм.

Т а б л и ц а 4.5

## Сравнение напряжений в элементах трубобетонной обоймы

Номер датчика	Напряжения физического эксперимента, МПа	Напряжения численного эксперимента, МПа	Разница, %
1	33,79	30,98	9,1
2	23,41	21,34	9,7
3	30,67	27,42	11,8
4	-26,78	-25,43	5,3
5	21,87	20,34	7,5
6	19,77	21,97	11,1
7	-12,76	-12,94	1,4
8	30,63	32,09	4,8
9	45,81	50,28	9,8
10	15,54	16,92	8,9
11	23,24	21,77	6,8
12	24,64	24,24	1,7
13	37,4	34,1	9,7
14	15,52	14,08	10,2
15	-31	-28,63	8,3
16	27,83	25,46	9,3

Анализ результатов расчета сталетрубобетонной обоймы показывает, что данные в контрольных точках сопоставимы с данными физического эксперимента с разницей не более 12 % (см. табл.4.5). Следует отметить, что на конструкции имеются экстремальные напряжения величиной до 200 МПа. Деформации конструкции не превышают 2 мм.

#### 4.4. Исследование распределения напряжений в сечении консоли колонны

Для исследования напряженно-деформированного состояния консоли колонны в зависимости от способа усиления были построены графики распределения напряжений в сечении под зоной нагружения и вдоль консоли в середине её толщины (рис.4.29-4.30) [40, 41]. Вид сечения представлен на рис.4.28.

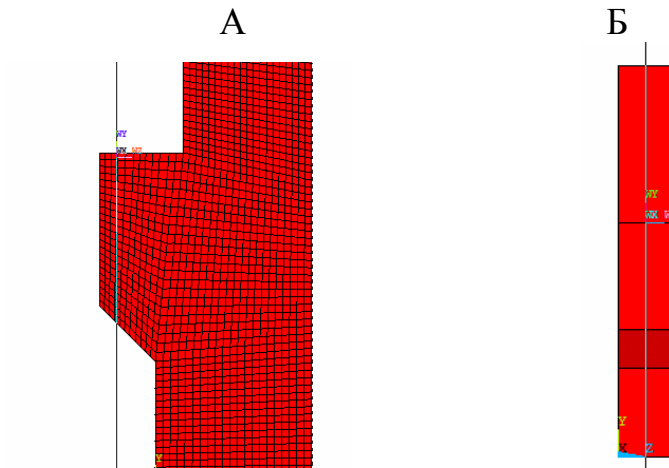


Рис. 4.28. Сечения в ПК ANSYS для построения графиков:  
 А – сечение 1, Б – сечение 2

При исследовании способов усиления сечение принято аналогичным.

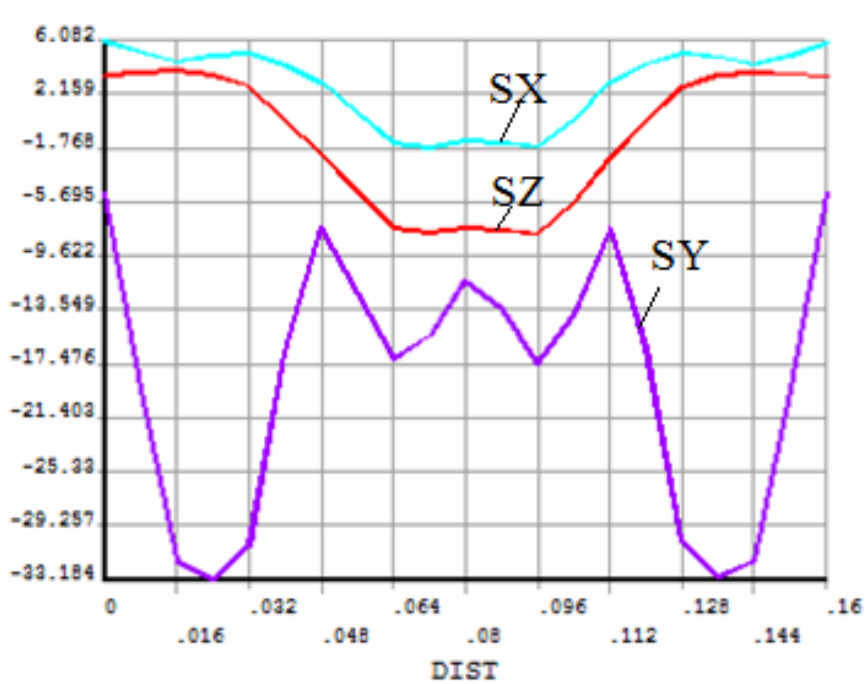


Рис. 4.29. График распределения напряжений в сечении 1 консоли колонны

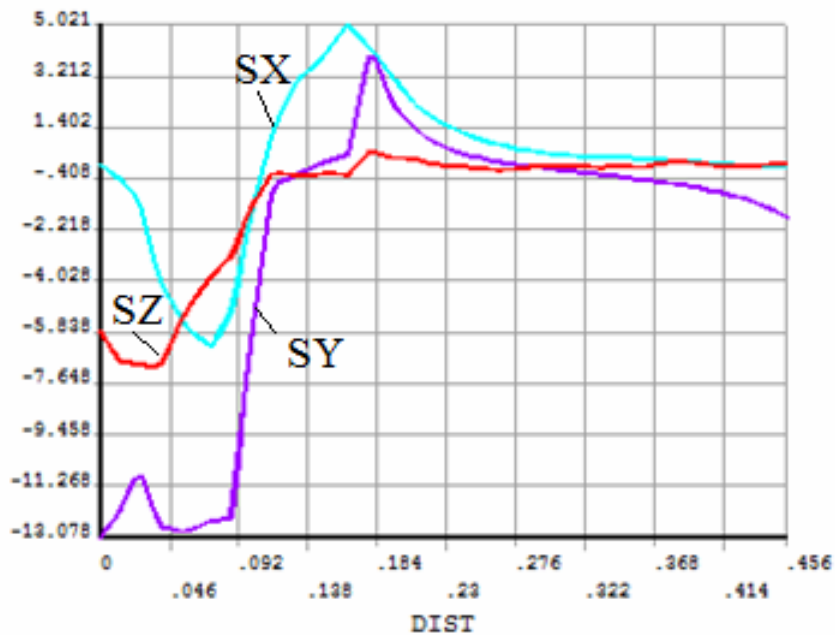


Рис. 4.30. График распределения напряжений в сечении 2 консоли колонны

Анализа графика (рис.4.29-4.30.) показывает, что разрушение сечения произошло от вертикальной сдвигающей силы, которая действует вдоль грани с рабочей арматурой, при этом горизонтальные напряжения практически не оказывают влияния на процесс разрушения. На рис. 4.31-4.32 представлен график распределения напряжений в сечении 1 и 2 соответственно при усилении консоли балансирным устройством.

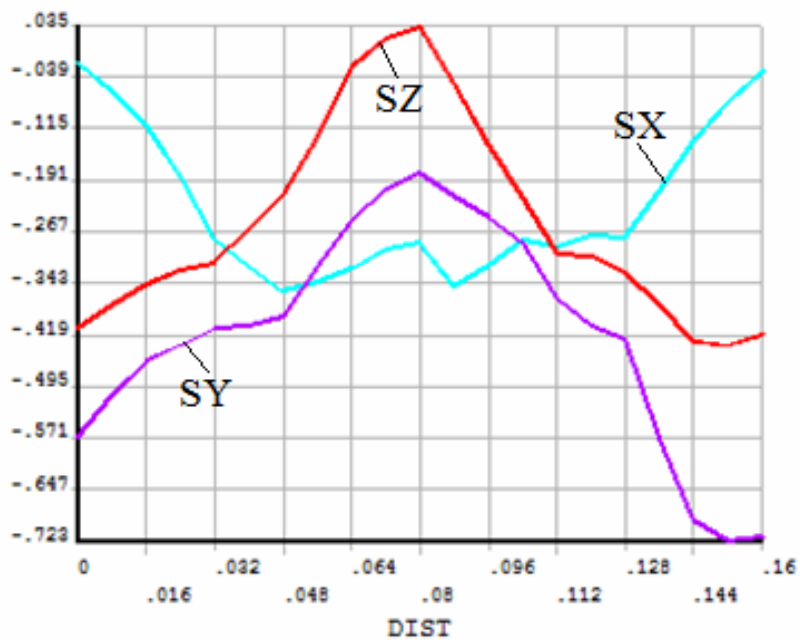


Рис. 4.31. График распределения напряжений в сечении 1 консоли, усиленной балансирным устройством (без пластины)

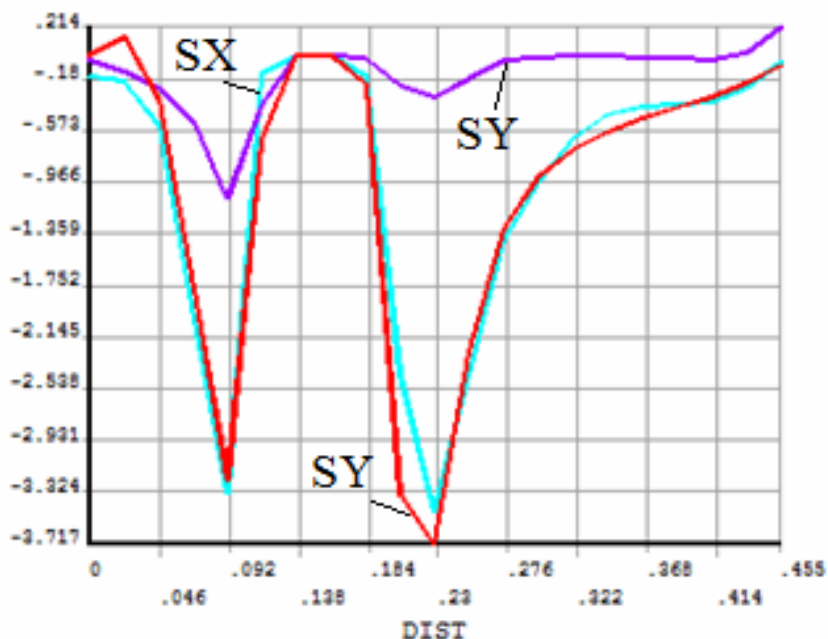


Рис. 4.32. График распределения напряжений в сечении 2 консоли, усиленной балансирным устройством (без пластины)

Анализ графиков (рис.4.31-4.32) показывает, что в связи с переносом опорной реакции ближе к центру тяжести нижней части колонны напряжения в сечении стремятся к нулю, тем самым доказывая справедливость предложенной авторами гипотезы. Балансирное устройство позволяет перераспределить напряжения по плоскости консоли и изменить напряжения растяжения в месте соединения верхней части колонны и консоли на сжатие, что более благоприятно для бетонных конструкций.

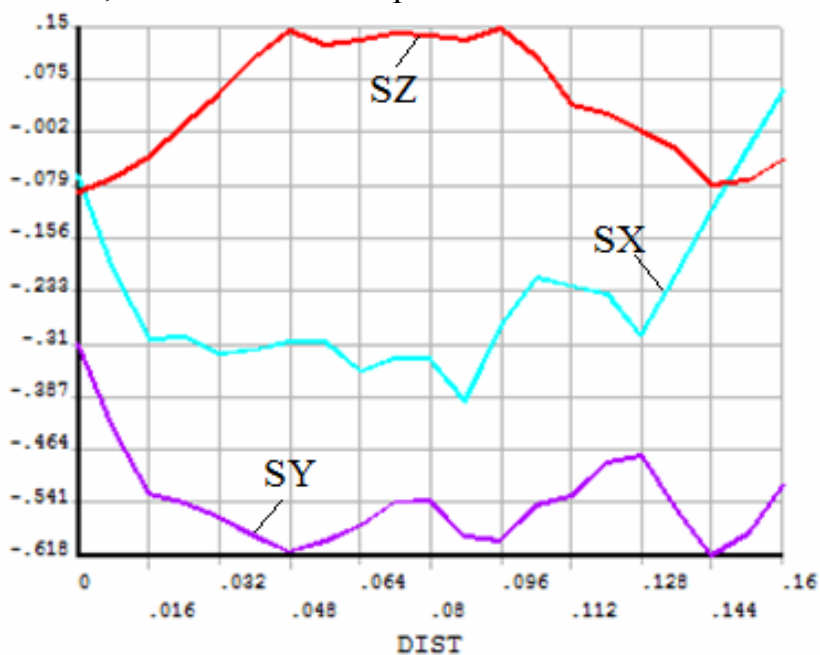


Рис. 4.33. График распределения напряжений в сечении 1 консоли, усиленной балансирным устройством (с пластиной)

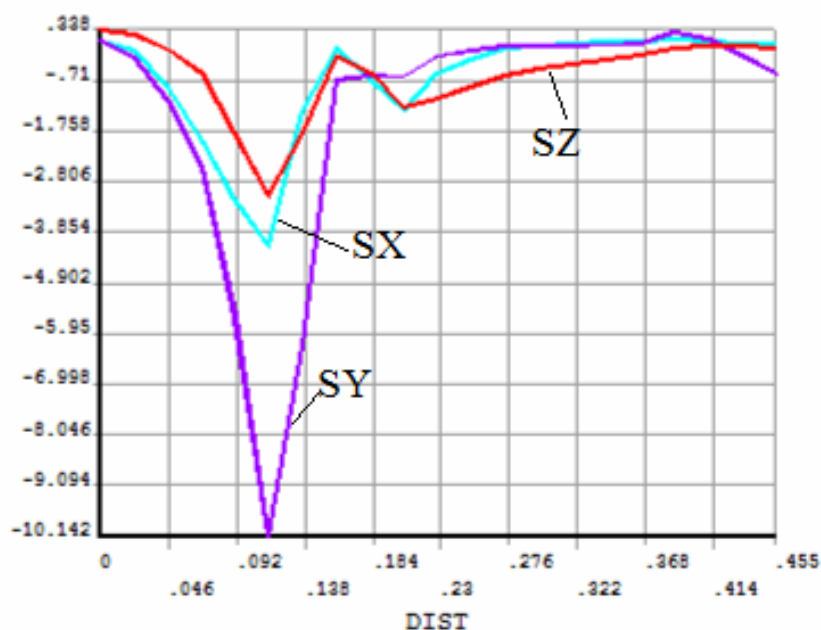


Рис.4.34. График распределения напряжений в сечении 2 консоли, усиленной балансирным устройством (с пластиной)

Анализ графиков (рис.4.33-4.34) показывает, что возникающие в сечении 2 вертикальные напряжения выросли по сравнению с предыдущим случаем почти в 3 раза, что также подтверждает гипотезу о том, что усиленный центратор обладает большей прочностью, так как напряжения равномернее распределяются по ширине сечения консоли. Данные напряжения равномернее распределяются по поверхности консоли вследствие отсутствия смятия полок центратора, которые наблюдались при физическом эксперименте. Место возникновения данных напряжений сместилось от грани верхней части колонны в сторону обреза консоли.

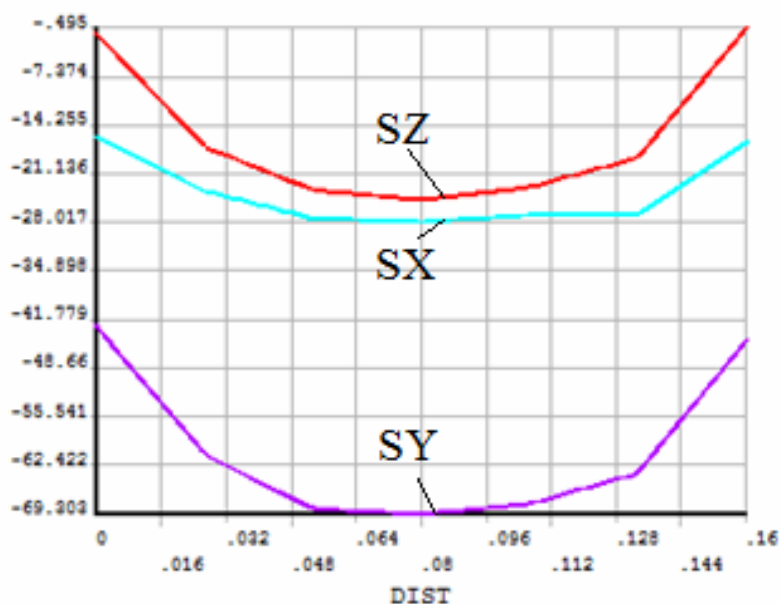


Рис.4.35. График распределения напряжений в сечении 1 консоли, усиленной сталебетонной обоймой

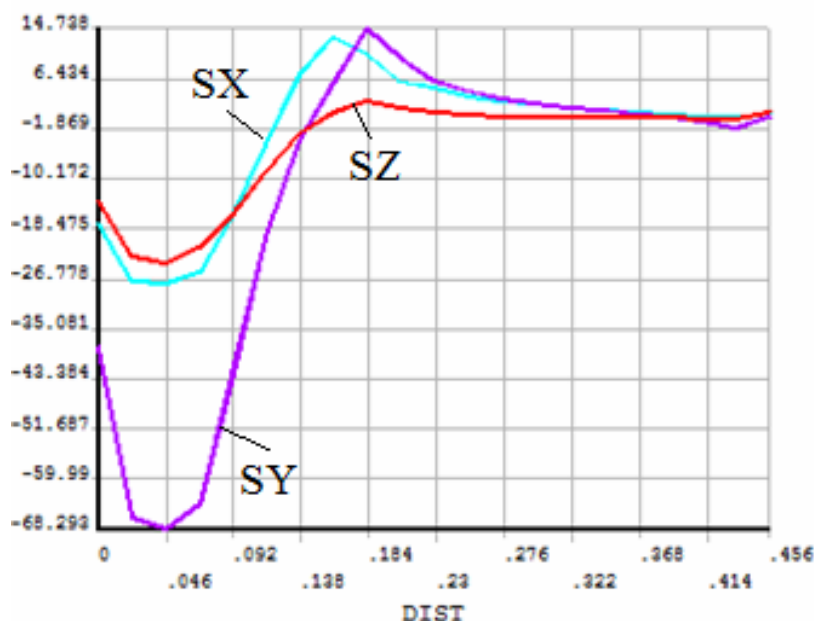


Рис.4.36. График распределения напряжений в сечении 2 консоли, усиленной сталетрубобетонной обоймой

Анализ графиков (рис. 4.35-4.36) показывает, что сталетрубобетонная обойма является самой напряженной, так как максимальные напряжения расположены под зоной нагружения и достигают 69 МПа. При этом совместная работа стали и бетона позволяет, не разрушаясь, воспринимать столь высокие напряжения. Необходимо отметить, что напряжения распределяются более равномерно в сравнении с оригинальной консолью.

Таким образом, анализ графиков распределения напряжений показал, что распределения напряжений становятся более равномерными по сравнению с оригинальной консолью. В случае с балансирным устройством наблюдается снижение максимальных напряжений на консоли колонны от 30 % (для сечения 2). Для сталетрубобетонной обоймы напряжения в сечении 1 возросло в 2,09 раза при условии увеличения нагрузки минимум в 2,24 раза.

#### 4.5. Исследование влияния способов усиления консоли колонны на распределение моментов в поперечной раме

Для исследования влияния способов усиления консоли колонны на распределение моментов в каркасе проведем статический расчет однопролетной П-образной рамы на действие постоянной и снеговой нагрузки. Состав кровельного ковра и сбор нагрузок представлен в табл. 4.6. Расчет произведем для П-образной рамы, шарнирно опертой в уровне ригеля и жёстко защемленной в уровне пола.



Таблица 4.6

## Состав кровли

Нагрузка	Масса кг/м <sup>2</sup>	Нормативная, гН/м <sup>2</sup>	Коэффициент надёжности	Расчётная, гН/м <sup>2</sup>
Постоянная нагрузка				
Водоизоляционный ковёр. (4 сл. рубероида)	20	2	1,3	2,60
Цементная корка 20 мм	40	4	1,3	5,2
Пенобетон 100 мм	125,75	12,575	1,3	16,35
Пароизоляция	5	0,5	1,3	0,65
ж/б плиты 1500·500 мм ≈ 73,6 кг/м <sup>2</sup>	73,6	7,36	1,2	8,83
Фермы	45	4,5	1,05	4,73
Фонари	15	1,5	1,05	1,58
Связи	15	1,5	1,05	1,57
Прогоны	15	1,5	1,05	1,57
Постоянная нагрузка	<b>354,35</b>	<b>35,435</b>	-	<b>43,08</b>
Временная нагрузка				
Снег	<b>128,6</b>	<b>12,86</b>	<b>1,4</b>	<b>18</b>
<b>ВСЕГО:</b>	<b>482,95</b>	<b>48,30</b>	-	<b>61,08</b>

Расчётная схема рамы показана на рис. 4.37.

