





|   |    |
|---|----|
| 4. ВЫВОДЫ .....                               | 75 |
| 4.1. Результаты численного эксперимента ..... | 75 |
| 4.2. Анализ результатов .....                 | 77 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                              | 78 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....                | 79 |

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 4    |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

# ВВЕДЕНИЕ

## ***Актуальность темы исследования***

Панельное домостроение, несмотря на сложные производственные и экономические преобразования последнего десятилетия, удерживает лидирующее положение в массовом городском жилищном строительстве. При этом характер работы стеновых панелей остается малоизученным вопросом из-за нелинейных свойств железобетонных конструкций [2,4]. Уровень развития современной вычислительной техники позволяет выполнить расчет строительных конструкций с учетом различных аспектов, таких как учет нелинейных свойств материалов, условий закрепления и т.д. Численный эксперимент с использованием метода конечных элементов, заложенного в нелинейном процессоре ПК "Ли́ра-САПР 2015", может заменить натурный эксперимент, требующий значительных материальных и временных ресурсов. В связи с этим, развитие методов математического моделирования конструкций является одним из важных направлений современной строительной науки.

***Цель исследования*** - построение конечно-элементной модели с учетом физической, геометрической нелинейности и исследование характера ее деформирования.

***Объект исследования*** - три однослойные железобетонные стеновые панели для надземных этажей: 1НС 48.30-1 (с оконным проемом), 1 НСТ 58.30 (без проема), 1 НСТ 58.30-1 (с дверным проемом) при статической нагрузке.

***Предмет исследования*** – напряженно-деформированное состояние (деформации) железобетонных стеновых панелей.

## ***Задачи исследования:***

1. Построить расчетную конечно-элементную модель в ПК "Ли́ра-САПР" с характеристиками, приближенными к реальным (деформации материала, армирование, податливость швов, стяжки и т.д.);

2. Выполнить нелинейный расчет конструкции и определить характер ее деформирования;

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 5    |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |



- выявлении условий работы конструкции (нелинейные свойства материала, податливость швов, стяжки), при которых результаты численного эксперимента максимально близкие к натурным для трех вариантов конструкций стеновых панелей.

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 7    |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |







неопределимой. Конструктивная нелинейность присуща конструкции, находящейся в процессе монтажа, когда создаются новые связи, при разрушении, когда связи выключаются из работы, а также очень часто при изменении режима нагружения. Изменение расчетной схемы бывает скачкообразным (рис.1.2 , а) или непрерывным (рис.1.2 , б). В процессе нагружения конструкции может изменяться направление нагрузки [9, 11, 15].

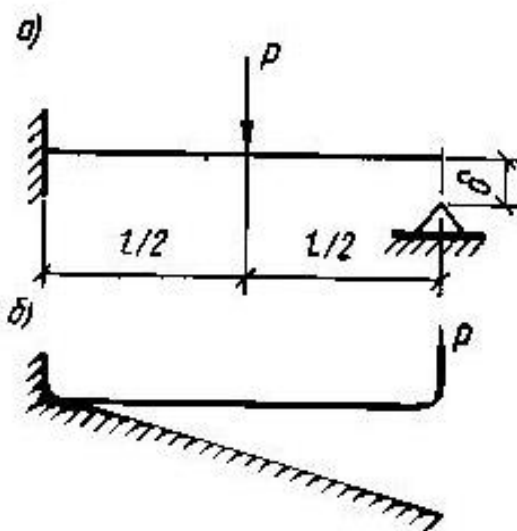


Рис. 1.2. Изменение расчетной схемы

Кроме вышеназванных выделяют **реологическую** (примером реологической нелинейности является ползучесть железобетонных конструкций) и **генетическую** нелинейности (при расчетах учитывается возможное изменение расчетной схемы в процессе деформирования за счет накопления напряжений и деформаций) [15].