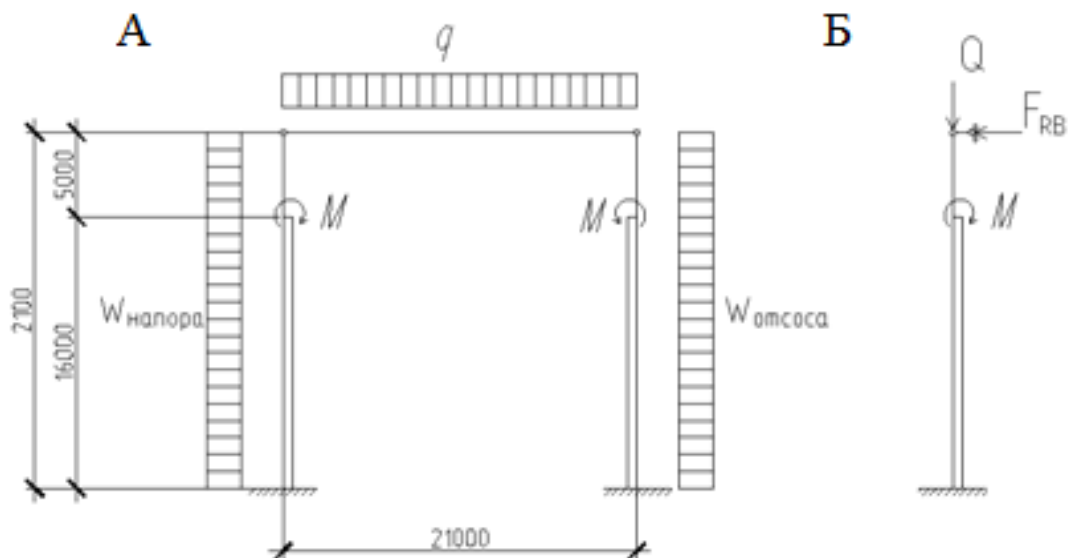


Рис. 4.37. Расчётная схема:  
А – рамы; Б – стойки

Найдем опорную реакцию, которая передается на стойку колонны от постоянной и снеговой нагрузки:

$$q_{\text{пост}} = q_0 \cdot B = 43,08 \frac{\text{гН}}{\text{м}^2} \cdot 7 \text{ м} = 301,56 \text{ гН/м},$$

$$q_{\text{снег}} = q_s \cdot B = 18 \frac{\text{гН}}{\text{м}^2} \cdot 7 \text{ м} = 126 \text{ гН/м},$$

где  $q_0$  – соответствующая расчетная нагрузка;  $B$  – шаг рам.

$$\begin{aligned} Q &= Q_{\text{пост}} + Q_{\text{снега}} = \frac{q_{\text{пост}} \cdot 1}{2} + \frac{q_{\text{снега}} \cdot 1}{2} = \frac{301,56 \cdot 21}{2} + \frac{126 \cdot 21}{2} = \\ &= 3166,38 + 1323 = 4489,4 \text{ гН}. \end{aligned}$$

Для удобства данный расчет проведем в ПК «Scad». Расчет проводим для плоской рамы, в качестве конечного элемента использован элемент №10 – «универсальный стержень». Сечения элементов приняты следующими: нижней части – 130×64 см, консоли колонны – 170×64 см (сечение приведено к прямоугольному), верхней части – 110×64 см. Схема нагружения представлена на рис. 4.37. В ходе проведения анализа изменялось поперечное сечение элементов (моделирование обрушения защитного слоя бетона), трещина в верхней части.

На рис. 4.38а представлена эпюра изгибающих моментов в раме с оригинальными сечениями и нагружением. На рис. 4.38б представлена эпюра изгибающих моментов в раме с сечениями, в которых обрушился защитный слой.

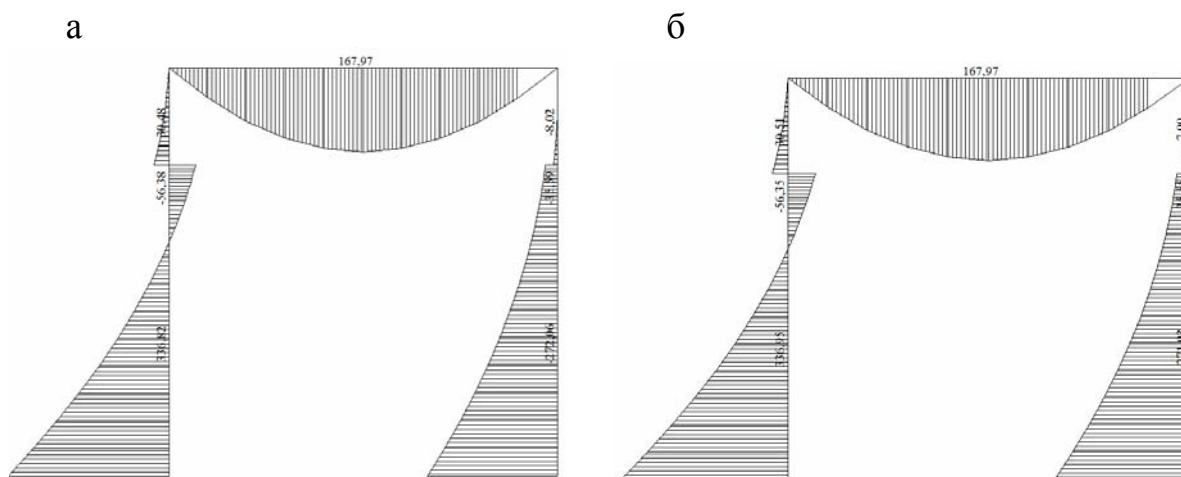


Рис. 4.38. Эпюры изгибающих моментов рамы:  
а – с оригинальными сечениями, б – с сечениями без защитного слоя

На рис. 4.39а представлена эпюра изгибающих моментов в раме с усилением консоли балансирным устройством. На рис. 4.39б представлена

эпюра изгибающих моментов в раме с усилением консоли балансирным устройством с пластиной.

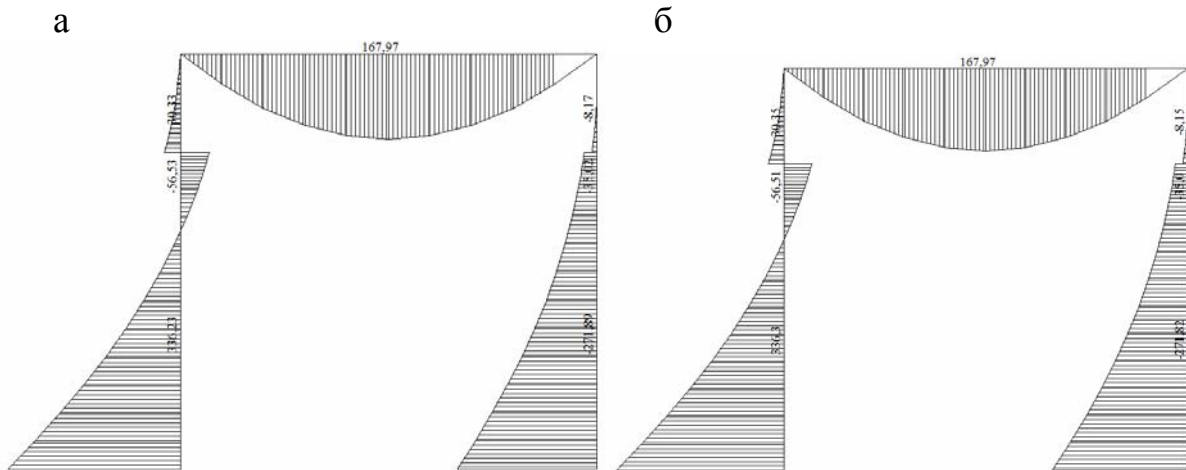


Рис. 4.39. Эпюра изгибающих моментов:  
а – с балансирным устройством; б – с усиленным балансирным устройством

На рис. 4.40 представлена эпюра изгибающих моментов в раме с усилением консоли сталетрубобетонной обоймой, с трещиной в верхней части колонны.

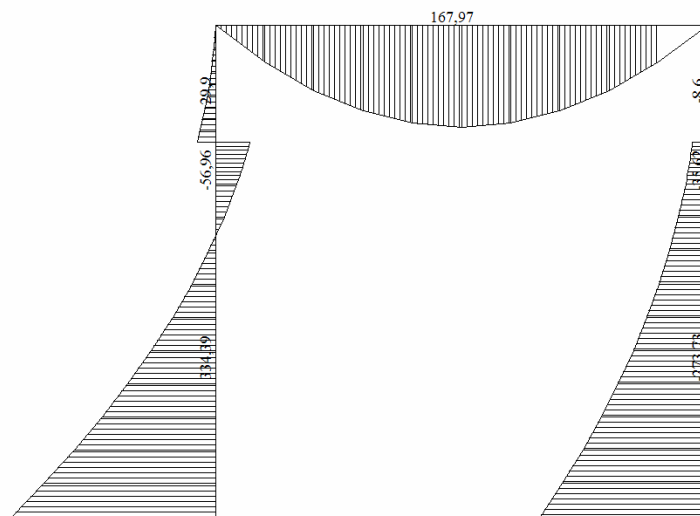


Рис. 4.40. Эпюра изгибающих моментов рамы с усиленной сталетрубобетонной обоймой консолью колонны

Результаты моделирования представлены в табл. 4.7. Схема нумерации сечений представлена на рис. 4.41.

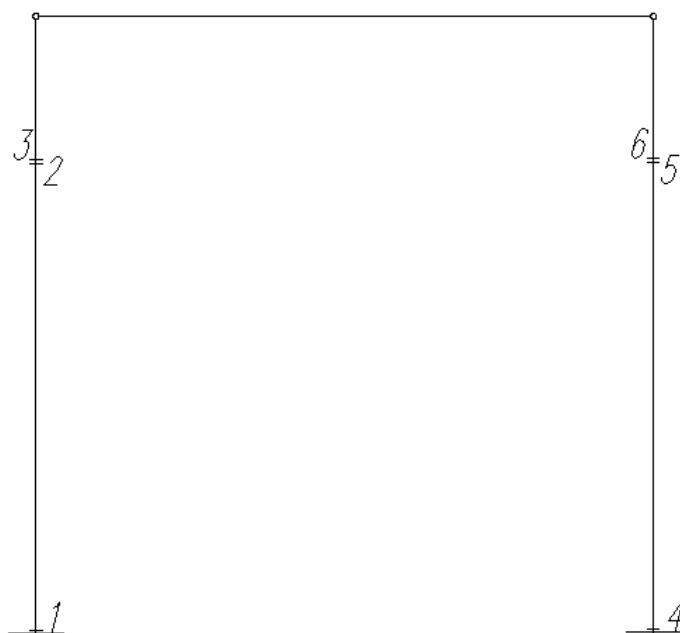


Рис. 4.41 Схема расположения сечений в раме

Т а б л и ц а 4.7

Результаты исследования влияния способов усиления на распределение моментов в поперечной раме

Способ усиления консоли колонны	Нагрузка в уступе консоли первой колонны/второй колонны, т·м	Значение изгибающего момента в сечении рамы №, т/м					
		1	2	3	4	5	6
Консоль без усиления	86,86/ 16,6	336,82	-56,38	30,48	-272,06	-35,99	-8,02
Консоль без усиления с обрушенным защитным слоем		336,95	-56,35	30,51	-271,93	-35,55	-8,99
Консоль усиленная балансирным устройством		336,23	-56,53	30,33	-271,89	-35,02	-8,17
Консоль усиленная балансирным устройством с пластиной		336,3	-56,51	30,35	-271,82	-35	-8,15
Консоль усиленная сталетрубобетонной обоймой		334,39	-56,96	29,9	-273,73	-35,26	8,6

Анализ таблицы показывает, что уменьшение сечения исходной рамы за счёт образования трещин и обрушения защитного слоя бетона практически не влияет на распределение моментов. Увеличение жёсткости консоли колонны с помощью балансирных устройств позволяет незначительно снизить напряжения в раме до 2 %. Усиление сталетрубобетонной обоймой в минимальной степени влияет на распределение моментов в раме (до 2 %).

Таким образом, анализ результатов расчета консоли колонны показывает, что характер разрушения и напряженно-деформированное состояние аналогичны данным, полученным в ходе физического эксперимента.

Анализ результатов расчета восстановления работоспособности консолей колонн с помощью балансирных устройств показывает, что характер разрушения и напряженно-деформированное состояние сопоставимы с физическим экспериментом. Разница напряжений в контрольных точках не превышает 12 %. Максимальные деформации не превышают 5,4 мм.

Замена поперечного сечения центратора на коробчатое позволяет снизить напряжения на элементах конструкции от 10 до 206 %.

Сравнительный анализ результатов расчета восстановления работоспособности консолей колонн с помощью сталетрубобетонных обойм показывает, что характер разрушения и напряженно-деформированное состояние сопоставимы с физическим экспериментом. Разница напряжений в контрольных точках не превышает 12 %. Максимальные деформации не превышают 2 мм.

Анализ графиков распределения напряжений показал, что распределения напряжений становятся более равномерными по сравнению с оригинальной консолью. В случае с балансирным устройством наблюдается снижение максимальных напряжений на консоли колонны от 30 % (для сечения 2). Для сталетрубобетонной обоймы напряжения в сечении 1 возросло в 2,09 раза при условии увеличения нагрузки минимум в 2,24 раза.

Способы усиления, предложенные авторами, оказывают минимальное влияние на НДС всего каркаса. Разница в распределении изгибающих моментов в оригинальной консоли и в консолях, усиленных предложенными способами, не превышает 2 %.

## 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ СПОСОБОВ

Усиление — основное средство увеличения продолжительности эксплуатации конструкций, особенно при реконструкции. В некоторых случаях затраты на усиление могут достигать значительных размеров и поэтому перед проектировщиками ставится задача доказать его экономическую целесообразность. Только после определения стоимости материалов и трудоемкости усиления, а также продолжительности работ по усилению и времени остановок производства можно окончательно решить, надо ли строить новое сооружение или реконструировать старое.

Выбор эффективных методов усиления конструкций позволяет в кратчайший срок, без остановки производства или с минимальными перерывами выполнить работы по реконструкции с учетом условий эксплуатации. Сравнение вариантов усиления производится по следующим показателям: масса элементов усиления; стоимость основных материалов, необходимых для усиления; трудоемкость и стоимость изготовления; трудоемкость и стоимость выполнения работ по усилению; потери прибыли из-за остановки производства на участке выполнения работ по усилению.

### 5.1. Расчёт материалоёмкости способов усиления консолей колонн

Технико-экономический анализ выполнен для следующих способов усиления консолей колонн:

- усиление затяжками;
- бетонирование подконсольной части;
- подведение под подкрановые балки новых стальных колонн;
- способ, предложенный I.Tups;
- разработанные и экспериментально апробированные способы с использованием балансирных устройств и сталетрубобетонных обойм.

Расчёт материалоёмкости произведём для реальной консоли колонны, эксплуатирующейся на одной из ТЭЦ г.Пензы. В качестве критической силы выберем расчётную нагрузку на консоль, равную 82,6 т. Отметка уровня консоли +16.000 м, высота консоли 1,8 м.

#### Усиление консолей колонн преднапряжёнными затяжками

Основным элементом, обеспечивающим работу данного способа усиления, является арматура, расположенная с боков колонны. Остальные элементы рассчитать достаточно сложно, т.к. нет методики, поэтому примем

поперечное сечение из уголков, каждая полка которого превосходит толщину защитного слоя на 50–60 %. Такая величина принята для того, чтобы не произошло скалывания и смятия бетона под всей площадью уголков.

Поперечное сечение арматуры найдем из условия:

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq R \cdot \gamma_c \rightarrow A = \frac{N}{R \cdot \gamma_c} = \frac{810,31 \text{ кН}}{230 \text{ МПа} \cdot 1} = 35,23 \text{ см}^2.$$

Для создания преднапряжения используем 4 стержня (по два с каждой стороны) 4Ø36 А300 с площадью сечения одного стержня, равной 10,18 см<sup>2</sup> (P=7,99 кг). Примем равнополочные уголки размером 120×8 (P=15 кг) для обрамления консоли площадью сечения, равной 18,8 см<sup>2</sup>. В качестве соединительных пластин примем листовой металл толщиной 8 мм и шириной 100 мм.

Таким образом, общая масса металла для усиления равна:

$$\begin{aligned} M_{\text{мет}} &= L_{\text{арм}} \cdot P_{\text{арм}} + L_{\text{угол}} \cdot P_{\text{угол}} + M_{\text{лист}} = \\ &= 11,22 \cdot 7,99 + 5,68 \cdot 15 + 51,75 = 0,226 \text{ т.} \end{aligned}$$

### Бетонирование подконсольной части

Устройство данного способа усиления предполагает использование бетона и стали. В качестве рабочей арматуры примем 4Ø22 А300 [16]. Длина стержней соответствует высоте колонны от пола до наклонной грани консоли.

$$\text{Расход бетона: } V_{\text{бет}} = L \cdot b \cdot h = 14,2 \cdot 0,48 \cdot 0,64 = 4,36 \text{ м}^3.$$

$$\text{Расход металла: } M_{\text{мет}} = L \cdot P \cdot h = 14,2 \cdot 2,98 \cdot 4 = 0,169 \text{ т.}$$

### Подведение под подкрановые балки новых стальных колонн

Расчёт металлоёмкости способа подведения под подкрановые балки новых стальных колонн произведем следующим образом: подберем сечение стальных балок из условия продольного сжатия, а затем зададим шаг связей стоек между собой и колонной и проверим устойчивость данных стоек.

Поперечное сечение стоек, принятое квадратным [42], найдём из условия:

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq R \cdot \gamma_c \rightarrow A = \frac{N}{R \cdot \gamma_c} = \frac{810,31 \text{ кН}}{230 \text{ МПа} \cdot 1} = 35,23 \text{ см}^2$$

Примем две квадратные стойки 100×5 с площадью поперечного сечения каждой 17,9 см<sup>2</sup>. Примем количество связей, равным 3.

Геометрическая и расчётная длина опорного раскоса в плоскости фермы равна  $\mu=1$   $\ell = 16/3 = 5,3$  м;  $\ell_{ef} = \mu \cdot \ell = 530$  см.

$$\lambda_x = \frac{\ell_{ef}}{i_x} = \frac{530}{38,1} = 13,91 < 60 ; \lambda = 0,95.$$

Коэффициент устойчивости  $\varphi$  находим по приведённой гибкости

$$\bar{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 13,91 \sqrt{\frac{230}{206000}} = 0,46 < 2,5,$$

тогда по формуле:

$$\varphi = 1 - 0,066 \cdot \bar{\lambda} \cdot \sqrt{\bar{\lambda}} = 1 - 0,066 \cdot 0,46 \cdot \sqrt{0,46} = 0,98;$$

$$N < F = \gamma \cdot \varphi_{\min} \cdot R_y \cdot A \Rightarrow N_{1-3} = 405,16 >$$

$$> F = 0,95 \cdot 0,98 \cdot 230 \cdot 17,9 = 383,29 \text{ кН.}$$

Примем две квадратные стойки 100х6 с площадью поперечного сечения каждой  $21\text{см}^2$ . Проверяем прочность:

$$N < F = \gamma \cdot \varphi_{\min} \cdot R_y \cdot A \Rightarrow N_{1-3} = 405,16 <$$

$$< F = 0,95 \cdot 0,98 \cdot 230 \cdot 21 = 449,67 \text{ кН.}$$

Прочность обеспечена.

Общий расход металла будет складываться из массы стоек и массы связей. Связи примем из равнополочных уголков 50х3. Так как нарушение целостности колонны для установки связей (приварка к рабочей арматуре) недопустимо, то связи прикрепим путем обхватывания тела колонны.

Расход металла равен:

$$M_{\text{мет}} = L_{\text{ст}} \cdot P_{\text{ст}} \cdot n_{\text{ст}} + L_{\text{уг}} \cdot P_{\text{уг}} \cdot n_{\text{уг}} = 16 \cdot 16 \cdot 2 + 3,33 \cdot 2 \cdot 3 = 537 \text{ кг} = 0,54 \text{ т.}$$

Расход бетона для усиления одной консоли колонны указан разработчиками и составляет  $0,03 \text{ м}^3$ .

### Усиление консолей колонн углепластиком

В качестве материала для усиления консолей колонн примем холст композитного материала SikaWrap 530 C (SikaWrap 530 C шириной 0,3 м, длиной 50 м) и эпоксидный клей Sikadur 330. Расход на слой грунтовки по грубой поверхности –  $0,5\text{--}1 \text{ кг/м}^2$ , а расход для пропитки на каждый слой  $0,85\text{--}1 \text{ кг/м}^2$ . По технологии усиления (п.1.4) необходимо 1 слой грунтовки и 2 слоя пропитки эпоксидного клея.

Таким образом, на  $1 \text{ м}^2$  усиливаемой поверхности необходимо минимум  $0,5 + 0,85 \cdot 2 = 2,2$  кг эпоксидного клея Sikadur 330. В соответствии с требованиями производителя минимальный нахлест при наклеивании углеткани SikaWrap® в направлении волокон должен быть 150 мм [43].



В соответствии с размерами экспериментальной консоли колонны перейдем к размерам консоли на реальном объекте (с учетом масштабирования 1:4):

$$0,33 \cdot 4 = 1,32; 0,45 \cdot 4 = 1,8; 0,16 \cdot 4 = 0,64$$

Площадь углеткани без учета нахлеста  $1,32 \cdot 1,8 \cdot 2 + 1,32 \cdot 0,64 \cdot 2 = 6,44 \text{ м}^2$

Длина одной полосы с учетом нахлеста  $1,8 \cdot 2 + 0,64 \cdot 2 + 0,15 = 5,03 \text{ м}$ .

Площадь углеткани с учетом нахлеста  $5,03 \cdot 5 \cdot 0,3 = 7,55 \text{ м}^2$ .

Таким образом, необходимо  $2,2 \cdot 6,44 = 14,17 \text{ кг}$  эпоксидного клея Sikadur 330 и  $7,55 \text{ м}^2$  углеткани SikaWrap 530 C.

### Способ усиления консолей колонн, предложенный I.Tups

Оценка материалоемкости данного способа носит приближенный характер, т.к. в первоисточнике не обнаружено рекомендаций по расчёту данной обоймы. Поэтому общая материалоемкость будет определяться исходя из толщины металлических пластин (8 мм), которые охватывают колонну по всему контуру, и массы уголков обрамления (80×5) по нижней части колонны.

Расход металла:

$$M_{\text{мет}} = A_{\text{пл}} \cdot t_{\text{пл}} \cdot M_{\text{об.мет}} + L_{\text{уг}} \cdot P = (1,16 \cdot 2 + 0,48 \cdot 2) \cdot 0,008 \cdot 7850 + 3,88 \cdot 11 = 0,248 \text{ т.}$$

### Балансирные устройства

Расчёт материалоемкости способа восстановления работоспособности консолей колонн с использованием балансирных устройств выполним по следующему алгоритму.

#### ***Расчёт прочности конструкции усиления железобетонных консолей колонн. Рекомендации по конструированию***

#### **Назначение предварительных размеров конструкции**

Для назначения предварительных размеров конструкции балансирного устройства, состоящего из центратора, управляющих рычагов, опорной балки составного сечения, соединительных пластин, тяг и болтов, необходимы данные натурных замеров конструкции. При этом следует учитывать тот факт, что необходимо убрать защитный слой по контуру консоли колонны, и это будет вносить существенные коррективы в размеры конструкции восстановления работоспособности. На рис. 5.1 показана конструкция балансирного устройства, позволяющего полностью воспринимать  $D_{\text{max}}$  и  $M_{\text{max}}$ , и передать эти воздействия на стержень колонны с минимальным эксцентриситетом вблизи грани колонны. Аварийная консоль полностью разгружается от  $D_{\text{max}}$  и  $M_{\text{max}}$ . Аварийное состояние консоли колонны ликвидируется.



## Расчёт конструкции балансирующего устройства

Используем известные нам размеры консоли колонны в плане (натурное обследование) и эмпирические данные для назначения зависимостей расчётных размеров от известных параметров консоли. Используем размер консоли  $h$  и  $b$  для назначения всех размеров обоймы. Для расчета основных конструкций произведем расчет следующих величин на основе экспериментальных данных:  $l_{\text{цент}}=2,7 \cdot h$ ;  $l_{\text{опор}}=2,7 \cdot h$ ;  $e_1=0,375 \cdot h$ ;  $e_2=0,05 \cdot b$ ;  $e_3=0,58 \cdot h$ ;  $l_{\text{рычагов упр}}=1,25 \cdot b$ . Расчётные коэффициенты получены эмпирическим путем.

### Расчёт пары рычагов управления

Расчётная схема рычагов управления представлена на рис. 5.2.

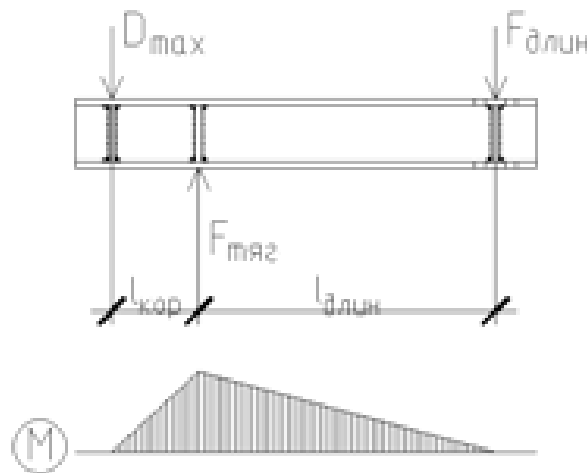


Рис. 5.2. Расчётная схема рычагов управления

Найдем опорную реакцию центратора

$$\sum F_{\text{тяги}} = D_{\text{max}} + F_{\text{длин}},$$

где  $D_{\text{max}}$  – опорная реакция двух смежных подкрановых балок, передаваемая на аварийную консоль колонны.

Опорные реакции опорной балки  $F_{\text{длин}} = D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин}}}$

Максимальный изгибающий момент в паре рычагов управления равен

$$M = D_{\text{max}} \cdot l_{\text{кор}}.$$

Требуемый момент сопротивления двух рычагов

$$W_x = \frac{M}{\gamma R_y}.$$

## Расчёт центратора

Расчётная схема центратора представлена на рис. 5.3.

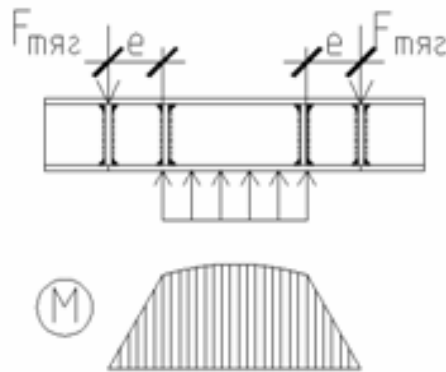


Рис. 5.3. Расчётная схема центратора при условии, что опорная реакция по всей площади контакта равномерна

Для подбора поперечного сечения центратора находим значение внешней силы

$$2F_{\text{тяги}} = D_{\text{max}} + 2F_{\text{длин}} \rightarrow 2F_{\text{длин}} = 2F_{\text{тяги}} - D_{\text{max}}.$$

Опорная реакция от опорной балки  $F_{\text{длин}} = D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин}}}$ .

Найдём значение момента внешней силы

$$M = \sum F_{\text{тяги}} \cdot e = \left( D_{\text{max}} + D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин}}} \right) \cdot 0,375 \cdot h.$$

Требуемый момент сопротивления  $W_x = \frac{M}{\gamma R_y}$ .

Расчёт тяг, соединяющих центратор с парой рычагов управления:

Для удобства монтажа с каждой стороны консоли примем подвески из четырёх шпилек М24 (сталь 40Х "Селект") [44], то есть, по четыре шпильки для подвески к каждому концу центратора. По такой же схеме рассчитываем болтовое соединение управляющих рычагов и опорной балки.

Проверка прочности тяжей на растяжение

$$\sigma = \frac{D_{\text{max}}}{\sum A_{\text{нетто}}} \leq \gamma R_y \Rightarrow \sum A_{\text{нетто}} = \frac{D_{\text{max}}}{\gamma R_y},$$

где  $D_{\text{max}}$  – максимальная опорная реакция от колес крана;  $\sum A$  – суммарная площадь болтов;  $R_y$  – расчётное сопротивление болтов на растяжение.

Расчёт пластин соединения центратора с рычагами управления  
 Расчётная схема соединительной пластины представлена на рис. 5.4.

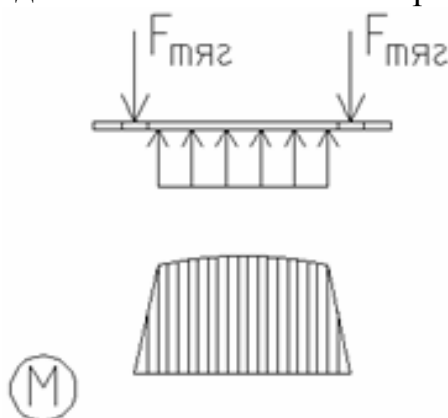


Рис. 5.4. Расчётная схема шайбы, взаимодействующей с центратором

Для подбора поперечного сечения шайбы величина внешней силы:

$$F_{\text{тяг}} = D_{\text{max}} + F_{\text{длин.}}$$

Опорная реакция от опорной балки  $F_{\text{длин.}} = D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин.}}}$ .

Момент внешней силы равен

$$M = \sum F_{\text{тяг}} \cdot e_3 = \left( D_{\text{max}} + D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин.}}} \right) \cdot 0,05 \cdot b.$$

Требуемый момент сопротивления  $W_x = \frac{M}{\gamma R_y}$ .

### Проверка бетона под центратором на смятие

Расчётная схема смятия бетона под центратором приведена на рис. 5.5.

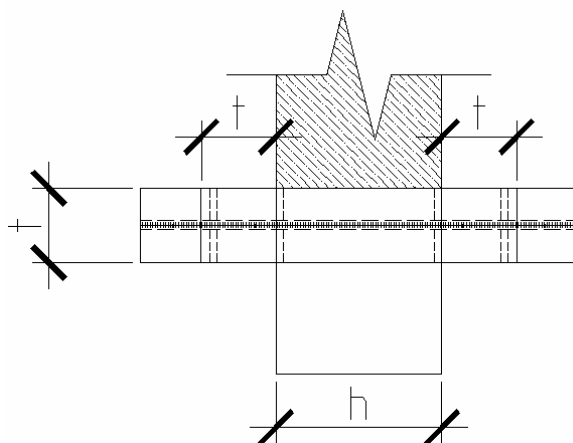


Рис. 5.5. Расчётная схема смятия бетона под центратором

При расчёте на местное сжатие (смятие) элементов без поперечного армирования должно выполняться условие:

$$N \leq \psi R_{b,loc} A_{l,loc},$$

$$\sigma_{см} = \frac{\sum N_{тяг}}{A_{см}} < R_{бсм},$$

где  $N$  – продольная сжимающая сила от местной нагрузки;  $A_{loc}$  – площадь смятия;  $\psi$  – коэффициент, принимаемый равным 1,0 при равномерном и 0,75 при неравномерном распределении местной нагрузки по площади смятия;  $R_{b,loc}$  – расчётное сопротивление бетона смятию, определяемое по формуле

$$R_{b,loc} = \varphi_b R_b,$$

$$\varphi_b = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{A_{b,max}}{A_{b,loc}}}$$

принимается равным не более 2,5 и не менее 1, где  $A_{b,max}$  – максимальная расчётная площадь, устанавливаемая по следующим правилам: центры тяжести  $A_{b,max}$  и  $A_{b,loc}$  совпадают; границы расчетной площади  $A_{b,max}$  отстоят от каждой стороны  $A_{b,loc}$  на расстоянии, равном соответствующим размерам этих сторон.

### Расчёт опорной балки

Так как опорная балка имеет составное сечение и состоит из нижней домкратной балки, вертикальных упоров и верхней горизонтальной опорной балки, при этом эксперимент показал, что самой напряжённой является домкратная балка, то расчёт будем производить для неё, а остальные элементы для удобства монтажа и унификации элементов примем аналогичными (рис. 5.6).

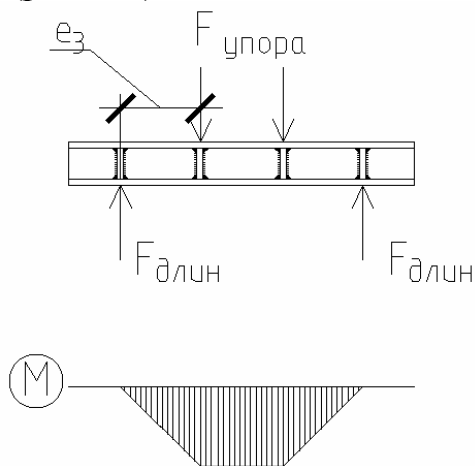


Рис. 5.6. Расчётная схема опорной балки с тыльной стороны консоли

Опорная реакция от опорной балки  $F_{\text{длин}} = D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин}}}$ .

Изгибающий момент в опорной балке

$$M = \sum F_{\text{длин}} \cdot e_3 = D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин}}} \cdot 0,58 \cdot h.$$

Требуемый момент сопротивления  $W_x = \frac{M}{\gamma R_y}$ .

### Расчёт устойчивости стоек опорной балки

Найдем геометрическую и расчётную длину стоек опорной балки

$$\mu=1 \quad l = l_b - 2 \cdot h_{\text{опор}}; \quad \ell = \mu \cdot l = l_b - 2 \cdot h_{\text{опор}}$$

$$\lambda_x = \frac{\ell_{ef}}{i_x}$$

Коэффициент продольного изгиба  $\varphi$  находим по приведённой гибкости

$$\bar{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{\frac{R_y}{E}}$$

по формулам  $\varphi = 1,46 - 0,34 \cdot \bar{\lambda}_x + 0,021 \times \bar{\lambda}_x^2$ .

$$N < F = \gamma \cdot \varphi_{\text{min}} \cdot R_y \cdot A \Rightarrow N_{1-3}.$$

После подсчёта всех требуемых моментов сопротивления, проверок прочности на смятие и подбора сечения болтов по сортаменту металлопроката, подбираем сечения элементов конструкции. Для центраторной балки и задней верхней опорной балки рекомендуется применять сечения замкнутых типов, так как они обладают большей жёсткостью, нежели открытые сечения. Аналогичные данные были получены в ходе экспериментального исследования, которое показало эффективность закрытого сечения в опорной балке.

Все остальные элементы конструкций, по усмотрению проектировщика, можно назначать либо коробчатого, либо двутаврового профиля. Двутавровый профиль более удобен при использовании схемы подвеса рычага управления к центратору и опорной балке, так как болты проходят в полке этих балок. При этом использование коробчатого сечения более эффективно.

### Назначение генеральных размеров конструкции балансирного устройства

Для окончательного назначения размеров обоймы рассчитаны и подобраны все необходимые величины. Используя рис. 5.1, назначим

генеральные размеры балансирующего устройства. Из рис. 5.1 очевидно, что генеральные размеры центратора и рычагов управления

$$l_{\text{рычага упр}} = b + C + b_{\text{опор}} + l_1,$$

$$l_{\text{цент}} = l_{\text{опор}} = h + 2 \cdot b_{\text{рычага упр}} + 4 \cdot C + l_1.$$

Назначения габаритных размеров пластины:

$$b_{\text{пл}} = b_{\text{рычага упр}} + 2 \cdot b_1 + 2 \cdot b_2,$$

$$l_{\text{пл}} = b_{\text{цент}} + 2 \cdot e_2 + 2 \cdot b_3.$$

Назначения длины болтов соединения рычагов управления и задней опорной балки:

$$l_{\text{болт}} = b_{\text{рычага упр}} + b_{\text{опор}} + l_2.$$

Назначения длины тяжей соединения рычагов управления и центратора:

$$l_{\text{тяг}} = h_{\text{рычага упр}} + h_{\text{центр}} + l_2,$$

где  $h$  – ширина колонны в плане;  $C$  – расстояние от рычага управления до консоли колонны,  $C = 0,3b_{\text{рычага упр}}$ ;  $b_{\text{опор}}$  – ширина опорной балки, принимаемая по расчёту;  $b$  – длина консоли в плане;  $b_{\text{рычага упр}}$  – ширина рычага управления, принимаемая по расчёту;  $l_1$  – длина свободных концов центратора, принимается по 100–140 мм от каждого из концов;  $b_1$  – расстояние от грани управляющего рычага до центра болта, равное диаметру болта;  $b_2$  – расстояние от центра болта до края пластины, равное диаметру болта;  $b_3$  – расстояние от центра болта до края пластины, равное диаметру болта;  $e_2$  – эксцентриситет приложения силы,  $e_2 = 0,05b$ .

### Расчёт пары рычагов управления

Расчётная схема рычагов управления представлена на рис. 5.2.

$$\sum F_{\text{тяг}} = D_{\text{max}} + F_{\text{длин}} = 810,31 + 233,83 = 1044,14 \text{ кН},$$

где  $D_{\text{max}}$  – опорная реакция двух смежных подкрановых балок, передаваемая на аварийную консоль колонны.

Опорные реакции опорной балки:

$$F_{\text{длин}} = D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин}}} = 810,31 \frac{40,4}{140} = 233,83 \text{ кН}.$$

Максимальный изгибающий момент в паре рычагов управления

$$M = D_{\text{max}} \cdot l_{\text{кор}} = 810,31 \cdot 40,4 = 32756,52 \text{ кН см}.$$



Требуемый момент сопротивления двух рычагов:

$$W_x = \frac{M}{\gamma \cdot R_y} = \frac{32756,52}{230 \cdot 1} = 142,33 \text{ см}^3.$$

Примем каждый из рычагов управления из трубы квадратной в сечении  $125 \times 6$  ( $W_x=98,6 \text{ см}^3$ ).

Масса металла для рычагов управления равна:

$$M_{\text{рыч}} = L \cdot P \cdot n = 2,18 \cdot 21 \cdot 2 = 0,092 \text{ т.}$$

### Расчёт центратора

Расчётная схема центратора представлена на рис. 5.3.

Для подбора поперечного сечения центратора значение внешней силы

$$\sum F_{\text{тяг}} = D_{\text{max}} + F_{\text{длин}} = 810,31 + 233,83 = 1044,14 \text{ кН.}$$

Опорная реакция от опорной балки

$$F_{\text{длин}} = D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин}}} = 810,31 \frac{40,4}{140} = 233,83 \text{ кН.}$$

Момент внешней силы

$$\begin{aligned} M &= \sum F_{\text{тяг}} \cdot e = \left( D_{\text{max}} + D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин}}} \right) \cdot 0,375 \cdot h = \\ &= 1044,14 \cdot 0,375 \cdot 64 = 25059,36 \text{ см.} \end{aligned}$$

Требуемый момент сопротивления

$$W_x = \frac{M}{\gamma \cdot R_y} = \frac{25059,36}{230 \cdot 1} = 108,95 \text{ см}^3$$

Примем центратор из трубы квадратной в сечении  $125 \times 7$  ( $W_x=110 \text{ см}^3$ ).

$$M_{\text{цент}} = L \cdot P = 1,7 \cdot 24 = 0,041 \text{ т.}$$

Расчёт пластин соединения центратора с рычагами управления

Расчётная схема соединительной пластины представлена на рис. 5.4.

Для подбора поперечного сечения центратора найдём значение внешней силы:

$$\sum F_{\text{тяг}} = D_{\text{max}} + F_{\text{длин}} = 810,31 + 233,83 = 1044,14 \text{ кН.}$$

Опорная реакция от опорной балки

$$F_{\text{длин}} = D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин}}} = 810,31 \frac{40,4}{140} = 233,83 \text{ кН}$$

Момент внешней силы

$$M = \sum F_{\text{тяг}} \cdot e_3 = \left( D_{\text{max}} + D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин}}} \right) \cdot 0,5 \cdot b = \\ = 1044,14 \cdot 0,5 \cdot 182 = 9501,67 \text{ см.}$$

Требуемый момент сопротивления

$$W_x = \frac{M}{\gamma \cdot R_y} = \frac{9501,67}{230 \cdot 1} = 41,31 \text{ см}^3.$$

Для соединительных пластин примем размер поперечного сечения равный 230×180×30 мм.

$$M_{\text{пл}} = V \cdot M_{\text{ст}} \cdot P \cdot n = 2,18 \cdot 21 \cdot 4 = 0,039 \text{ т.}$$

### Расчёт опорной балки

Опорная реакция от опорной балки

$$F_{\text{длин}} = D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин}}} = 810,31 \frac{40,4}{140} = 233,83 \text{ кН.}$$

Изгибающий момент в опорной балке

$$M = F_{\text{длин}} \cdot e_3 = D_{\text{max}} \frac{l_{\text{кор}}}{l_{\text{длин}}} \cdot 0,5 \cdot h = \\ 233,83 \cdot 0,58 \cdot 64 = 8679,77 \text{ кН·см.}$$

Требуемый момент сопротивления

$$W_x = \frac{M}{\gamma \cdot R_y} = \frac{8679,77}{230 \cdot 1} = 37,73 \text{ см}^3.$$

Примем опорную балку из трубы квадратной в сечении 90×5 ( $W_x=40,9 \text{ см}^3$ ).

$$M_{\text{опор}} = L \cdot P \cdot n = 3,2 \cdot 12 = 0,038 \text{ т.}$$

Таким образом, общий расход стали на балансирное устройство составляет

$$M_{\text{мет}} = M_{\text{рыч}} + M_{\text{цент}} + M_{\text{пл}} + M_{\text{опор}} = 0,092 + 0,041 + 0,039 + 0,038 = 0,210 \text{ т.}$$

## Сталетрубобетонная обойма

### Рекомендации по конструированию сталетрубобетонной обоймы.

Генеральные размеры конструкций стальной обоймы необходимо назначать в соответствии с размерами поперечного сечения железобетонных консолей. В расчётное сечение попадают такие элементы обоймы, как соединительные уголки (верхние и нижние) и боковые накладки. Расчётное сечение показано на рис.5.7.