Каждая из перечисленных выше нелинейностей представляет определенный класс задач, называемый видом нелинейности (задачи с физической, геометрической, конструктивной, реологической, генетической нелинейностью).

Для полного решения поставленной выше задачи расчета конструкций в широком плане следует рассматривать как минимум три основных вида нелинейностей (физическая, геометрическая, конструктивная), что усложняет решение. При рассмотрении частных случаев В.В. Новожилов составил свою классификацию нелинейных задач:

- 1) линейные физически и геометрически;

|  |  |          |         |      |  |  |  |  |      |
|--|--|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
|  |  |          |         |      |  |  |  |  | Лист |
|  |  |          |         |      |  |  |  |  | 10   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |  |  |  |  |      |

- 2) нелинейные физически, геометрически линейные;
- 3) линейные физически, нелинейные геометрически;
- 4) нелинейные физически и геометрически.

Задачи первого типа решали путем интегрирования соответствующих уравнений теории пластичности или нелинейной теории упругости, задачи второго типа решали методом сосредоточенных деформаций. Задачи третьего типа, относящиеся к геометрически нелинейной теории упругости, были поставлены еще Эйлером применительно к тонким упругим стержням, но во второй половине прошлого столетия объектом исследования этой теории стали тонкие гибкие пластинки.

Исследование задач четвертого типа (геометрически и физически нелинейных) очень сложно, поэтому оно начало развиваться только в последние два десятилетия, что отчасти объясняется широким внедрением ЭВМ, существенно облегчившим трудные вычислительные процессы, необходимые при решении таких «дважды нелинейных» задач. Здесь целесообразно использовать метод последовательных нагружений, предложенный В. З. Власовым и под названием «шаговый метод» - В. И. Феодосьевым, развиваемый В. В. Петровым [11].

Кроме перечисленных методов, существуют другие методы для решения нелинейных задач различных типов:

1. Шаговый метод (рис. 1.3, а), как правило, применяется для решения задач физической и геометрической нелинейности.
2. Метод секущих (метод Биргера, рис.1.3, б), как правило, применяется для решения физически нелинейных задач в режиме «инженерная нелинейность».
3. Итерационный метод (упрощенный метод Ньютона, рис.1.3, в) применяется для решения задач конструктивной нелинейности (односторонние связи) и грунтовых массивов.

Геометрическая интерпретация этих методов на графике «обобщенная нагрузка» - «обобщенное перемещение» представлена на рис.1.3 [15].

|  |  |          |         |                                 |  |      |
|--|--|----------|---------|---------------------------------|--|------|
|  |  |          |         | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР |  | Лист |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата                            |  |      |
|  |  |          |         |                                 |  | 11   |