Для выбора поперечных размеров конструкции восстановления работоспособности необходимо учитывать размеры глубинного вибратора или виброрейки, т.е. поперечный размер складывается из поперечного размера колонны ( $h$ ) и двух минимальных диаметров булавки или рейки ( $d_r$ ) (рис.5.8).

Габаритные размеры обоймы должны быть больше размеров колонны, в плане на величину как минимум 30...40 мм с каждой стороны, так как необходимо учитывать, что обойма охватывает аварийную консоль по контуру вкруговую. Зазор между обоймой и консолью должен быть достаточен для уплотнения бетона глубинным вибратором (то есть 70...80 мм). Если уплотнять бетон внешним вибрированием, сообщая обойме колебания, то зазор может быть уменьшен до 30...40 мм, но не менее. Торцевое обрамление выбрано из прокатных швеллеров ввиду легкости монтажа. Применение такого обрамления возможно при ширине колонны до 30 см (существующий сортамент). Более удобным и эффективным является применение торцевого обрамления из свальцованных элементов или разрезанных пополам труб круглых в сечении. Такое обрамление позволяет охватить самые большие и мощные консоли. При увеличении высоты сечения обоймы её прочность возрастает пропорционально квадрату расстояния до центра тяжести.

Для расчёта материалоемкости примем следующие размеры элементов поперечного сечения: соединительные уголки 25×5, листовая сталь толщиной 5 мм. Торцевые швеллеры примем гнутыми из листовой стали толщиной 5 мм, высотой 240 см и шириной 90 см (в развертке). Расчёт материалоемкости произведён, исходя из эмпирических данных.

Таким образом, общий расход стали на сталетрубобетонную обойму составляет:

$$M_{\text{мет}} = M_{\text{шв}} + M_{\text{уг}} + M_{\text{лист}} = 0,17 + 0,012 + 0,060 = 0,241 \text{ т.}$$

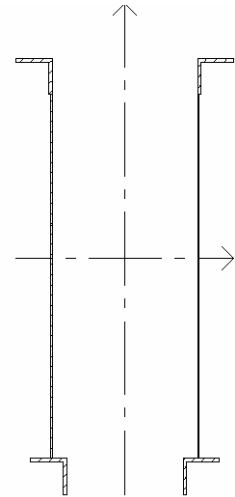


Рис.5.7.  
Расчётное  
поперечное  
сечение

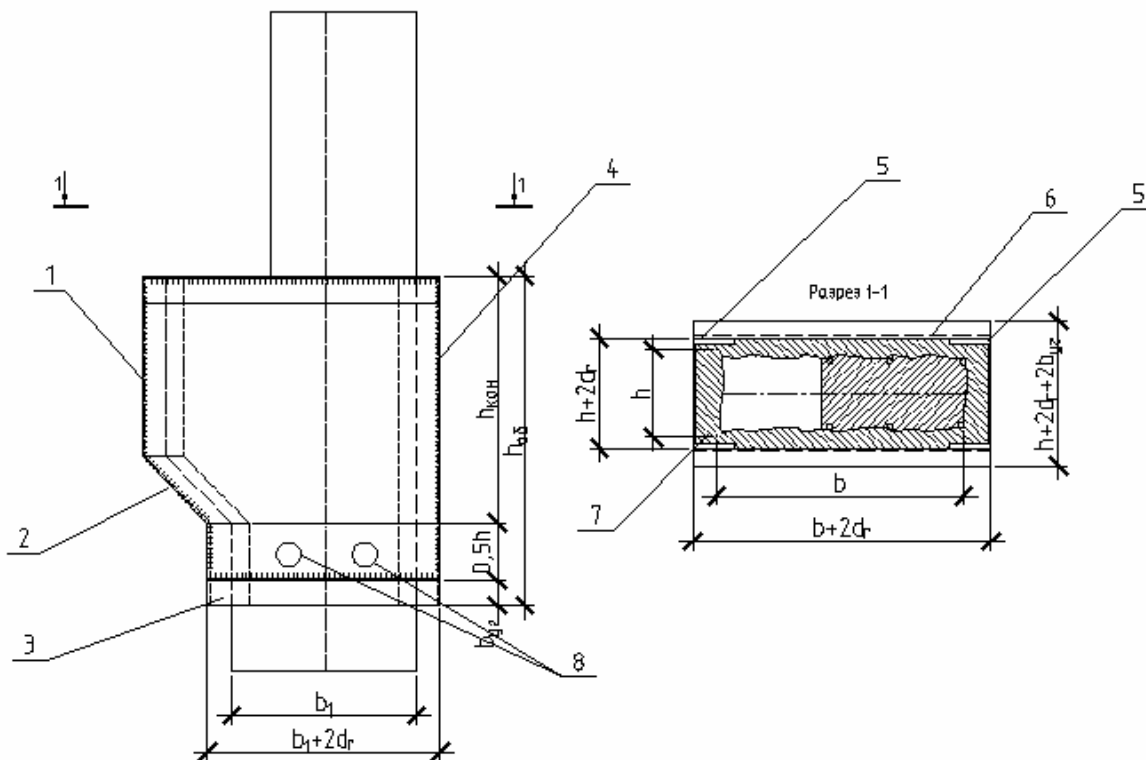


Рис.5.8. Генеральные размеры стальной замкнутой обоймы:  
 1 – передняя грань обоймы со стороны подкрановой балки; 2 – наклонная грань консоли; 3 – нижние окантовочные уголки; 4 – тыльная грань обоймы;  
 5 – обрамление из швеллеров; 6 – верхние окантовочные уголки;  
 7 – мелкозернистый расширяющийся бетон; 8 – патрубki

## 5.2. Расчёт трудоёмкости способов усиления консолей колонн

Расчет трудоёмкости проведем в соответствии с ГЭСН Сборник № 46 – «Работы при реконструкции зданий и сооружений» [45] и ГЭСН Сборник № 13 – «Защита строительных конструкций и оборудования от коррозии» [46]. Для определения трудоёмкости выбраны следующие определители:

1. Усиление монолитными железобетонными обоймами [45]:
  - затраты труда рабочих – 98,38 чел/ч на  $1 \text{ м}^3$ ;
  - машины и механизмы – 2,82 маш/ч на  $1 \text{ м}^3$ .
2. Усиление железобетонных колонн стальными обоймами [45]:
  - затраты труда рабочих – 50,13 чел/ч на 1 т;
  - машины и механизмы – 12,36 маш/ч на 1 т.
3. Обетонирование металлических элементов, заполнением бетоном [45]:
  - затраты труда рабочих – 29,22 чел/ч на  $1 \text{ м}^3$ ;
  - машины и механизмы – 2,76 маш/ч на  $1 \text{ м}^3$ .
4. Очистка поверхности щетками [46]:

– затраты труда рабочих – 0,9 чел/ч на 1 м<sup>2</sup>.

5. Огрунтовка бетонных и оштукатуренных поверхностей битумной грунтовкой (первый слой) [46]:

– затраты труда рабочих – 7,45 чел/ч на 1 м<sup>2</sup>;  
– машины и механизмы – 1,15 маш/ч на 1 м<sup>2</sup>.

6. Огрунтовка бетонных и оштукатуренных поверхностей грунт-шпатлевкой ЭП-0010 (первый слой/ последующий слой) [46]:

– затраты труда рабочих – 5,24 /5,22 чел/ч на 1 м<sup>2</sup>;  
– машины и механизмы – 1,15 /1,15 маш/ч на 1 м<sup>2</sup>.

7. Оклейка поверхностей стеклотканью на эпоксидной шпатлевке в 1 слой по бетонной поверхности [46]:

– затраты труда рабочих – 1,5 чел/ч на 1 м<sup>2</sup>;  
– машины и механизмы – 0,05 маш/ч на 1 м<sup>2</sup>.

Трудоёмкость выполнения усиления углепластиком составляет:  
затраты труда рабочих

$$0,9+7,45+5,24+5,22+1,5=20,31 \text{ чел/ч на } 1 \text{ м}^2;$$

машин и механизмов

$$1,15+1,15+1,15+0,05=3,5 \text{ маш/ч на } 1 \text{ м}^2.$$

Расчёт производился путем умножения объёмов на соответствующий определитель. Для определения трудоёмкости способа подведения новых колонн под подкрановые балки [3] использовались данные из первоисточника. Расчёт носит приблизительный характер, так как для большинства рассматриваемых способов отсутствуют методики точного расчета и подбора поперечного сечения. Сводные данные по материалоемкости и трудоёмкости представлены в табл. 5.1. Кроме показателей материалоемкости и трудоёмкости в рамках проведения технико-экономического анализа, выделены следующие критерии: необходимость остановки основного процесса производства, выполнение дополнительных работ, осложнения эксплуатации, возникающие при использовании различных способов усиления консолей колонн (табл.5.1).

Анализ табл. 5.1 показывает, что большинство способов соизмеримы как по материалоемкости, так и по трудоёмкости. Предложенные способами имеют приемлемую трудоёмкость, особенно это касается балансирных устройств. Способ восстановления работоспособности консолей колонн с использованием сталетрубобетонных обойм предполагает несколько большую трудоёмкость по сравнению с балансирными устройствами (за счет необходимости заполнения бетоном), которая компенсируется высокой прочностью при сопоставимых затратах стали на конструкции.

Таблица 5.1

## Технико-экономические показатели

Способ усиления	Расход металла, т	Расход бетона, м <sup>3</sup>	Трудоёмкость, чел-ч (маш-ч)	Остановки производства	Дополнительные работы	Осложнения эксплуатации
Усиление консолей колонн преднапряжёнными затяжками	0,226	–	11,32 (2,8)	да	Выравнивание поверхностей для уголков, восстановление зоны опирания подкрановой балки	Периодическое восстановление величин преднапряжения арматуры
Бетонирование подкрановой части	0,17	4,36	428,94 (14,4)	да	–	Увеличение сечения колонны
Подведение подкрановых балки новых стальных колонн	0,54	0,03	13,72 (2,82)	нет	Разборка пола до обреза фундамента, крепление стоек к фундаменту	Увеличение сечения колонны
Усиление углепластиком	Расход материала: эпоксидного клея – 14,18 кг, углеткани – 7,55 м <sup>2</sup>		20,31 (3,5)	нет	Восстановление зоны опирания подкрановой балки	–
Способ усиления консолей, предложенный I. Tups	0,248	–	12,43 (3,065)	да	Восстановление зоны опирания подкрановой балки	Возможны крены всей обоймы
Балансирные устройства (авторы)	0,21	–	10,52 (2,6)	нет	–	–
Сталетрубобетонная обойма (авторы)	0,241	0,21	18,21 (3,55)	нет	–	–

Предложенные авторами способы не требуют выполнения дополнительных работ на стадии монтажа и последующей эксплуатации конструкции в отличие от остальных способов, имеющих ряд недостатков, поэтому они вносят коррективы в стоимость устройства и обслуживания конструкций.

Таким образом, способы восстановления работоспособности консолей колонн при помощи балансирных устройств и сталетрубобетонных предварительно напряжённых обоек, помимо эффективности, установленной в ходе проведения экспериментальных исследований, оказались сопоставимыми с существующими способами по материалоемкости и трудоёмкости.

### 5.3. Оценка стоимости выполнения способов усиления консолей колонн

Оценка стоимости выполнения существующих и предложенных авторами способов усиления консолей колонн произведена в ценах по состоянию на начало 2014 года на основании расчёта материало- и трудоёмкости (п.5.2)

Оплата труда рабочих и стоимость использования машин и механизмов приняты в соответствии с выбранными определителями в п.5.2. по ТЕР №13 «Защита строительных конструкций и оборудования от коррозии» [47] и ТЕР №46 «Работы при реконструкции зданий и сооружений» [48]:

1. Усиление монолитными железобетонными обоями [48]:
  - оплата труда рабочих – 773,28 руб. на 1 м<sup>3</sup>;
  - использование машин и механизмов – 147,87 руб. на 1 м<sup>3</sup>.
2. Усиление железобетонных колонн стальными обоями [48]:
  - оплата труда рабочих – 423,1 руб. на 1 т;
  - использование машин и механизмов – 53,47 руб. на 1 т.
3. Обетонирование металлических элементов, заполнением бетоном [48]:
  - оплата труда рабочих – 255,97 руб. на 1 м<sup>3</sup>;
  - использование машин и механизмов – 36,06 руб. на 1 м<sup>3</sup>.
4. Усиление углепластиком [47]:
  - оплата труда рабочих – 210,21 руб. на 1 м<sup>2</sup>;
  - использование машин и механизмов – 29,28 руб. на 1 м<sup>2</sup>.

Стоимость выполнения работ по единичным расценкам при перерасчете в цены 2014 года вычисляется путем умножения на коэффициент, равный 5 (по данным Регионального центра ценообразования в строительстве и промышленности строительных материалов по Пензенской

области на январь 2014 года коэффициент перерасчета составляет от 5 до 5,5). Стоимость 1 тонны металла «в деле» (оплата выполнения работ с учетом стоимости материала) – 65000 рублей. Стоимость бетона класса В15 - 3900 рублей [49].

Стоимость усиления углепластиком состоит из стоимости углеткани и эпоксидного клея. Стоимость одного рулона SikaWrap 530 C размером 0,3 м на 50 м – 46000 рублей (стоимость 1 м<sup>2</sup> - 3066 рублей), стоимость эпоксидного клея Sikadur 330 в банке весом 5 кг – 930 рублей [50].

Выполнение усиления консолей колонн с помощью сталетрубобетонной обоймы помимо использования металла подразумевает применение самонапрягающегося бетона, состоящего из раствора М-150 и расширяющей добавки РД-Н (п.3.8.1). Стоимость 1 м<sup>3</sup> раствора М-150 – 3100 рублей [49]. РД-Н цена мешка весом 20 кг – 387 рублей [51]. На 1 м<sup>3</sup> самонапрягающегося бетона  $4 \cdot 387 + 3100 = 4648$  рублей.

Сводный расчет стоимости выполнения существующих и предложенных авторами способов усиления консолей железобетонных колонн представлен в табл. 5.2.

Анализ табл. 5.2 показывает, что предложенный авторами способ усиления консолей колонн с помощью балансирных устройств требует наименьших финансовых затрат по сравнению с остальными способами. Усиления с помощью сталетрубобетонной обоймы соизмеримо по стоимости с выполнением усиления, предложенного I.Tuns, и усиления преднапряженными затяжками. Выполнение остальных способов предполагает существенно большие затраты денежных средств от 2,5 раз (для балансирных устройств по сравнению с подведением под подкрановые балки новых стальных колонн) до 3,5 раз (для балансирных устройств по сравнению с бетонированием подконсольной части), и от 2 раз (для сталетрубобетонных обойм по сравнению с подведением под подкрановые балки новых стальных колонн) до 2,8 раз (для сталетрубобетонных обойм по сравнению с бетонированием подконсольной части).

Таким образом, технико-экономический анализ показал, что материалоёмкость и трудоёмкость предложенных авторами способов несколько меньше по сравнению с существующими методами, при этом дополнительные работы и осложнения эксплуатации отсутствуют.

Стоимость выполнения существующих способов усиления консолей колонн в большинстве случаев превосходит стоимость выполнения предложенных авторами способов в несколько раз.



Таблица 5.2

## Оценка стоимости выполнения способов усиления консолей колонн

Способ усиления	Стоимость металла «в деле», руб.	Стоимость бетона, руб.	Стоимость работ, кроме работ с металлоконструкциями, руб.	Стоимость использования машин и механизмов, руб.	Итого, руб.
Усиление консолей колонн преднапряжёнными затяжками	$0,226 \times 65000 = 14690$	-	-	-	<b>14690</b>
Бетонирование подконсольной части	$0,17 \times 65000 = 11050$	$4,36 \times 3900 = 17004$	$4,36 \times 773,28 \times 5 = 16857,5$	$4,36 \times 147,87 \times 5 = 3223,57$	<b>48135,07</b>
Подведение под подкрановые балки новых стальных колонн	$0,54 \times 65000 = 35100$	$0,03 \times 3900 = 117$	$0,03 \times 255,97 \times 5 = 38,4$	$0,03 \times 36,06 \times 5 = 5,4$	<b>35260,8</b>
Способ усиления консолей, предложенный Г.Тупс	$0,248 \times 65000 = 16120$	-	-	-	<b>16120</b>
Углепластик	$2,2 \times 6,44 \times 930 + 7,55 \times 3066 = 36325$	-	$6,44 \times 210,21 \times 5 = 6768,76$	$6,44 \times 29,28 \times 5 = 942,82$	<b>44036,58</b>
Балансирные устройства (авторы)	$0,21 \times 65000 = 13650$	-	-	-	<b>13650</b>
Сталетрубобетонная обойма (авторы)	$0,241 \times 65000 = 15665$	$0,21 \times 4648 = 976$	$0,21 \times 255,97 \times 5 = 268,79$	$0,21 \times 36,06 \times 5 = 37,86$	<b>16947,65</b>

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии представлен анализ существующих и исследование предложенных авторами способов по восстановлению работоспособности железобетонных консолей колонн.

Предложен способ усиления консолей колонн для подкрановых балок на основе балансирных устройств, позволяющих полностью разгрузить аварийные консоли. Экспериментально установлена возможность повышения несущей способности консоли колонны от 1,15 до 2,07 раза.

Описан предложенный авторами технологичный способ усиления аварийных консолей колонн с преобразованием их в замкнутые сталетрубобетонные обоймы с эффектом объемного обжатия. Экспериментальное изучение фактической работы обойм при попытке разрушения показало, что колонны, заключённые в обойму, имели значительный запас прочности по сравнению со всей колонной.

Проведено численное моделирование предложенных способов, которое показало, что схема работы конструкции соответствует проведенному физическому эксперименту. Оценено влияние предложенных авторами способов усиления консолей колонны на распределение моментов в поперечной раме.

Установлено, что материалоемкость и трудоёмкость предложенных авторами способов усиления сопоставимы с существующими способами. Стоимость выполнения существующих способов усиления консолей колонн в большинстве случаев превосходит стоимость выполнения предложенных авторами способов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений [Текст] / НИИСК. – М.: Стройиздат, 1989. – 104 с.
2. <http://www.bntu-sf.com/?p=155>
3. Усиление консолей колонн дополнительной опорой [Электронный ресурс] URL: <http://www.bntu-sf.com/?p=156> (дата обращения 26.05.11)
4. Усиление консолей композитными материалами [Электронный ресурс] URL: <http://alexnik.info/2011/04/03/усиление-консолей-композитными-материалами/> (дата обращения 16.08.11).
5. Усиление консолей колонн углеволокном [Электронный ресурс] URL: <http://www.skpraktik.ru/0-19.html> (дата обращения 26.05.11).
6. Усиление консолей колонн углеволокном [Электронный ресурс] URL: [http://azskzs.ru/usilenie\\_stroitelnyh\\_k](http://azskzs.ru/usilenie_stroitelnyh_k) (дата обращения 26.05.11).
7. Усиление консолей колонн углеволокном [Электронный ресурс] <http://www.skpraktik.ru/0-37.html> (дата обращения 15.12.13).
8. Применение углепластиков в строительстве [Электронный ресурс] <http://www.slideshare.net/nanoweek/ss-9392161> (дата обращения 20.12.13).
9. Повышение надежности железобетонных конструкций при ЧС (зарубежный опыт) [Электронный ресурс] [http://www.concrete-union.ru/articles/index.php?ELEMENT\\_ID=5222](http://www.concrete-union.ru/articles/index.php?ELEMENT_ID=5222) (дата обращения 20.12.13).
10. I.Tuns, F.Tămas Aspects regarding diagnosis rehabilitation of an industrial reinforced concrete structure. Bulletin of the Transylvania University of Brasov. Vol.3(52) – 2010.
11. I.Tuns, M.Măntulescu Comparative solution for the rehabilitation of damaged structural elements of reinforced concrete. Proceeding of the 7<sup>th</sup> IASME/WSEAS international Conference on HEAT Transfer, THERMAL ENGINEERING and ENVIRONMENT (HTE 2009).
12. Нежданов К.К., Туманов А.В., Нежданов А.К. Способ усиления железобетонной колонны, утратившей несущую способность [Текст]. Патент России №2274719. Бюлл. №11. Оpubл. 20.04.2006.
13. Беленя, Е.И. Металлические конструкции: Общий курс [Текст]: учебник для вузов / Е.И. Беленя [и др. ]; под ред. Е.И. Беленя. – 6-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 560 с.
14. Баранова, Т.И. Расчетные модели сопротивления срезу сжатых зон железобетонных конструкций [Текст]: учеб. пособие / Т.И. Баранова. – Пенза: ПГУАС, 2006. – 178 с.
15. СНиП 2.03.01–84\*. Бетонные и железобетонные конструкции [Текст]. – М.: Госстрой СССР, 1989г. – 80с.
16. СП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции [Текст]. – М.: ФГУП ЦПП, 2008. – 24с.

- 17 Байков, В.Н. Железобетонные конструкции. Общий курс [Текст]: учеб. для вузов / В.Н. Байков, Э.Е. Сигалов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991. – 767 с.
18. Баженов, Ю.М., Технология бетонов [Текст]: учеб. пособие для технол. спец. строит. вузов / Ю.М. Баженов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш.шк., 1987. – 415 с.
19. Руководство по тезометрированию строительных конструкций и материалов: Отдел научно-технической информации НИИЖБ [Текст]. – М.: Производственные экспериментальные мастерские ЦИНИСа Госстроя СССР, 1971. – 313 с.
20. ГОСТ 2603–79 Реактивы. Ацетон. Технические условия [Текст]. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1976. – 15 с.
21. ГОСТ 12172–74 Клеи фенолополивинилацетальные. Технические условия [Текст]. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1976. – 12 с.
22. Микропроцессорная многоканальная тензометрическая система ММТС–64.01. Руководство по эксплуатации [Текст]. – Нов.: ФГУП «Сибирский НИИ авиации им. С.А. Чаплыгина», 2004. – 58 с.
23. Расширяющая добавка [Электронный ресурс] URL: <http://www.consolit.ru/rd.html> (дата обращения 17.11.2011)
24. SCAD Structure – программы для проектирования стальных и железобетонных конструкций [Электронный ресурс] URL: <http://www.scadgroup.com/> (дата обращения 18.11.2012)
25. ПК ЛИРА-САПР, МОНОМАХ-САПР. Системы Автоматизированного проектирования и расчета зданий [Электронный ресурс] URL: <http://www.rflira.ru/> (дата обращения 18.11.2012)
26. ANSYS – Simulation Driven Product Development [Электронный ресурс] URL: <http://www.ansys.com/> (дата обращения 18.11.2012)
27. NEi Nastran в России и СНГ – Система конечно-элементного анализа CAD/FEA/CAE <http://www.nenastran.ru/> (дата обращения 18.11.2012)
28. Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения [Текст] / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. – 2-е изд., испр. – М.: ЛЕНАНД, 2010. – 456с.
29. Mazen A. Musmar Analysis of Shear Wall with Openings Using Solid65 Element. Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 7, No. 2, 2013
- 30/32. Басов, К.А. ANSYS: справочник пользователя [Текст] / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
31. Жидков, А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования [Текст]: Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике» / А.В. Жидков. – Н. Новгород, 2006. – 115 с.

32. William, K.J. and Warnke, E.P.; (1975); “Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete”. Proceedings of the International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 19, ISMES, Bergamo, Italy, p. 174.
33. von Mises, R. (1913). *Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand*. Göttin. Nachr. Math. Phys., vol. 1, pp. 582–592.
34. Ford, *Advanced Mechanics of Materials*, Longmans, London, 1963
35. Hill, R. (1950). *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford, Clarendon Press
36. D. Kachlakev and T. Miller, *FE Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Lamiates*, Final Report SPR 316, Oregon State University (2001).
37. MacGregor, J.G. (1992), *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
38. Wolanski J.A., *Flexural Behavior of Reinforced and Prestressed Concrete Beams Using Finite Element Analysis*. M. Sov. Diss., Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, USA, 2004.
39. Решение контактных задач в Ansys 6.1 – Cadfem/ М.:Cadfem, 2003. – 138 с.
40. Sura A. Majeed *Finite Element Analysis of Strengthened Reinforced Concrete Beams*. Al-Rafidain Engineering. Vol.21. No. 1. February 2013. p.134-145.
41. Hayder Ala’a Hasan, Ammar A. Abdul Rahman and Hani Aziz Ameen *Finite element analysis of reinforced concrete bridge pier subjected to seismic loading*. AMERICAN JOURNAL OF SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH. 2012, 3(2). p. 94-98.
42. ГОСТ 12336–66 *Сталь холодногнутая. Профили замкнутые сварные квадратные и прямоугольные общего назначения. Сортамент* [Текст]. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1966. – 13 с.
43. Ткань из углеродного волокна SikaWrap – 530 C/105 [Электронный ресурс] URL: <http://www.sika-polo.ru/materials/all?view=article&id=432> (дата обращения 17.01.2014)
44. *Металлические конструкции*. В 3 т. (Справочник проектировщика) [Текст] / под общ. ред. В.В. Кузнецова. – М.: АСВ, 1998.
45. *Государственные элементные сметные нормы на строительные работы. Сб. 46. Работы при реконструкции зданий и сооружений* [Текст]. – М.: Госстрой России, 2000. – 68 с.
46. *Государственные элементные сметные нормы на строительные работы. Сб. 13. Защита строительных конструкции и оборудования от коррозии* [Текст]. – М.: Госстрой России, 2000. – 48 с.
47. *Территориальные единичные расценки на строительные работы. Сб. 13. Защита строительных конструкции и оборудования от коррозии* [Текст]. – М.: Госстрой России, 2000. – 24 с.

48. Территориальные единичные расценки на строительные работы. Сб. 46. Работы при реконструкции зданий и сооружений [Текст]. – М.: Госстрой России, 2000. – 23 с.

49. Бетон-Пенза [Электронный ресурс] URL: <http://beton-penza.ru/> (дата обращения 20.01.2014)

50. Кластер – каталог товаров и услуг. [Электронный ресурс] URL: <http://qlaster.ru> (дата обращения 20.01.2014)

51. Расширяющая добавка [Электронный ресурс] URL: <http://www.consolit.ru/rd.html> (дата обращения 20.01.2014)

ПРИЛОЖЕНИЕ  
РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.  
ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ

Таблица 1П

Показания тензометрических датчиков, наклеенных на рабочую арматуру при испытании модели консоли 1

Сила, кН	Напряжения в зоне тензометрического датчика №, МПа											
	1	2	3	4	6	7	8	9	11	12		
0	-0.34	0.00	-1.02	-0.67	-0.51	-1.52	-0.85	-0.51	-0.85	-0.51	-1.69	
9,81	-0.51	-0.17	-1.18	-0.85	5.07	-7.78	-1.53	0.17	-0.17	0.17	-13.71	
19,62	-1.69	-1.69	-3.22	-2.54	9.13	-1.86	3.73	-0.85	-2.03	-0.85	-15.23	
29,43	-4.06	-3.89	-5.41	-5.08	12.17	-1.52	8.29	-3.20	-4.06	-3.20	-16.76	
39,24	-6.92	-6.77	-8.97	-7.79	16.23	-0.51	13.55	-6.23	-6.76	-6.23	-17.94	
49,05	-7.94	-8.97	-11.34	-9.65	19.95	3.05	18.29	-8.92	-8.61	-8.92	-18.96	
58,86	-10.13	-11.52	-14.38	-12.36	25.19	6.94	27.77	-11.61	-11.32	-11.61	-19.13	
68,67	-11.65	-15.25	-18.61	-15.07	31.44	12.69	37.93	-14.64	-13.51	-14.64	-19.80	
78,48	-13.51	-19.65	-23.18	-18.46	39.05	11.00	52.66	-17.67	-16.56	-17.67	-19.29	
88,29	-15.70	-23.20	-26.90	-20.99	44.46	14.05	61.58	-19.69	-19.09	-19.69	-18.62	
98,1	-12.49	-25.74	-29.94	-22.86	47.85	16.58	67.55	-21.03	-20.78	-21.03	-17.78	
107,91	-13.85	-28.45	-32.82	-24.72	52.06	18.28	73.65	-22.54	-22.47	-22.54	-17.60	
117,72	-14.69	-31.33	-35.70	-25.73	56.13	19.12	79.74	-24.06	-24.32	-24.06	-15.91	
127,53	-15.70	-34.89	-39.75	-26.58	61.37	42.81	86.85	-25.91	-26.35	-25.91	-14.56	
137,34	-15.03	-39.46	-45.17	-26.92	67.96	41.12	95.47	-28.10	-28.38	-28.10	-10.33	
147,15	-15.19	-42.85	-49.57	-26.58	73.70	34.52	102.47	-28.94	-31.08	-28.94	-6.26	
156,96	-11.82	-43.36	-51.09	-24.55	75.73	34.86	105.29	-28.77	-31.59	-28.77	-4.40	
166,77	-4.39	-45.90	-57.69	-20.15	87.73	34.52	119.20	-30.96	-35.98	-30.96	2.54	
176,58	47.95	-42.52	-47.37	45.37	113.11	39.59	138.84	-32.13	-38.01	-32.13	6.94	
186,39	72.44	-43.70	-52.78	62.14	131.48	39.17	150.03	-32.64	-39.19	-32.64	11.34	
196,2	80.54	-49.96	-58.70	64.84	142.48	106.57	158.48	-33.65	-41.04	-33.65	13.54	
206,01	82.91	-60.64	-65.81	66.54	153.03	101.38	165.03	-33.99	-41.22	-33.99	14.73	



## Продолжение приложения

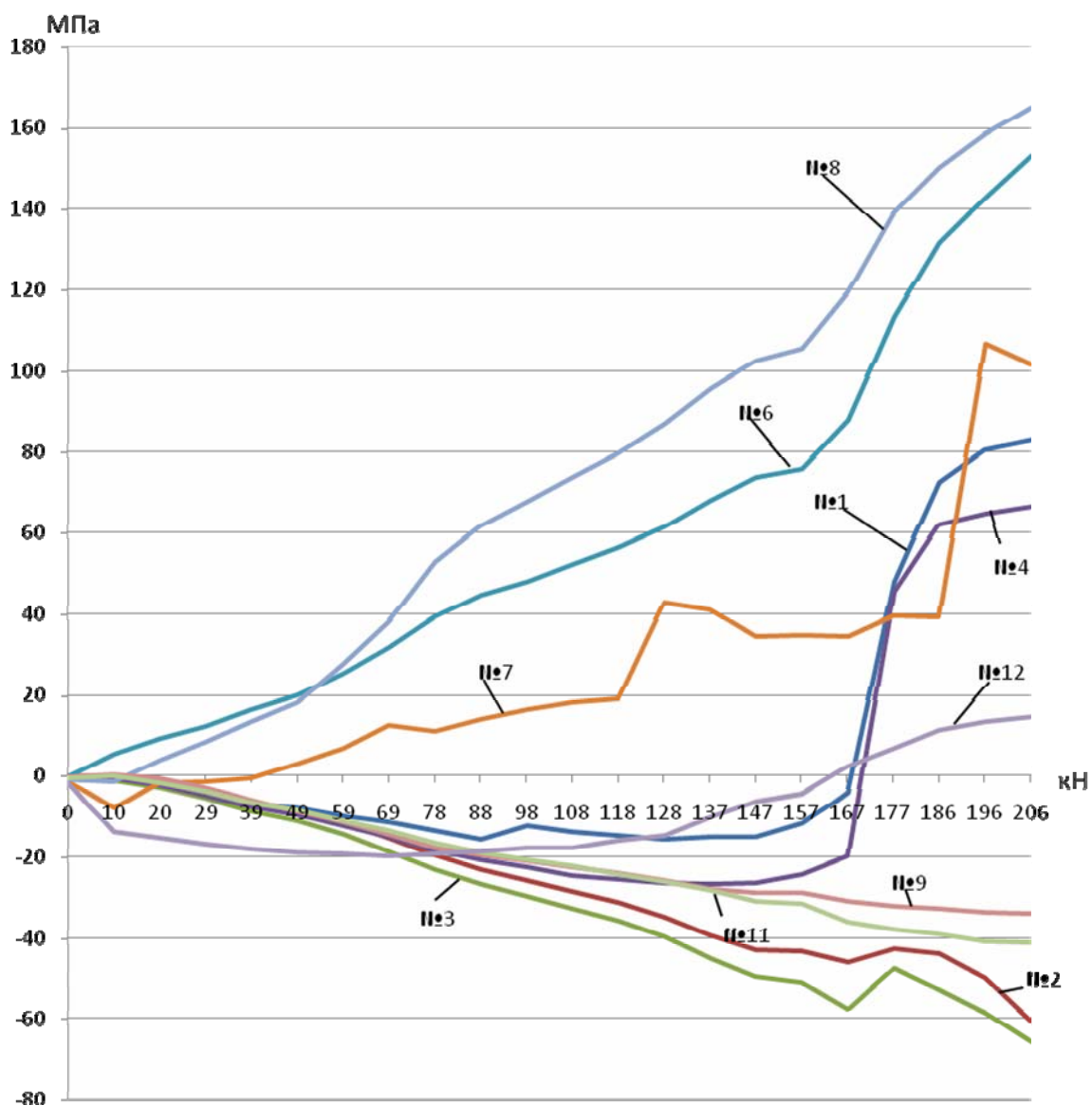


Рис.1П. Изменение напряжений в арматуре в зоне наклейки тензометрических датчиков 1-й консоли

Продолжение приложения

Таблица 2П

Показания тензометрических датчиков при разрушении консоли 2

Сила, кН	Напряжение в зоне тензометрического датчика №, МПа							
	2	4	5	6	7	8	10	12
0	0.17	-1.19	-1.35	0.17	0.00	-0.51	0.17	-1.35
9,81	-2.19	-2.72	-0.17	2.20	-0.85	1.19	0.51	-2.21
19,62	-4.39	-4.07	1.86	5.25	1.02	4.07	0.34	-3.39
29,43	-7.09	-5.43	3.73	9.65	6.96	8.48	1.52	-3.23
39,24	-8.61	-5.94	4.91	12.02	10.52	10.68	-0.34	-3.39
49,05	-10.97	-7.13	6.43	15.07	16.46	14.25	0.17	-3.39
58,86	-12.67	-7.30	7.96	20.31	28.68	19.34	-2.87	-3.90
68,67	-15.70	-8.32	8.97	24.54	37.67	24.60	-3.05	-3.90
78,48	-16.88	-6.46	9.47	27.76	43.27	28.00	-2.87	-4.07
88,29	-19.25	-6.96	9.47	32.50	53.11	32.57	-1.52	-3.39
98,1	-22.12	-11.88	10.16	38.08	59.22	37.33	-1.69	-3.23
107,91	-25.00	-13.24	10.33	44.01	67.70	42.07	-6.09	-3.06
117,72	-27.52	-16.13	9.47	48.92	71.94	44.95	-1.86	-3.23
127,53	-29.72	-17.15	9.82	55.18	77.71	49.37	-0.67	-3.23
137,34	-32.25	-17.99	9.14	61.27	82.81	53.10	0.85	-3.39
147,15	-35.63	-19.36	7.96	68.38	85.86	57.00	-1.18	-3.23

## Продолжение приложения

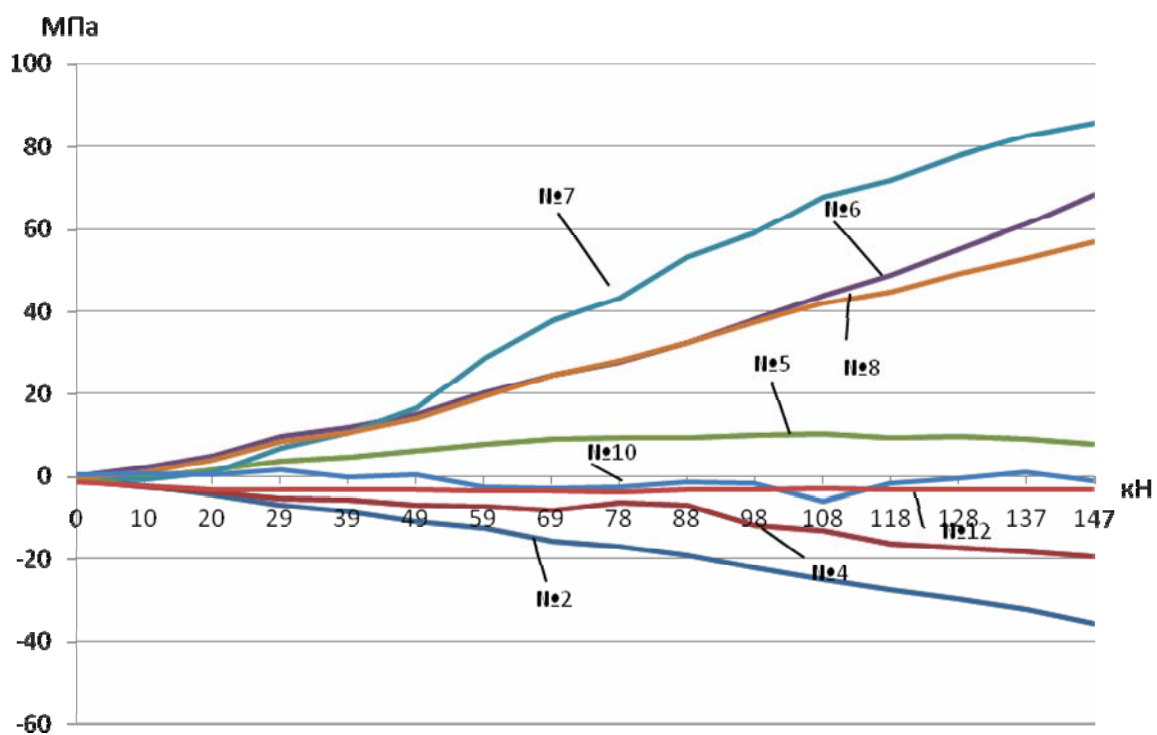


Рис.2П. Изменение напряжений в арматуре в зоне наклейки тензометрических датчиков 2-й консоли

Продолжение приложения  
Таблица 3П

Показания напряжений в зонах наклеек тензорезисторов  
при испытании 1-го варианта усиления модели 1

Сила, кН	Напряжение в зоне тензометрического датчика №, МПа																		
	1	2	5	7	8	9	10	11	14	15	17	18	19						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14						
0	-1.02	-0.17	-0.85	-0.17	-0.51	-0.34	-0.17	-1.02	-1.18	-1.52	-0.51	-0.17	-1.18						
9,81	-2.88	3.06	-0.67	-0.34	1.01	-2.37	-1.52	-0.34	-6.61	3.72	-0.68	0.17	-1.35						
19,62	-6.61	7.80	-1.52	-2.37	2.86	-4.75	-3.72	1.86	-14.57	19.28	1.35	0.85	5.24						
29,43	-9.15	11.87	-0.51	-2.55	4.56	-7.96	-6.94	3.89	-23.89	26.38	-0.17	-0.85	1.35						
39,24	-11.69	15.60	-0.85	-2.88	7.58	-11.35	-10.32	6.43	-31.85	36.52	-1.53	-3.56	-1.18						
49,05	-13.38	17.98	-1.18	-2.55	9.44	-13.88	-12.52	7.96	-34.39	43.29	-3.39	-6.26	-2.03						
58,86	-16.78	20.18	-1.18	-2.72	11.13	-16.59	-15.22	9.47	-38.28	48.86	-5.76	-9.99	-1.86						
68,67	-19.66	21.70	-0.85	-2.21	13.32	-19.65	-17.93	11.17	-43.71	56.81	-8.47	-14.05	-1.69						
78,48	-22.54	23.40	-0.67	-2.04	15.18	-22.36	-20.47	12.36	-46.75	63.58	-10.68	-17.44	-1.18						
88,29	-24.40	23.90	-1.02	-2.37	16.52	-23.88	-21.65	13.70	-49.29	67.98	-11.53	-19.30	-0.85						
98,1	-26.60	25.60	-0.67	-2.55	17.88	-25.91	-23.69	14.72	-50.82	73.05	-12.72	-21.67	0.17						
107,91	-29.82	29.00	-0.67	-2.21	19.89	-28.96	-26.22	16.41	-54.88	82.18	-14.92	-24.38	0.67						
117,72	-32.88	30.69	-0.67	-2.21	20.90	-31.33	-27.91	17.09	-58.10	88.94	-16.45	-27.42	1.02						
127,53	-34.74	32.22	-0.85	-1.86	22.09	-33.02	-29.61	17.94	-61.49	95.75	-18.14	-29.12	1.35						
137,34	-37.63	35.10	-0.67	-2.04	23.60	-34.89	-31.63	18.79	-68.44	105.84	-20.18	-31.83	1.69						
147,15	-40.16	36.62	-0.67	-1.86	25.12	-36.93	-32.82	20.30	-76.23	114.66	-22.55	-34.37	2.03						
156,96	-41.01	37.13	-0.67	-2.21	25.80	-37.93	-33.66	20.64	-79.96	117.84	-24.25	-35.55	2.71						
166,77	-43.22	39.51	-0.51	-1.86	27.82	-40.64	-36.88	22.84	-85.04	128.30	-26.80	-37.93	3.72						
176,58	-44.91	41.21	-0.67	-1.86	29.01	-42.68	-39.59	24.70	711.68	140.03	-29.17	-40.30	4.74						
186,39	-46.44	42.23	-0.85	-2.21	30.69	-45.05	-41.95	26.23	711.68	551.19	-30.86	-41.14	6.76						