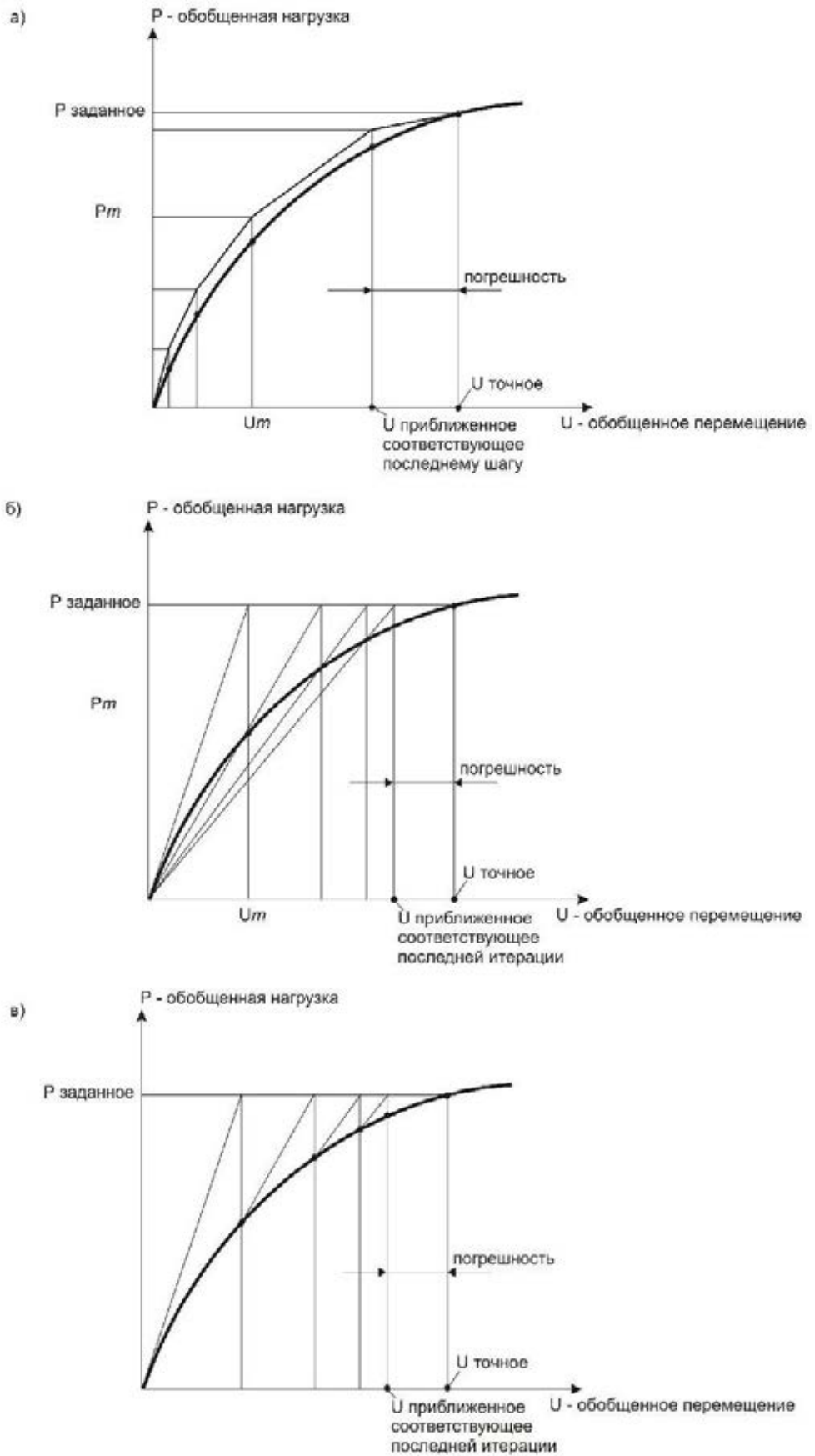


Рис. 1.3. Геометрическая интерпретация методов для решения нелинейных задач: а - шаговой метод; б - метод секущих; в - итерационный метод

Основные особенности нелинейных задач представлены в таблице 1.1. [13]

Табл. 1.1. Особенности нелинейных задач.