Продолжение приложения  
Окончание табл. 3П

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
196,2	-50.33	45.62	-0.85	-1.70	32.88	-47.76	-45.67	28.60	711.68	551.19	-38.33	-43.17	7.61
206,01	-50.50	50.36	-1.18	-1.70	35.41	-50.64	-48.22	30.62	-676.22	551.19	-46.80	-45.88	10.31
215,82	-50.50	56.64	-0.67	-1.70	38.44	-54.36	-51.09	33.00	-676.22	551.19	-54.09	-49.10	13.53
225,63	-51.18	59.68	-1.18	-1.70	39.79	-56.40	-53.96	34.35	-676.22	551.19	-59.01	-51.81	15.22
235,44	-52.54	66.30	-0.51	-2.04	42.15	-58.77	-56.50	36.21	-676.22	551.19	-65.79	-54.86	19.61
245,25	-54.74	75.29	-0.34	-1.86	41.82	-59.45	-60.06	38.92	711.68	551.19	-80.21	-62.64	32.97
255,06	-56.60	83.93	-0.17	-1.86	43.00	-60.29	-63.78	42.64	711.68	551.19	-103.56	-76.19	59.52
264,87	-58.64	88.01	0.51	-1.86	44.34	-61.14	-66.15	44.67	711.68	551.19	-115.66	-83.30	72.37
274,68	-59.65	86.31	1.02	-1.70	37.60	-51.83	-61.24	41.45	711.68	551.19	-152.76	-105.29	118.66

Продолжение приложения

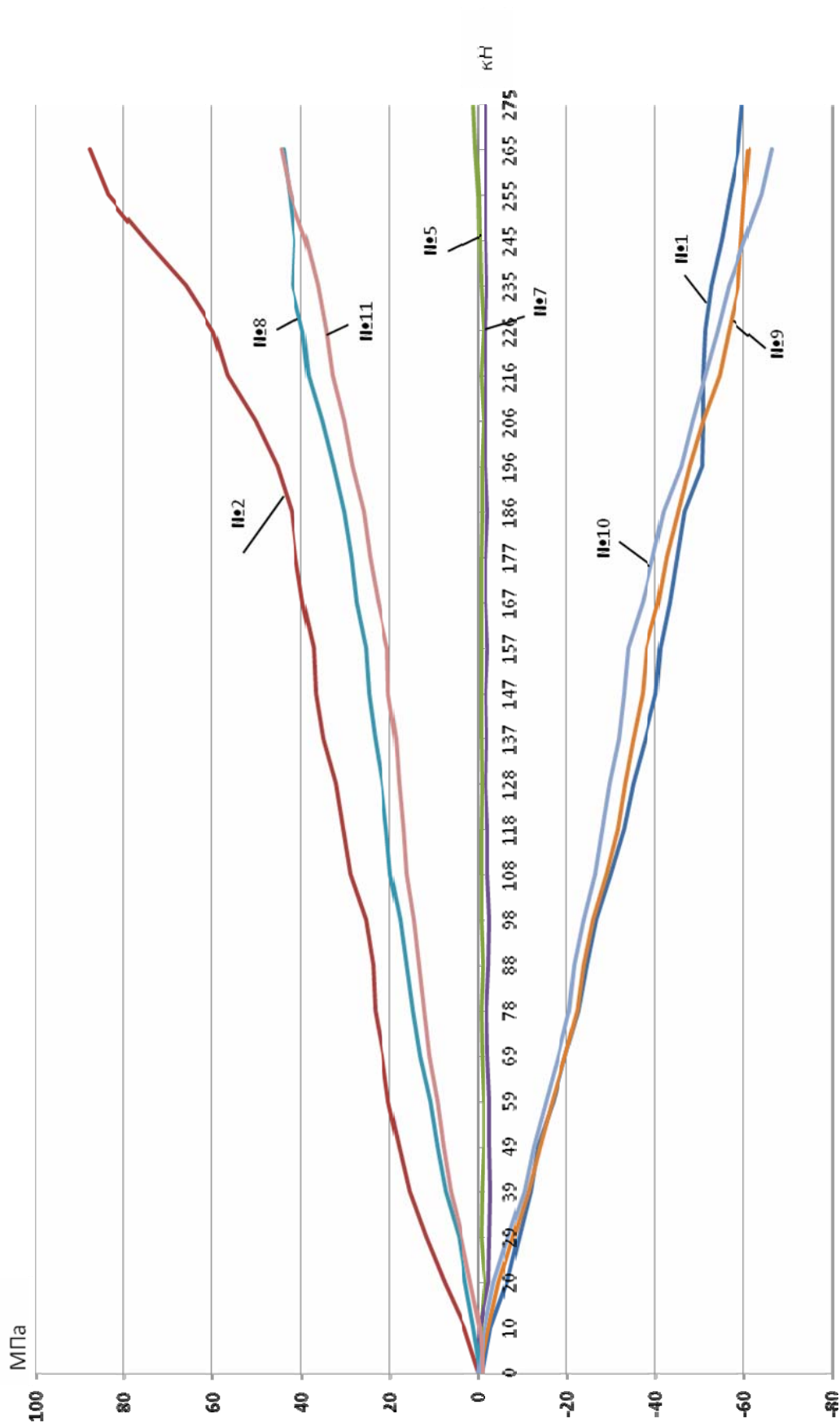


Рис.3П. Изменение напряжений в тензометрических датчиках 1-го варианта усиления консоли 1 (датчики №1–11, наклеенные на рабочую арматуру модели 1 консоли колонны)

Продолжение приложения

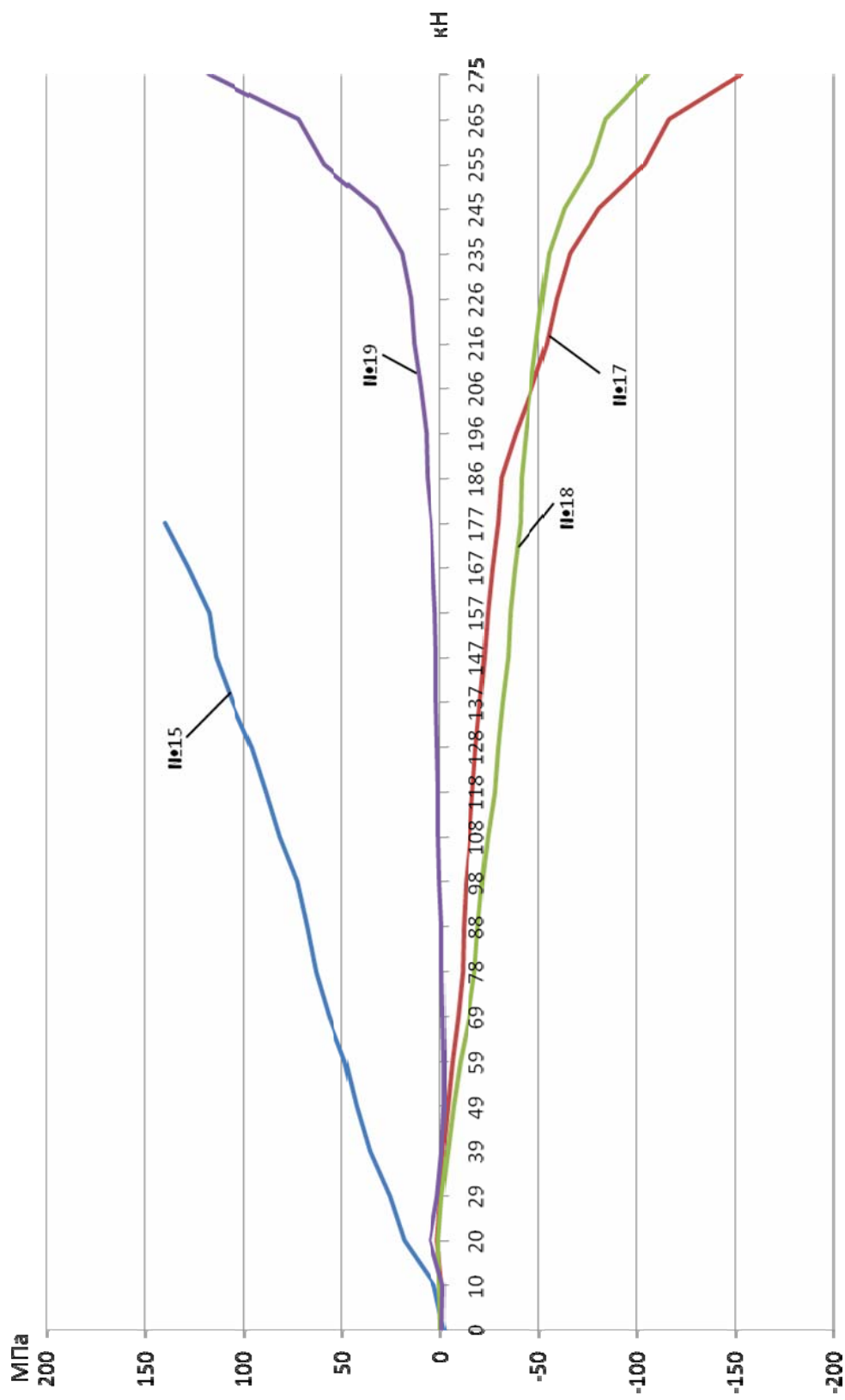


Рис.4П. Изменение напряжений в тензометрических датчиках 1-го варианта усиления консоли I (датчики №15–19, наклеенные на конструкцию балансирного устройства)

Продолжение приложения  
Таблица 4П

Показания напряжений в зонах наклеек тензорезисторов при испытании 2-го варианта усиления консоли 2

Сила, кН	Напряжения в зоне тензомертрического датчика №, МПа															
	2	4	5	6	7	10	12	13	14	16	17					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
0	-1.86	0.68	-8.97	12.86	-4.55	-3.05	0.17	8.63	5.76	4.23	-3.90					
9,81	-2.04	2.04	-11.51	18.95	-4.37	-3.72	0.85	12.01	8.65	6.60	-5.43					
19,62	-1.86	2.37	-14.05	28.59	-5.72	-1.02	1.70	17.09	13.91	9.98	-7.80					
29,43	-0.68	3.56	-15.24	37.22	-0.17	-0.17	3.22	22.50	19.34	14.04	-10.01					
39,24	0.68	4.75	-15.58	45.84	2.53	0.85	4.92	27.92	25.61	18.10	-12.38					
49,05	1.35	5.43	-15.74	53.12	-0.17	-0.67	6.45	32.82	29.51	21.82	-15.27					
58,86	3.22	6.61	-16.59	60.90	5.22	-2.03	8.82	36.89	36.30	26.06	-17.13					
68,67	3.73	8.47	-16.76	68.18	-0.34	-1.86	10.68	41.29	41.73	29.78	-19.68					
78,48	5.26	8.82	-16.93	75.10	1.35	-1.52	13.23	47.21	50.72	34.69	-22.73					
88,29	6.27	10.34	-17.94	81.02	-0.17	-0.17	15.09	52.12	56.14	37.73	-24.76					
98,1	7.46	11.36	-17.09	87.63	2.35	-0.67	17.48	57.70	62.58	41.28	-26.97					
107,91	8.81	12.04	-19.13	94.93	-0.85	-1.35	20.69	63.79	67.68	44.50	-29.68					
117,72	10.17	13.22	-20.65	100.66	1.52	0.17	22.22	68.19	71.40	47.37	-31.54					
127,53	11.53	13.90	-21.67	106.02	-0.85	0.00	24.42	74.45	76.32	50.93	-33.92					
137,34	12.38	15.43	-24.20	112.48	-1.68	1.52	27.14	79.87	80.57	53.80	-36.12					
147,15	13.39	16.78	-27.60	119.75	-1.35	0.85	29.34	85.62	85.14	56.85	-38.50					
156,96	14.91	18.65	-31.82	126.84	-2.69	0.85	31.55	91.20	89.39	59.72	-40.87					
166,77	16.10	20.00	-36.40	135.03	-2.53	1.35	34.10	96.75	93.65	62.94	-42.74					
176,58	16.61	21.87	-40.12	140.57	-3.54	1.52	34.61	98.47	94.47	63.28	-43.75					
186,39	17.79	22.89	-42.32	146.03	-3.54	1.52	36.13	102.84	97.65	65.48	-44.94					



Продолжение приложения  
Окончание табл. 4П

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
196,2	19.49	25.26	-47.74	155.94	-4.55	0.51	38.84	108.93	101.56	68.52	-47.15
206,01	22.20	32.89	-59.07	172.03	-10.27	3.21	41.39	114.75	104.47	71.40	-49.86
215,82	24.75	38.83	-67.54	185.58	-21.54	26.1	45.29	121.30	108.38	75.46	-52.92
225,63	26.61	47.47	-78.04	202.13	-47.62	157.12	48.68	128.39	111.11	79.35	-55.63
235,44	28.99	57.13	-90.91	220.95	-92.02	60.20	53.60	136.75	114.29	83.75	-59.02
245,25	31.52	69.17	-107.66	247.32	-142.03	49.21	60.05	144.48	118.57	90.01	-62.92
255,06	35.60	779.14	-125.57	280.14	-266.05	36.86	67.85	154.48	123.30	97.47	-66.15
264,87	40.34	779.14	-146.57	331.43	-401.80	47.35	74.13	167.03	130.75	104.20	-67.84
274,68	43.74	779.14	-162.21	366.89	-373.52	49.04	77.52	175.94	134.30	108.75	-68.69
284,49	50.35	779.14	-181.94	385.98	-431.90	52.76	80.91	185.76	140.12	114.84	-69.70
294,3	57.80	779.14	-196.04	587.65	-428.72	53.26	84.48	202.22	149.30	124.66	-70.21

Продолжение приложения

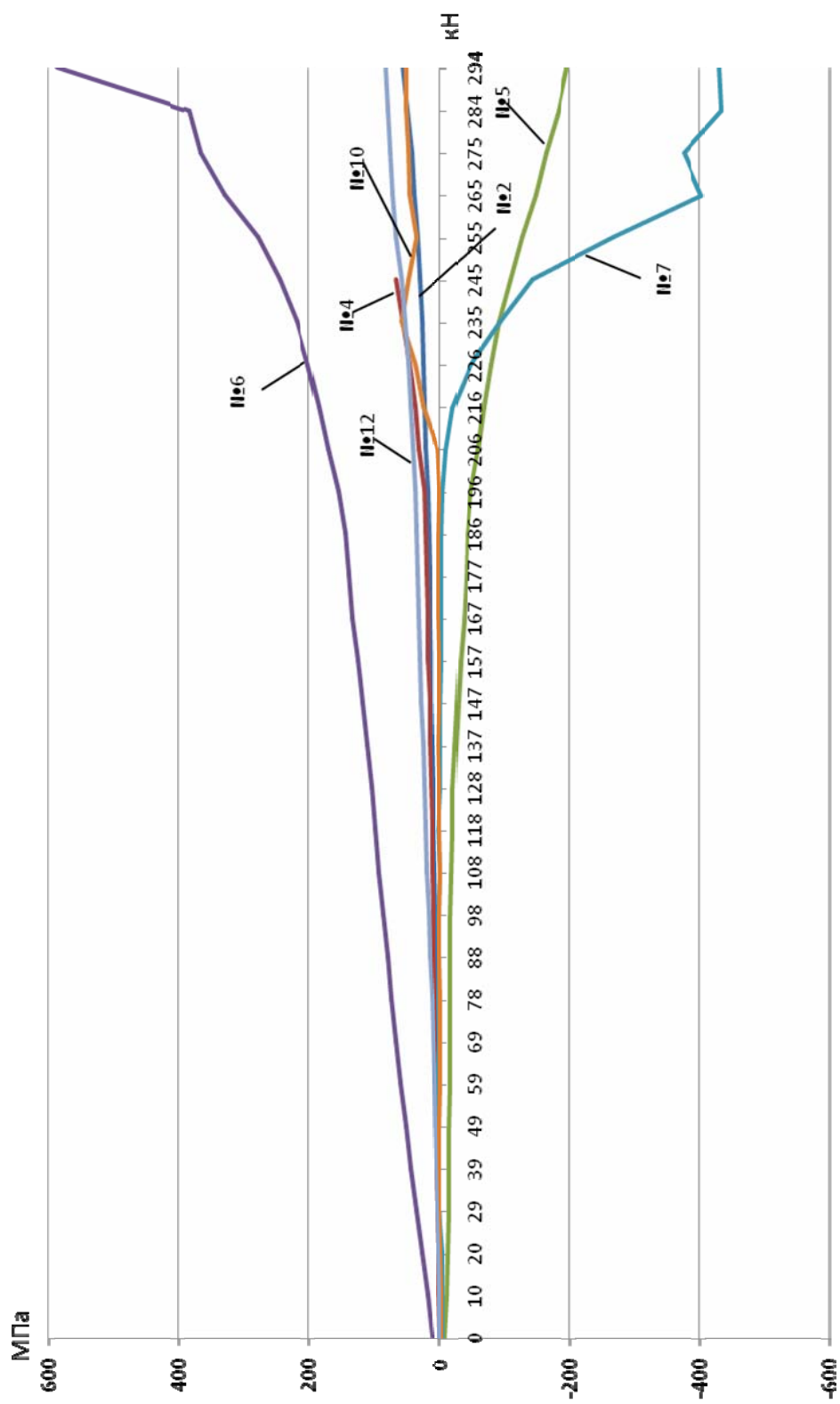


Рис.5П. Изменение напряжений в тензометрических датчиках 2-го варианта усиления консоли 2 (датчики №2 – 12, наклеенные на рабочую арматуру модели 2 консоли колонны)

Продолжение приложения

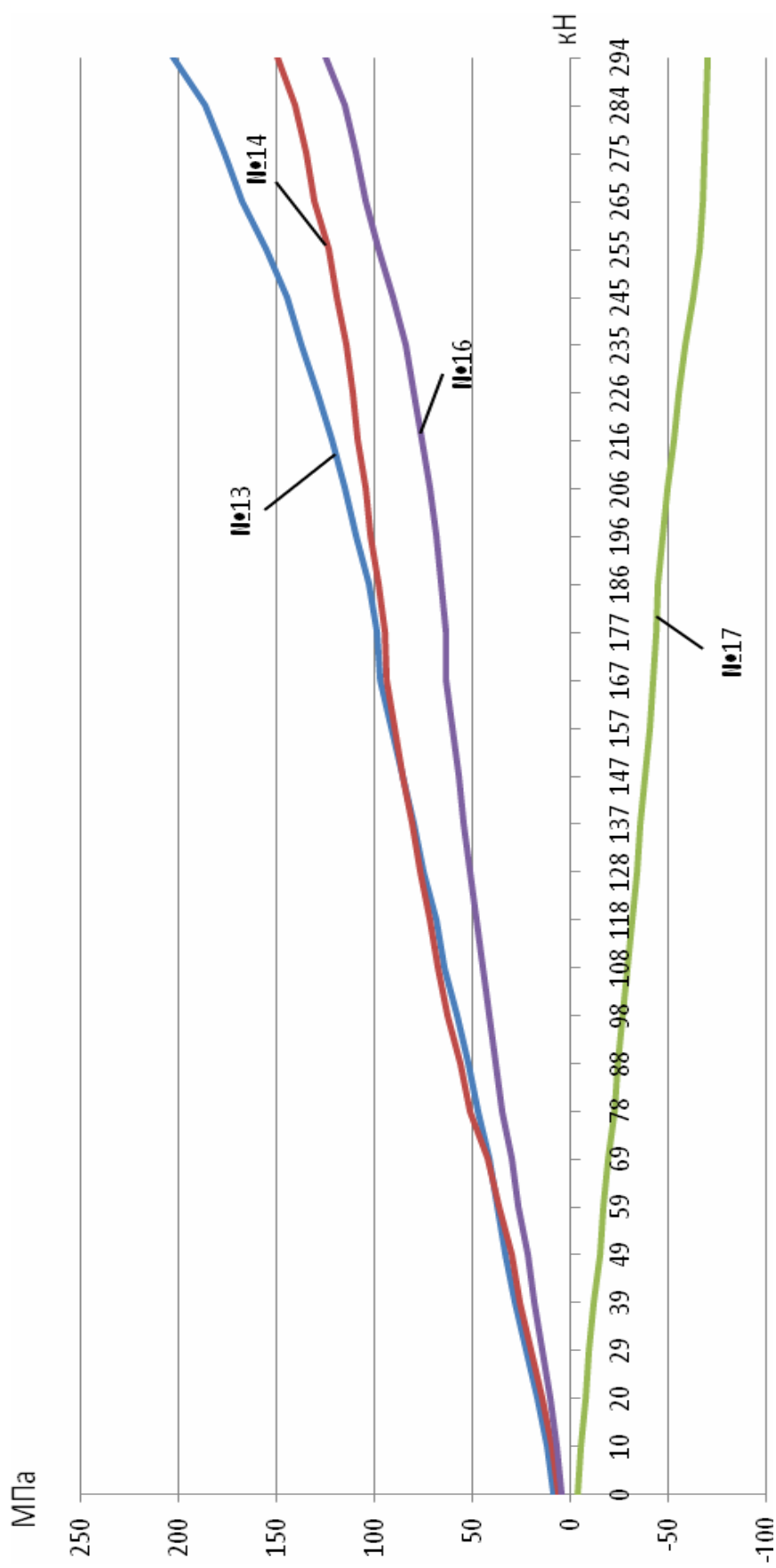


Рис.6П. Изменение напряжений в тензометрических датчиках 2-го варианта усиления консоли 2 (датчики №13–17, наклеенные на конструкцию балансирного устройства)