| Особенность                                   | Линейные задачи   | Нелинейные задачи  |
|---|---|--|
| Зависимость смещений от нагрузки              | Смещения линейно зависят от приложенной нагрузки  | Зависимость смещения от нагрузки нелинейная  |
| Связь между напряжением и деформацией         | Принимается линейная зависимость между напряжением и деформацией  | Зависимость "напряжение-деформация" может являться нелинейной функцией напряжения, деформации и/или времени (физическая нелинейность)    |
| Величина смещения                             | Изменение в геометрии, благодаря смещению, считается малым и игнорируется при проверке равновесия   | Смещения могут быть не малыми, для проверки равновесия необходимо использовать деформированное состояние                                 |
| Свойства материала                            | Линейные упругие свойства материала (обычно просто определяются)  | Нелинейные свойства материала часто неизвестны, что может потребовать проведения дополнительного экспериментального исследования         |
| Обратимость                                   | Все деформации полностью обратимы и исчезают при разгрузке системы  | После снятия нагрузки состояние системы может отличаться от исходного  |
| Граничные условия                             | Граничные условия в течение расчета остаются неизменными  | Граничные условия могут изменяться (например, меняются площади контакта)   |
| Последовательность приложения нагрузок        | Последовательность приложения нагрузок не важна, заключительное состояние от нее не зависит   | Состояние конструкции может зависеть от последовательности приложения нагрузок   |
| Время выполнения вычислений                   | Время выполнения вычислений намного меньше, чем при нелинейном расчете  | Приращение нагрузки и итерации, требуют значительного времени (особенно, если указана высокая степень точности)                          |
| Устойчивость вычислительного процесса         | Решение чаще всего может быть получено без вмешательства пользователя   | В трудных нелинейных задачах решение может сходиться недостаточно быстро, что иногда требует некоторого взаимодействия с пользователем   |
| Использование результатов                     | Результаты расчета на разные нагрузки допускают сложение или умножение на некоторые коэффициенты, с целью объединения расчетных состояний | Разложение задачи на составляющие воздействия и последующее объединение результатов невозможно   |
| Исходное напряженно-деформированное состояние | Исходное напряженно-деформированное состояние несущественно   | Исходное напряженно-деформированное состояние обычно требуется задать (в особенности для нелинейности, связанной с поведением материала) |

Моделируем железобетонную стеновую панель с учетом физической и геометрической нелинейности. Моделирование физической нелинейности (нелинейной упругости) материалов конструкций производится с помощью физически нелинейных конечных элементов, воспринимающих информацию из развитой библиотеки законов деформирования материалов. Различают законы нелинейного деформирования: 11 – экспоненциальный закон, 14 – кусочно-линейный закон, 15 – экспоненциальный закон деформирования для железобетона, 21 - экспоненциальный (нормативная прочность) закон деформирования, 25 - экспоненциальный (нормативная прочность) закон деформирования, 31 - экспоненциальный (расчетная прочность) закон деформирования, 35 - экспоненциальный (расчетная прочность) закон деформирования (рис. 1.4).

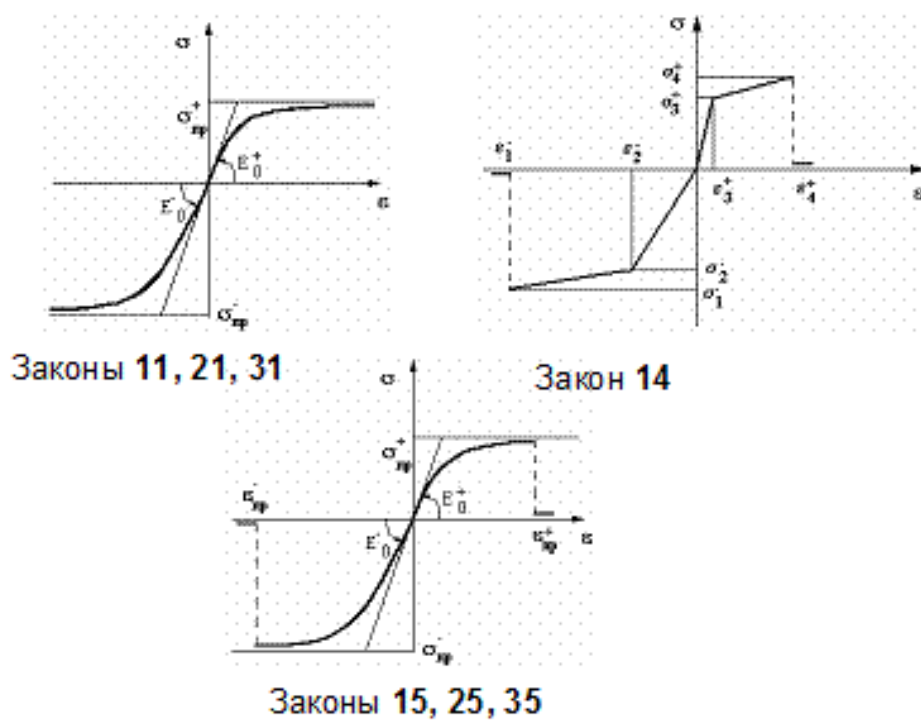


Рис.1.4. Графический вид законов деформирования

Для моделирования железобетона при исследованиях в численном эксперименте для бетона рекомендуется применять 15 или 14 закон, для арматуры – закон 14. В качестве параметров бетона применяются среднестатистические значения предельной прочности и предельных деформаций. Коэффициенты условий безопасности и условий работы, обеспечивающие проектную надежность не выходя за предельное состояние, не учитываются. При проектировании следует

принимать нормативные (Закон 25) или расчетные (закон 35) характеристики материалов в соответствии с нормами проектирования конструкций.

В данной работе решение нелинейной задачи (с физической и геометрической нелинейностью) производится шаговым методом с помощью нелинейного процессора программного комплекса «ЛИРА-САПР». При этом процессор организует пошаговое нагружение конструкции и обеспечивает решение системы уравнений на каждом шаге для текущего приращения вектора узловых нагрузок, сформированного для конкретного нагружения, на каждом шаге производится оценка напряженно-деформированного состояния. На основе шагового метода можно проводить компьютерное моделирование процесса нагружения, отслеживая на каждом шаге появление и развитие трещин, наращивание перемещений, текучесть арматуры. Такой подход предназначен для исследовательских задач, когда необходимо тщательно исследовать определенную конструкцию на отдельное нагружение [15].

## 1.2. Учет нелинейных эффектов в отечественных нормативных документах

Важной особенностью реальных материалов является нелинейный характер зависимости между напряжением и деформацией. Учет таких особенностей деформирования материалов конструкций в расчете позволяет приблизить теоретические прогнозы к реальному их поведению.

В соответствии со статьей 16 федерального закона № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [27] расчетные модели строительных конструкций должны отражать действительные условия работы здания или сооружения, отвечающие рассматриваемой расчетной ситуации, при этом должны быть учтены геометрическая и физическая нелинейность.

Согласно своду правил [21], расчет железобетонных конструкций по предельным состояниям первой и второй групп производят по напряжениям, усилиям, деформациям и перемещениям, вычисленным от внешних воздействий в конструкциях и образуемых ими системах зданий и сооружений с учетом физической нелинейности (неупругих деформаций бетона и арматуры). Физиче-

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 15   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

скую нелинейность следует учитывать в определяющих соотношениях, связывающих между собой напряжения и деформации (или усилия и перемещения), а также в условиях прочности и трещиностойкости материала.

В статически неопределимых конструкциях следует учитывать перераспределение усилий в элементах системы вследствие образования трещин и развития неупругих деформаций в бетоне и арматуре вплоть до возникновения предельного состояния в элементе. При отсутствии методов расчета, учитывающих неупругие свойства железобетона, а также для предварительных расчетов с учетом неупругих свойств железобетона усилия и напряжения в статически неопределимых конструкциях и системах допускается определять в предположении упругой работы железобетонных элементов. При этом влияние физической нелинейности рекомендуется учитывать путем корректировки результатов линейного расчета на основе данных экспериментальных исследований, нелинейного моделирования, результатов расчета аналогичных объектов и экспертных оценок [п.5.1.2, 21].