Продолжение приложения  
Таблица 5П

Показания напряжений в зонах наклеек тензорезисторов при испытании трубобетонной обоймы модели 1

Напряжения в зоне тензометрического датчика №, МПа

Сила, кН	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0.36	0.36	-0.70	-1.06	0.00	-1.06	-1.77	-0.70	-1.77	-1.07	-0.70	-0.36	-0.70
14,42	0.36	1.06	-0.70	-1.41	-0.36	-1.06	-1.77	-0.70	-1.77	-1.07	-1.06	-0.70	-1.06
28,84	0.00	1.06	0.36	-1.06	-0.70	0.00	-1.77	-0.70	-1.77	-1.78	-0.70	-1.41	-0.36
43,26	0.00	0.70	0.00	-0.70	-0.70	1.06	-2.47	-0.70	-1.06	-1.42	-1.06	-0.70	0.36
57,68	0.36	1.76	0.00	-1.06	0.00	1.41	-2.47	0.00	-0.70	-2.12	-1.41	-1.41	0.70
72,1	0.00	2.11	0.70	-0.36	0.00	2.11	-2.82	0.00	-1.06	-2.12	-1.41	-1.41	1.76
86,52	0.00	2.82	1.41	0.70	0.36	3.17	-3.17	0.36	0.36	-2.48	-1.06	-2.11	2.11
100,9	-0.36	3.52	2.11	0.70	0.00	3.15	-3.88	0.70	0.36	-3.19	-1.41	-2.11	2.47
115,4	-0.71	4.93	3.17	0.70	0.36	4.94	-4.24	1.41	1.06	-3.90	-1.77	-2.82	2.82
129,8	-0.71	5.99	4.23	1.76	0.70	5.29	-3.88	2.47	2.11	-4.61	-1.41	-3.18	3.17
144,2	-1.07	7.39	4.94	2.11	0.36	5.64	-4.58	3.17	2.47	-4.97	-1.77	-3.88	3.53
158,6	-1.07	7.39	5.64	2.82	0.00	6.35	-4.24	3.52	2.82	-4.97	-1.41	-3.53	3.17
173,0	-1.07	8.80	6.70	3.17	-0.36	6.71	-4.94	4.23	3.53	-5.32	-1.41	-3.88	3.17
187,5	-1.77	10.21	7.40	3.87	0.36	7.76	-5.29	5.28	3.88	-6.02	-1.77	-4.59	3.17
201,9	-1.07	10.91	8.81	4.23	0.36	7.76	-5.29	5.99	3.88	-6.38	-1.77	-4.24	2.82
216,3	-2.12	12.32	8.81	4.93	-0.70	9.17	-5.99	6.69	5.65	-7.09	-2.11	-4.94	2.82
230,7	-1.77	13.73	10.58	5.99	-0.70	10.23	-5.99	7.74	6.35	-7.44	-1.77	-4.94	3.53
245,2	-2.48	14.43	11.63	6.34	-1.06	10.23	-7.05	8.45	6.35	-8.16	-2.11	-4.94	2.82
259,6	-2.12	15.84	12.34	6.70	-0.70	11.63	-6.35	9.50	7.42	-9.22	-2.11	-4.94	2.47
274,0	-2.48	16.90	12.69	6.70	-1.06	11.63	-5.64	10.21	8.12	-10.63	-1.77	-5.65	2.82
288,4	-2.48	19.01	14.10	7.04	-1.06	12.70	-6.35	10.91	9.17	-10.63	-1.41	-5.65	2.11

Продолжение приложения  
Продолжение табл. 5П

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
302,8	-2.83	19.71	14.45	6.70	-1.06	13.05	-6.71	11.97	10.24	-11.70	-1.41	-5.65	2.47
317,3	-3.19	21.12	15.51	6.70	-0.70	14.46	-6.71	13.37	11.30	-13.47	-1.41	-6.00	2.11
331,7	-3.19	22.89	17.27	5.64	-1.06	14.81	-6.71	14.43	11.30	-15.24	-1.06	-6.00	2.11
346,1	-3.54	24.29	18.69	5.64	-0.70	15.52	-6.35	15.14	12.00	-16.31	-1.06	-7.06	2.11
360,5	-3.54	25.70	19.03	4.58	0.00	15.17	-6.35	20.42	13.07	-18.08	-0.36	-6.35	2.47
374,9	-3.54	27.10	19.74	3.87	-1.06	16.23	-5.64	22.18	14.48	-20.21	-0.36	-6.35	2.47
389,4	-4.26	28.87	20.80	0.36	-2.11	17.28	-5.64	24.29	15.89	-22.33	0.36	-6.71	2.82
403,8	-3.90	29.92	22.20	-1.41	-1.06	17.64	-5.99	25.00	16.24	-23.76	0.36	-7.06	2.82
418,2	-3.90	31.69	23.61	-3.53	-0.70	18.34	-4.94	27.11	16.95	-28.01	1.06	-7.42	2.82
432,6	-4.61	32.74	24.67	-5.99	0.36	19.04	-4.94	27.81	17.30	-30.84	1.77	-7.42	3.17
447,0	-4.97	35.20	26.79	-11.27	2.47	20.45	4.24	29.22	17.65	-35.81	3.17	-7.06	4.58
461,5	-3.19	33.79	30.67	-26.78	10.94	21.87	7.76	30.63	19.77	-39.00	3.17	-6.35	5.63

Продолжение приложения  
Продолжение табл. 5П

Показания напряжений в зонах наклейки тензорезисторов при испытании трубчатой обоймы модели 1

Сила, кН	Напряжения в зоне тензометрического датчика №, МПа															
	15	16	17	18	20	21	22	23	24	25	26	28				
1	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28			
0	-1.07	-1.42	0.00	-1.06	0.70	0.36	0.36	0.00	-1.76	-1.41	-1.41	-1.06	-0.70			
14,42	-1.42	-2.48	-0.36	-1.41	7.74	-0.36	-0.70	0.00	-2.11	-0.70	-0.70	-1.06	-1.06			
28,84	-1.78	-1.77	-0.36	-0.70	7.74	0.36	-0.36	0.36	-1.76	-1.41	-1.41	-0.36	-1.06			
43,26	-2.83	-1.77	-0.70	-0.36	6.69	0.70	1.06	0.36	-1.41	-1.41	-1.41	-0.36	-1.06			
57,68	-3.19	-1.42	-0.36	1.41	5.99	1.41	1.41	0.70	-1.41	-1.41	-1.41	0.71	-1.41			
72,1	-3.19	-1.42	-0.70	1.76	7.40	1.76	2.11	1.06	-1.41	-1.41	-1.41	1.77	-0.70			
86,52	-3.54	-1.07	-1.06	3.17	6.69	3.17	2.82	0.70	-1.41	-1.77	-1.77	3.88	-0.36			
100,9	-3.19	-1.42	-1.06	4.58	6.69	3.52	3.17	0.36	-1.41	-2.11	-2.11	3.88	0.36			
115,4	-4.26	-1.42	-1.41	5.99	9.16	4.57	4.58	0.70	-1.41	-2.11	-2.11	5.29	0.70			
129,8	-4.26	-0.71	-1.06	6.70	13.73	5.63	5.29	0.36	-1.41	-2.47	-2.47	6.72	1.41			
144,2	-5.32	-1.07	-1.41	8.45	14.43	6.34	6.35	0.70	-0.70	-1.41	-1.41	8.13	1.41			
158,6	-5.32	0.00	-1.06	9.51	14.79	7.04	7.05	0.36	-1.06	-2.11	-2.11	8.47	2.11			
173,0	-6.38	0.00	-1.06	11.28	86.26	7.40	8.46	0.36	-1.06	-2.11	-2.11	10.24	2.11			
187,5	-6.73	-0.36	-1.41	12.34	59.50	9.16	9.17	-0.36	-1.41	-1.77	-1.77	12.01	2.82			
201,9	-7.09	0.36	-1.41	14.09	98.57	9.50	9.88	-0.36	-0.70	-1.41	-1.41	11.65	2.82			
216,3	-8.51	0.36	-1.41	15.51	1140.99	8.45	11.64	0.00	0.00	-1.41	-1.41	14.83	3.53			
230,7	-8.87	0.36	-1.41	16.21	1140.99	8.80	12.35	-0.70	0.00	-1.41	-1.41	15.19	3.88			
245,2	-9.58	0.71	-1.77	17.62	1140.99	9.16	13.40	-0.70	0.36	-1.77	-1.77	16.96	3.88			
259,6	-10.28	0.71	-2.11	20.79	153.19	10.56	14.81	-1.41	0.70	-1.77	-1.77	19.07	4.94			
274,0	-10.28	0.71	-1.77	22.20	99.98	13.38	15.87	-1.41	0.36	-1.06	-1.06	19.78	4.58			
288,4	-10.99	1.07	-2.11	24.32	352.12	14.79	16.93	-2.11	0.36	-0.70	-0.70	21.19	5.28			

Продолжение приложения  
Окончание табл. 5П

1	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
302,8	-11.70	1.77	-2.11	26.07	249.99	15.49	17.98	-2.11	0.36	-1.06	22.60	5.28
317,3	-12.41	1.42	-1.77	28.19	151.79	16.54	19.40	-2.11	1.41	-0.70	25.07	5.99
331,7	-13.12	1.42	-1.77	30.30	23.24	17.96	20.81	-2.46	1.41	-0.36	27.90	6.70
346,1	-14.19	1.77	-2.11	32.77	41.54	18.31	22.58	-3.17	1.06	-0.36	31.08	7.05
360,5	-14.53	1.77	-2.11	34.54	35.56	19.71	23.63	-3.17	1.76	0.00	34.26	7.75
374,9	-15.24	2.83	-2.11	37.35	30.63	21.47	24.69	-3.87	2.11	0.00	38.49	8.46
389,4	-15.96	2.48	-2.11	40.88	34.15	22.18	26.46	-3.87	3.17	0.36	43.80	8.81
403,8	-10.63	1.07	-2.47	42.99	25.70	23.59	27.51	-3.52	2.82	1.06	47.68	9.17
418,2	-9.58	1.42	-1.77	45.46	27.81	25.00	28.22	-3.87	3.53	1.06	52.27	9.87
432,6	-9.22	1.07	-2.47	47.58	24.30	25.00	29.27	-4.57	3.53	1.06	55.81	10.22
447,0	-7.80	1.42	-2.11	47.92	23.24	25.35	29.63	-3.87	3.88	0.36	61.45	11.63
461,5	-7.44	1.42	-2.47	45.81	23.24	24.64	28.93	-1.41	4.58	1.06	62.16	11.63

Продолжение приложения

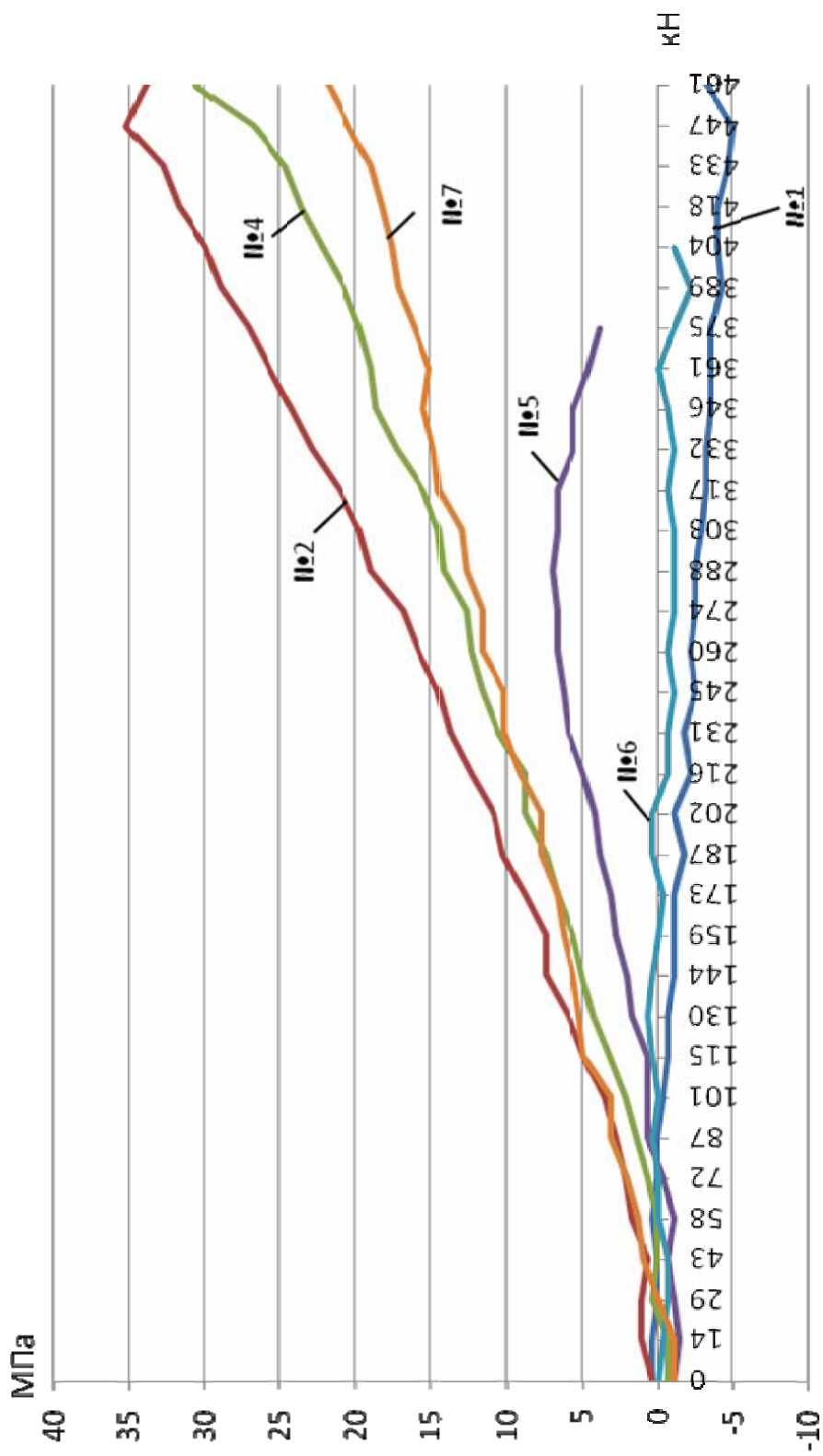


Рис. 7П. Показания тензометрических датчиков с №1 по №7 восстановления работоспособности модели 1 с помощью трубобетонной обоймы



Продолжение приложения

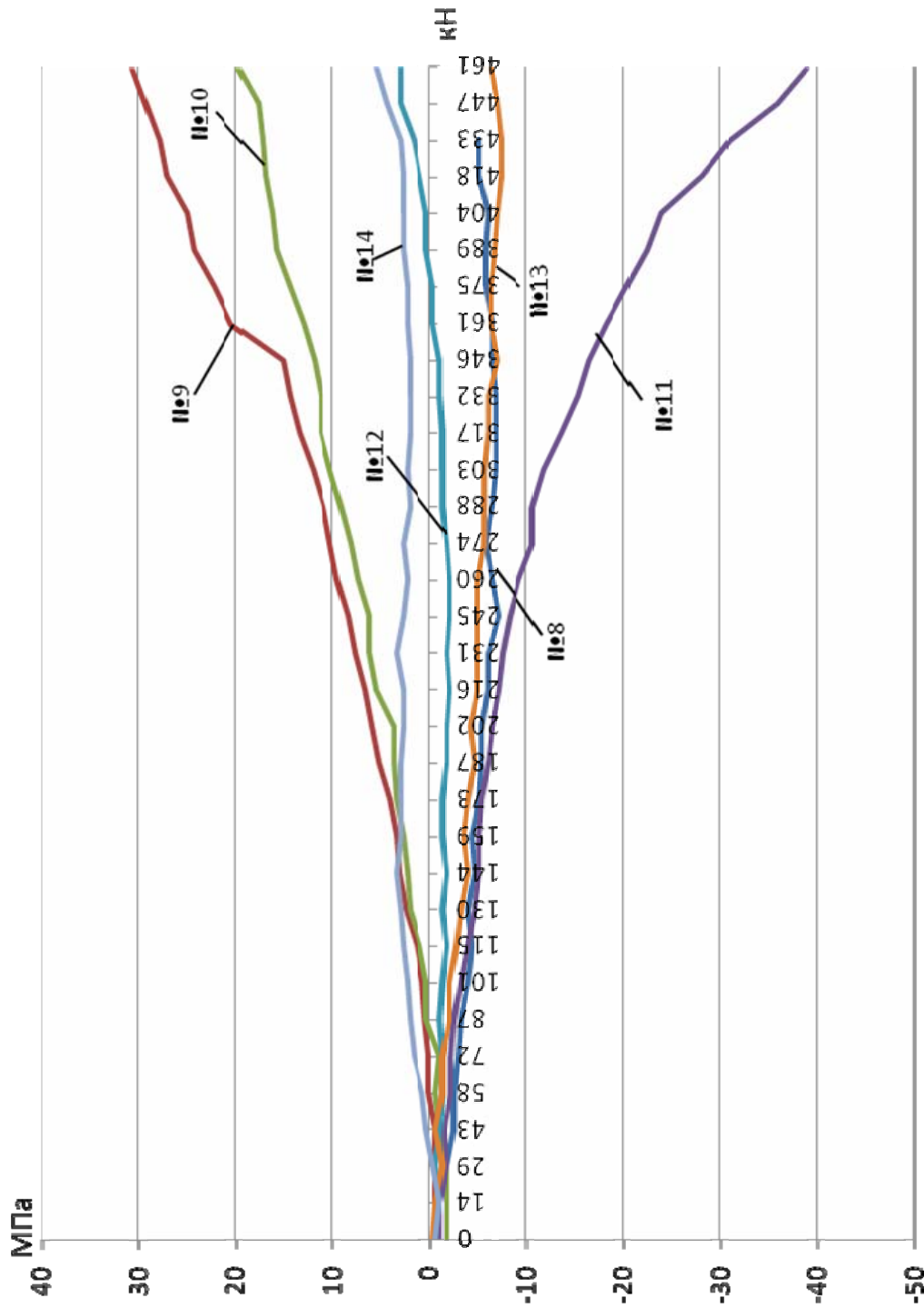


Рис. 8П. Показания тензOMETрических датчиков с №8 по №14 восстановления работоспособности модели 1 с помощью труботетонной облоймы