Расчет железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели производят на основе диаграмм состояния бетона и арматуры, исходя из гипотезы плоских сечений. Критерием прочности нормальных сечений является достижение предельных относительных деформаций в бетоне или арматуре. В общем случае диаграммы состояния имеют криволинейный характер (рис. 1.5, а), но для практических расчетов могут быть использованы более простые. На основании действующих норм проектирования диаграмма растяжения арматуры представлена как двухлинейная, то есть как идеализированная диаграмма Прандтля, согласно которой материал деформируется по закону Гука до предела текучести, а затем течет вплоть до разрыва (рис.1.5. б). Диаграмма сжатия бетона представлена трехлинейной, более близкой к реальной (рис. 1.5, в).

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 16   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

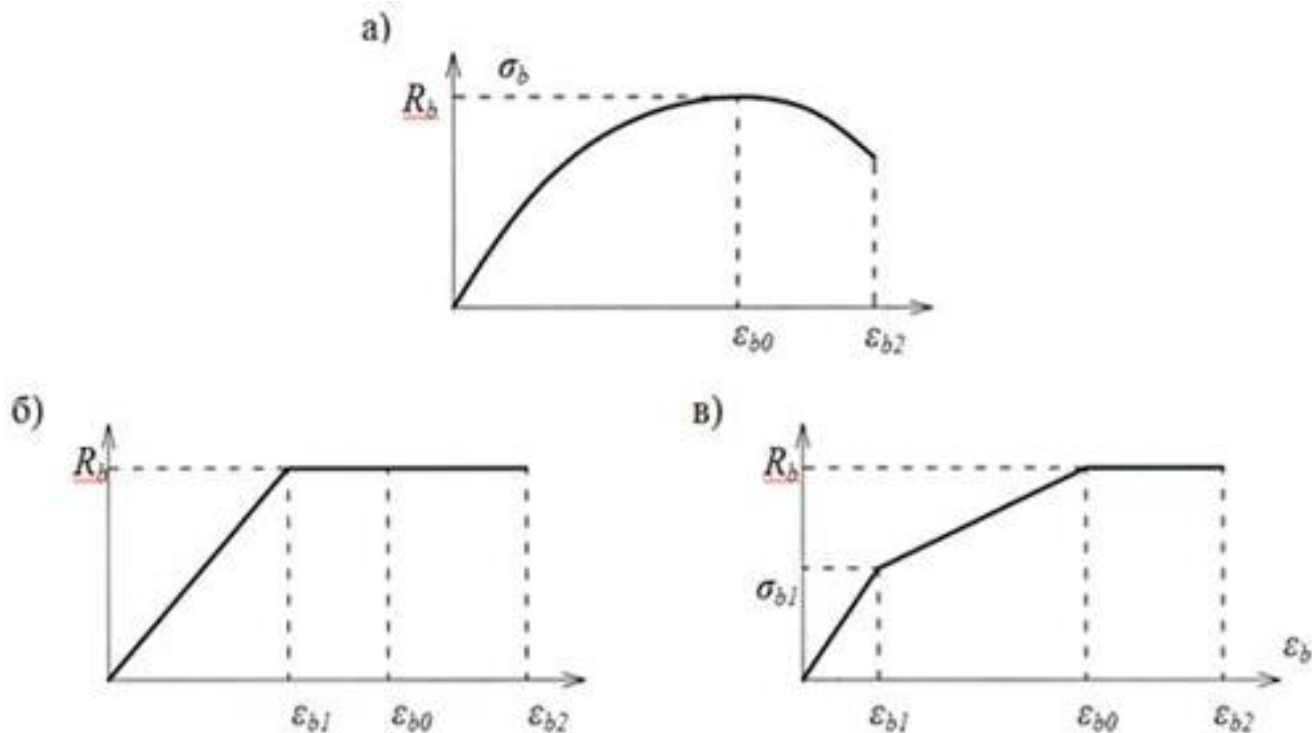


Рис. 1.5. Диаграмма сжатия бетона: а — реальная; б — двухлинейная; в - трехлинейная.

Диаграммы состояния бетона используют при расчете железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели. В качестве расчетных диаграмм состояния бетона, определяющих связь между напряжениями и относительными деформациями, могут быть использованы любые виды диаграмм бетона: криволинейные, в том числе с ниспадающей ветвью, кусочно-линейные (двухлинейные и трехлинейные), отвечающие поведению бетона. При этом должны быть обозначены основные параметрические точки диаграмм (максимальные напряжения и соответствующие деформации, граничные значения и т.д.).

В качестве рабочих диаграмм состояния тяжелого, мелкозернистого и напрягающего бетона, определяющих связь между напряжениями и относительными деформациями, принимают упрощенные трехлинейную и двухлинейную диаграммы (рис. 1.6) по типу диаграмм Прандтля [п.5.2.8, 6.1.19, 21].



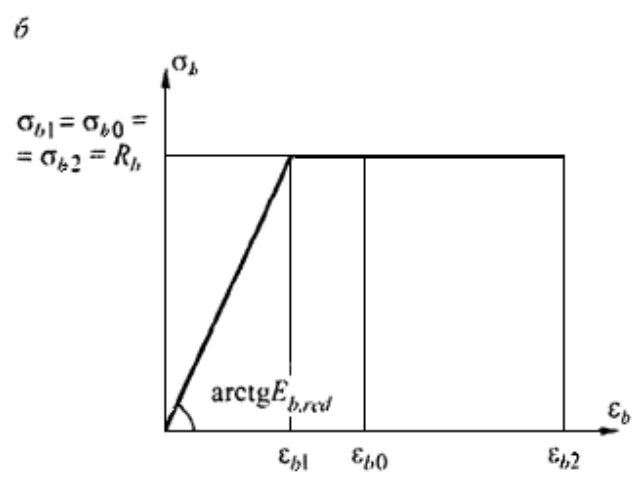
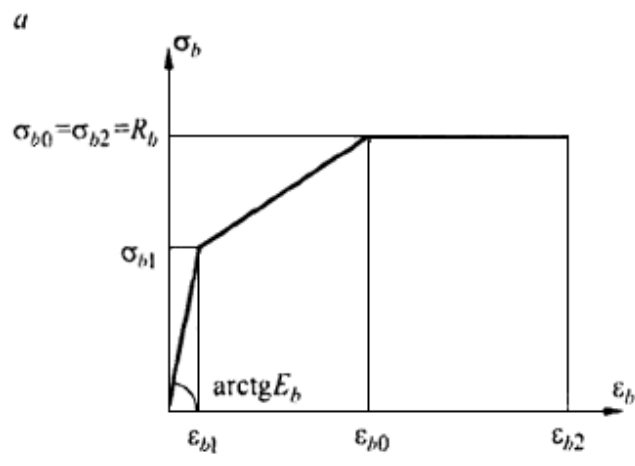


Рис. 1.6. Диаграммы состояния сжатого бетона:

*a* - Трехлинейная диаграмма состояния сжатого бетона; *б* - Двухлинейная диаграмма состояния сжатого бетона

Диаграммы состояния (деформирования) арматуры используют при расчете железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели.

При расчете железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели в качестве расчетной диаграммы состояния (деформирования) арматуры, устанавливающей связь между напряжениями  $\sigma_s$  и относительными деформациями  $\varepsilon_s$  арматуры, принимают упрощенные диаграммы по типу диаграмм Прандтля для арматуры с физическим пределом текучести классов А240-А500, В500 двухлинейную диаграмму (рис. 1.7, а), а для арматуры с условным пределом текучести классов А600-А1000, Вр1200-Вр1500, К1400, К1500 и К1600 - трехлинейную (рис. 1.7, б), без учета упрочнения за площадкой текучести [21].