Продолжение приложения

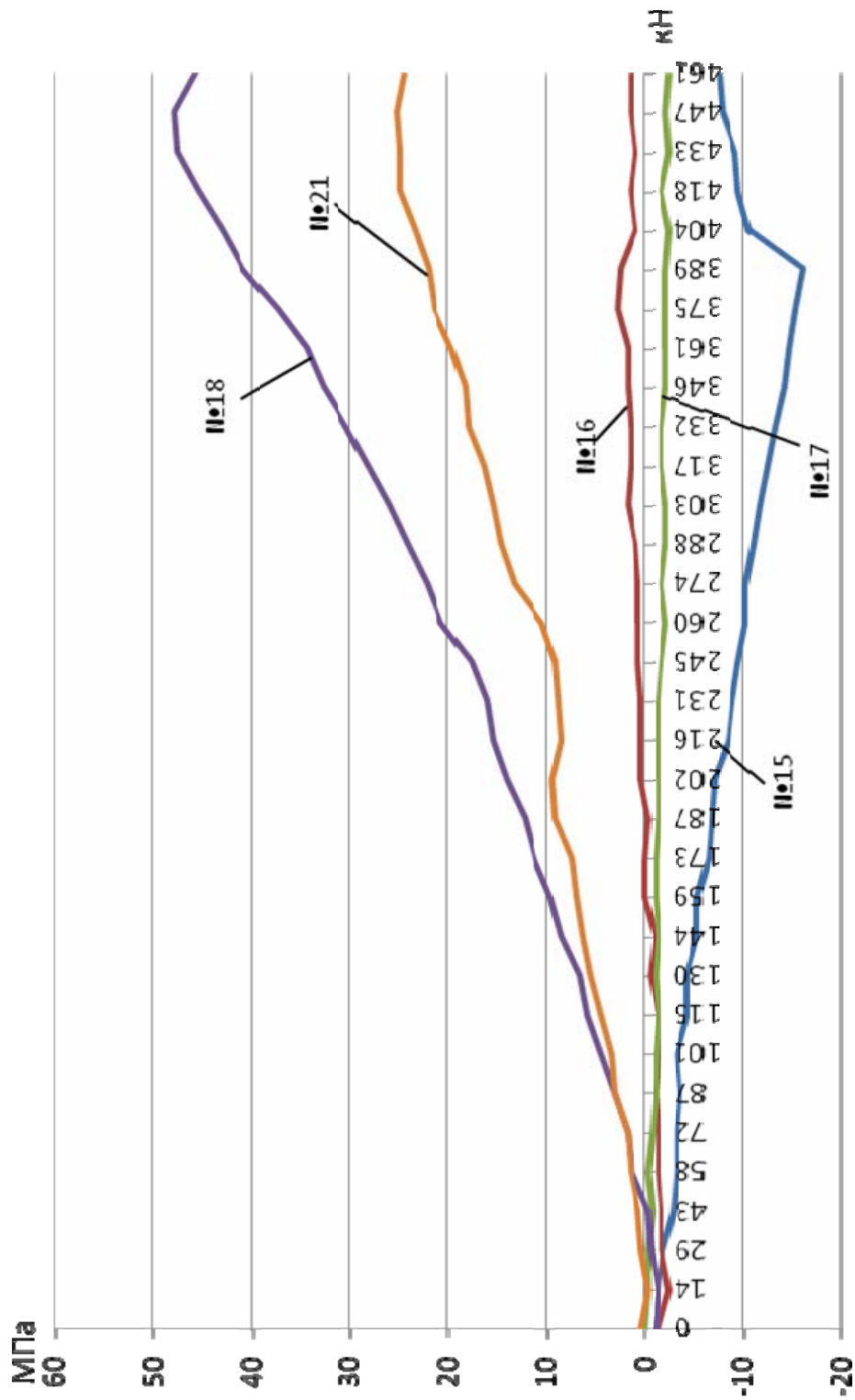


Рис.9П. Показания тензометрических датчиков с №15 по №21 восстановления работоспособности модели 1 с применением трубобетонной обоймы

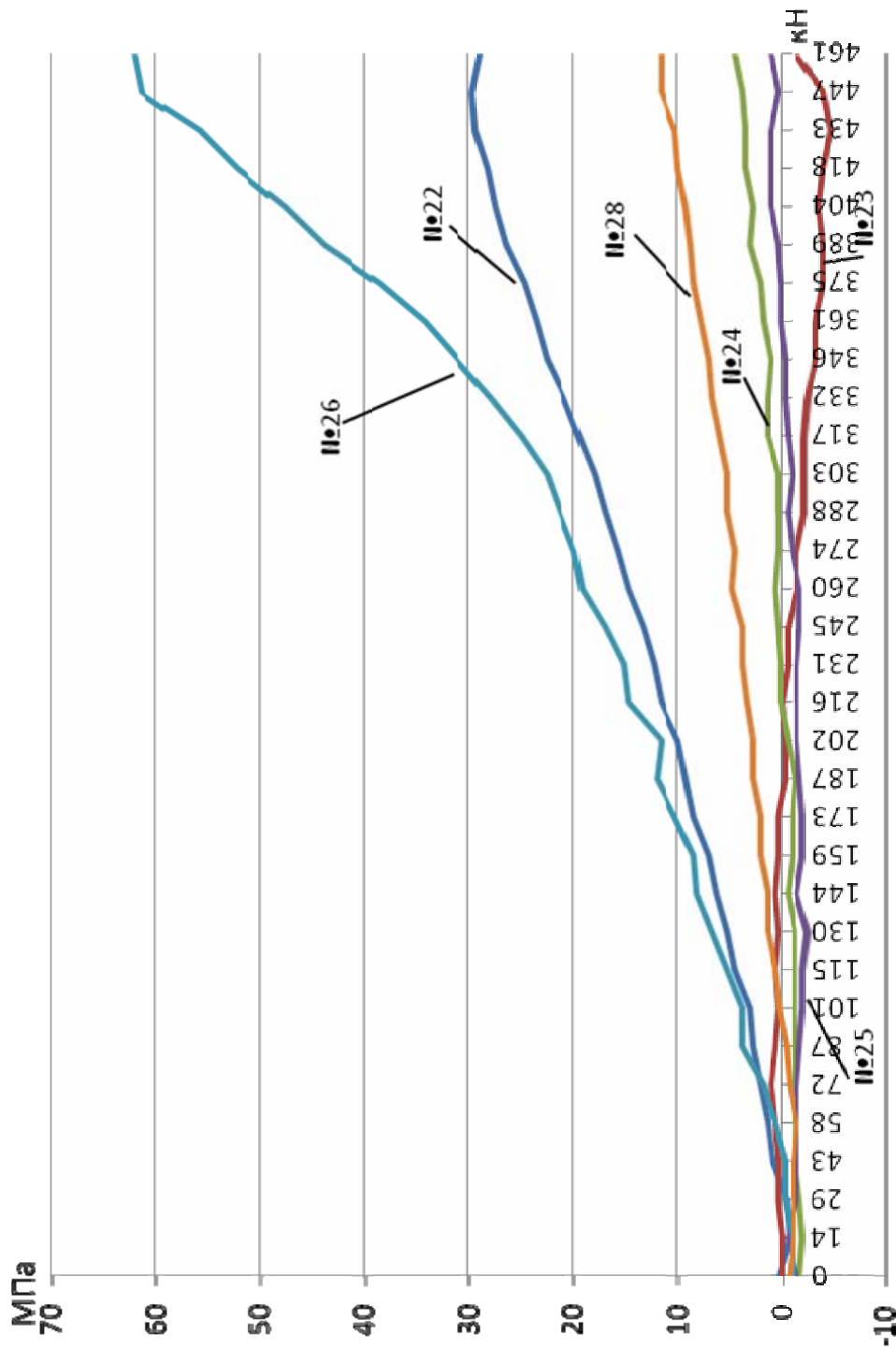


Рис.10П. Показания тензOMETрических датчиков с №22 по №28 восстановления работоспособности модели 1 с применением трубобетонной обоймы

Продолжение приложения  
Таблица 6П  
Показания напряжений в зонах наклеек тензорезисторов при испытании трубобетонной обоймы модели 2

Сила, кН	Напряжение в зоне тензометрического датчика №, МПа																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Соответствие номеров датчиков первому образцу	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	18	19	20	21	23	25	26	27								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	17									
0	-1.41	-0.71	-1.06	-1.76	-2.12	-0.70	0.00	0.36	0.36	-0.36	-0.71	-1.06	0.00	-0.70	0.00	0.36	0.70									
14,42	-0.36	-0.36	-1.06	-1.76	-1.41	-0.36	0.00	0.00	1.06	0.00	1.06	-0.36	-0.71	0.36	-0.70	0.70	0.00									
28,84	0.36	0.36	-0.36	-1.06	0.36	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	2.46	0.00	0.00	1.06	-0.70	1.06	-0.36									
43,26	1.77	1.42	-0.36	-0.36	0.71	0.36	0.36	0.36	3.87	0.71	3.87	0.71	1.41	1.77	-0.36	1.76	2.82	-0.36								
57,68	3.17	2.83	0.71	0.36	2.12	0.70	1.07	1.07	5.99	0.71	5.99	0.71	2.48	2.82	0.70	2.11	3.53	-1.76								
72,1	4.94	3.19	1.06	0.70	4.24	0.70	1.42	1.42	7.39	1.06	7.39	1.06	3.54	3.54	1.41	2.82	5.29	-2.47								
86,52	6.70	4.97	1.77	1.41	4.95	1.06	1.42	1.42	9.16	2.12	9.16	2.12	4.60	4.95	2.47	4.23	5.99	-3.53								
100,9	8.11	5.32	2.12	2.11	6.71	1.41	1.78	1.78	11.97	2.12	11.97	2.12	6.01	6.00	3.18	4.93	7.05	-4.58								
115,4	9.52	6.39	2.47	2.47	9.18	1.76	1.42	1.42	13.37	2.82	13.37	2.82	7.07	6.72	4.24	5.64	8.46	-5.64								
129,8	11.29	7.09	3.18	3.17	10.24	2.11	2.12	2.12	15.13	3.54	15.13	3.54	8.14	7.77	4.94	6.70	8.82	-7.04								
144,2	13.40	8.16	4.24	3.87	11.65	2.47	2.48	2.48	17.25	4.24	17.25	4.24	9.55	8.84	5.99	7.75	9.88	-7.75								
158,6	14.10	8.51	3.88	3.53	13.42	3.17	1.78	1.78	18.66	4.95	18.66	4.95	10.26	9.18	5.99	7.40	10.22	-8.10								
173,0	16.23	9.58	4.24	4.23	15.18	3.87	2.12	2.12	20.76	5.65	20.76	5.65	11.32	10.25	7.06	8.45	11.28	-9.16								
187,5	17.98	10.29	5.30	4.93	16.95	4.93	2.48	2.48	22.88	6.00	22.88	6.00	12.03	11.31	8.12	9.51	11.63	-10.21								
201,9	20.10	11.34	5.65	4.93	19.42	5.64	3.19	3.19	25.34	7.06	25.34	7.06	13.44	12.02	9.17	9.87	11.63	-11.27								
216,3	21.87	11.34	6.00	5.28	20.84	5.64	3.54	3.54	26.75	7.42	26.75	7.42	14.15	12.72	9.17	10.57	12.69	-11.98								
230,7	24.33	12.06	6.72	5.63	23.66	6.70	6.38	6.38	28.51	8.13	28.51	8.13	15.21	13.78	10.23	11.98	12.35	-12.68								
245,2	25.39	13.12	7.06	6.34	25.07	7.40	7.80	7.80	30.27	8.47	30.27	8.47	16.26	14.13	10.93	11.98	12.35	-13.38								
259,6	27.15	12.77	7.42	6.34	27.90	8.10	8.87	8.87	32.73	8.83	32.73	8.83	16.62	14.84	11.64	12.33	13.75	-14.44								
274,0	29.27	14.19	8.13	6.69	30.37	9.51	10.63	10.63	34.85	9.18	34.85	9.18	17.69	15.90	12.35	14.09	13.75	-16.21								

Продолжение приложения  
Окончание табл. 6П

Показания напряжений в зонах наклеек тензорезисторов при испытании трубобетонной обоймы модели 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
288,4	32.09	15.60	9.18	8.10	33.55	10.92	13.12	-8.12	37.66	9.54	19.10	17.67	13.06	15.15	13.40	-16.55
302,8	33.50	14.90	8.83	8.45	35.66	12.33	14.18	-8.46	40.12	9.89	20.46	17.67	13.76	15.15	13.05	-17.61
317,3	36.32	16.31	8.83	6.69	38.84	14.09	15.96	-10.23	43.29	10.24	21.22	18.02	14.47	15.85	13.05	-18.67
331,7	38.08	16.67	9.54	7.74	41.31	14.44	18.08	-9.88	45.41	10.95	21.93	18.72	14.81	16.55	13.05	-19.72
346,1	40.55	17.02	10.24	7.40	42.38	14.09	20.21	-10.93	48.58	11.31	23.70	19.43	15.88	17.26	13.05	-20.43
360,5	43.38	17.73	9.89	8.45	45.20	15.50	20.92	-12.35	51.74	12.01	25.47	20.85	17.99	19.38	13.05	-21.14
374,9	45.85	18.80	10.60	9.16	47.67	16.91	20.92	-12.35	55.26	13.07	26.52	21.20	19.41	20.08	12.35	-22.89
389,4	49.37	19.15	10.95	9.51	49.93	19.02	20.92	-12.35	59.48	13.42	28.65	22.61	21.52	21.49	12.69	-24.66
403,8	51.14	18.44	10.60	8.10	51.91	22.19	26.59	-13.06	64.06	13.07	31.48	23.32	23.29	22.19	11.99	-25.36
418,2	55.01	19.86	10.95	9.51	55.09	23.61	28.01	-13.06	68.28	13.42	32.89	24.38	26.11	23.25	11.63	-27.83
432,6	59.25	20.92	11.31	9.86	57.20	24.66	29.78	-13.76	72.51	13.78	35.37	25.08	28.93	24.66	12.35	-28.89
447,0	63.13	21.99	12.01	10.91	60.73	26.78	30.13	-13.76	78.14	14.48	38.91	26.85	33.16	26.42	14.46	-30.29
461,5	68.41	23.41	12.01	11.97	63.20	28.18	31.20	-12.70	85.18	15.54	42.44	28.97	37.40	27.83	15.52	-31.00

Продолжение приложения

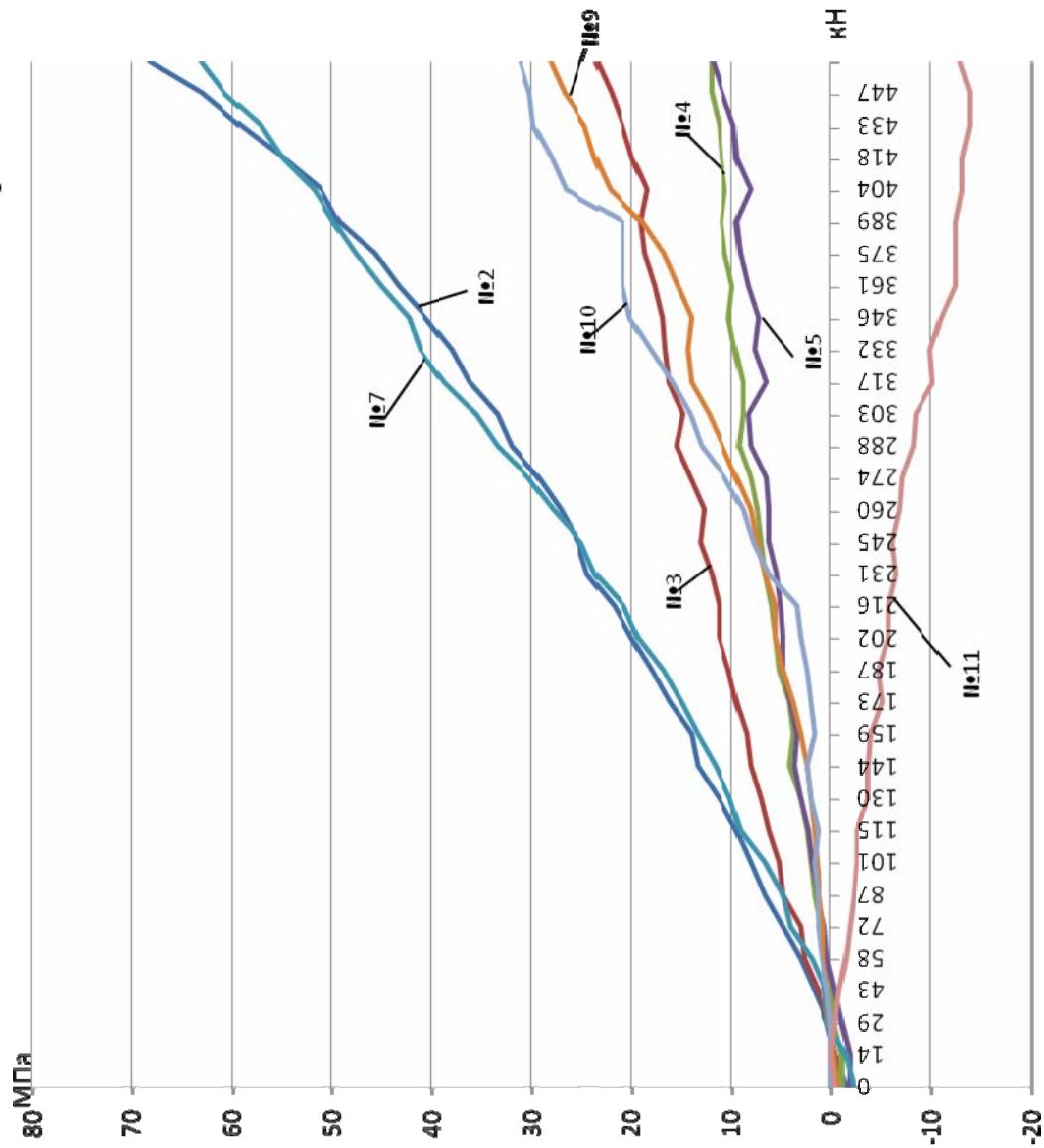


Рис.11П. Показания тензOMETрических датчиков с №1 по №8 (с №2 по №1) восстановления работоспособности модели 2 с использованием труботонной облоймы

Продолжение приложения

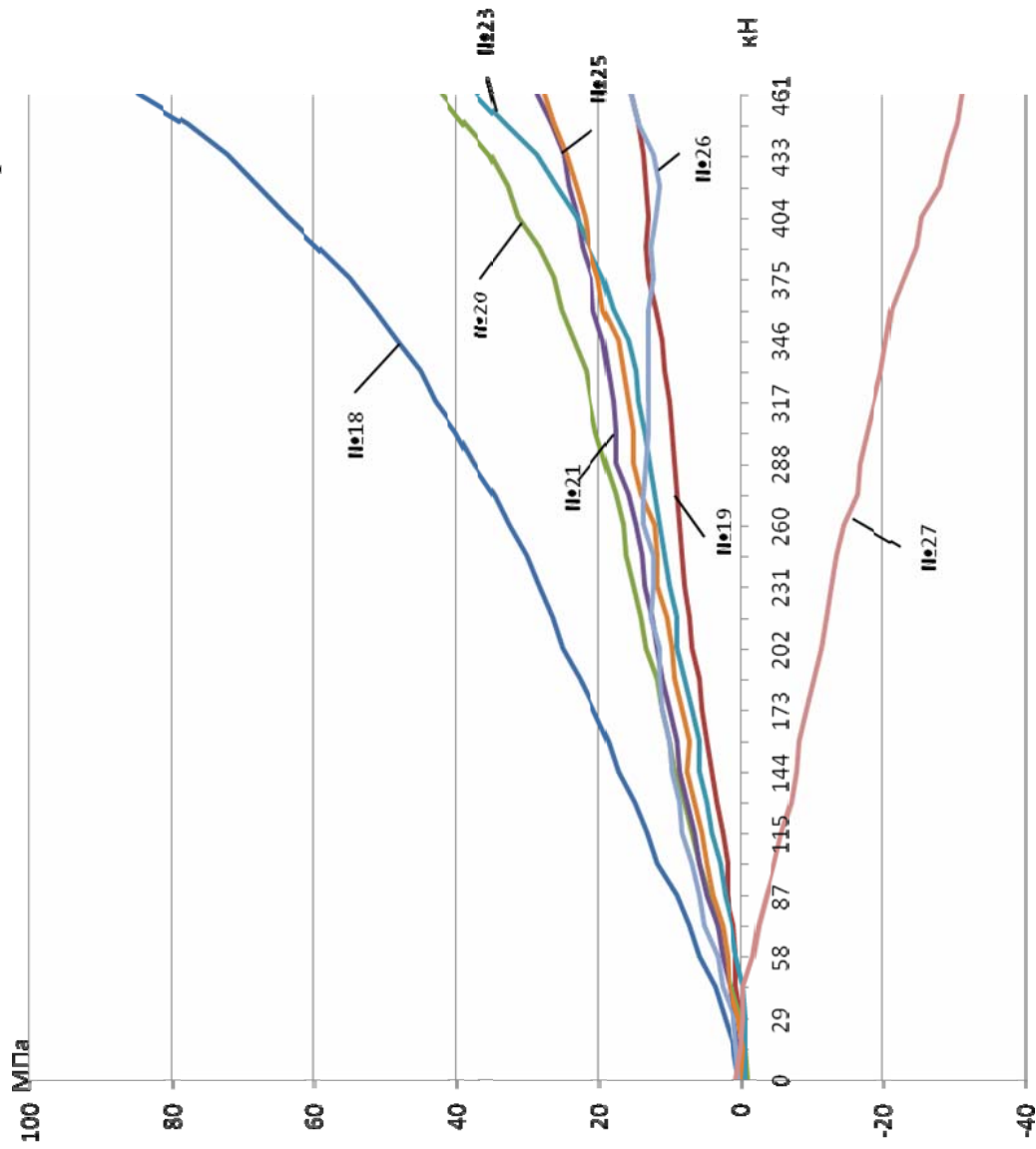


Рис. 12П. Показания тензометрических датчиков с №9 по №16 (с №18 по №27) восстановления работоспособности модели 2 с помощью трубобетонной обоймы

Научное издание

Нежданов Кирилл Константинович  
Жуков Александр Николаевич

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСОЛЕЙ КОЛОНН**  
Монография

В авторской редакции  
Верстка Н.В. Кучина

---

Подписано в печать 03.04.14. Формат 60×84/16.  
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.  
Усл.печ.л. 9,07. Уч.-изд.л. 9,75. Тираж 500 экз. 1-й завод 100 экз.  
Заказ № 93.

---

Издательство ПГУАС.  
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28