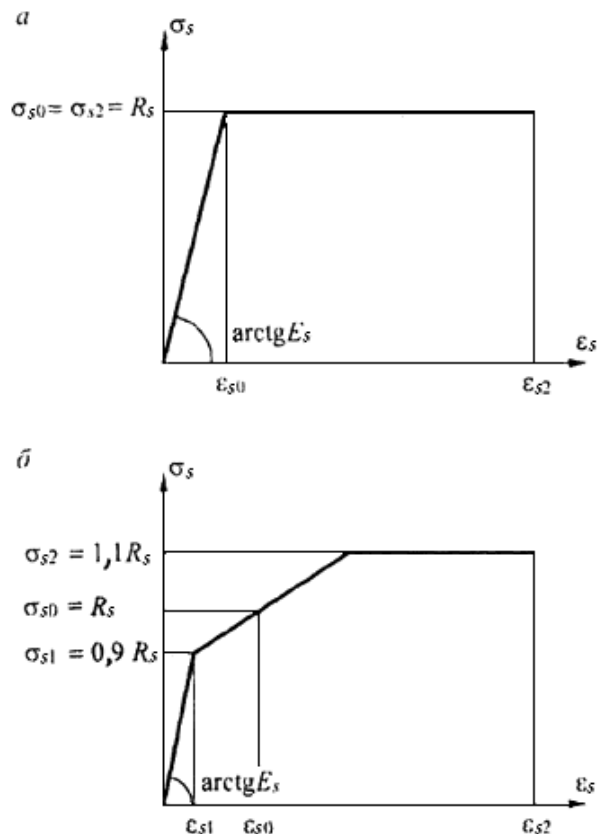


Рис. 1.7. Диаграммы состояния растянутой арматуры: *a* - двухлинейная диаграмма; *б* - трехлинейная диаграмма

Диаграммы состояния арматуры при растяжении и сжатии принимают одинаковыми, с учетом нормируемых расчетных сопротивлений арматуры растяжению и сжатию. Допускается в качестве расчетных диаграмм состояния арматуры использовать криволинейные расчетные диаграммы, аппроксимирующие фактические диаграммы деформирования арматуры [п.6.2.13, 21].

### 1.3. Программные комплексы для нелинейных расчетов конструкций

Одним из наиболее широко применяемых на практике методов прочностного расчета конструкций является метод конечных элементов (МКЭ). Метод имеет простую физическую интерпретацию и тесно связан с методом перемещений, который широко используется в строительной механике.

При использовании МКЭ конструкция разбивается на множество элементов простой геометрической формы (отрезки линий, четырехугольники и т.п.), соединенные между собой в узловых точках. Для этих элементов, названных конечными, аналитическими методами получаются точные и приближенные решения

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 19   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

уравнений, описывающих их напряженно-деформированное состояние (НДС). На основе этих решений составляются уравнения, описывающие НДС всей конструкции. Для решения уравнений МКЭ, как и для их составления, используются вычислительные машины. На базе конечно-элементного подхода разработано большое количество мощных программных комплексов. К ним относятся широко известные программы ANSYS, MicroFe, Лира, Skad. Большинство из них имеет обширную библиотеку конечных элементов и дает возможность выполнять расчеты на прочность, устойчивость и колебания, учитывать физическую и геометрическую нелинейности, ортотропию материала, температурные нагрузки и т. д. Доступность программ МКЭ и физическая наглядность получаемых результатов обеспечили популярность этого метода [1, 24].

В данной работе используется программный комплекс "Ли́ра-САПР 2015". Родоначальником семейства Лира стала появившаяся в середине 60-х программа РПСС — «Расчет пространственных стержневых систем». Тогда ее практически в одиночку сделал Александр Городецкий, сейчас доктор технических наук, профессор, академик РААСН. Затем уже были разработаны программы массового применения (их можно было передавать в разные организации) ЭКСПРЕСС и МИРАЖ (реализация метода конечных элементов), ЛИРА ЕС и многие другие.

В дальнейшем программы семейства Лира логично перешли с больших ЭВМ на персональные компьютеры, и, успешно развиваясь, получили заслуженно высокую оценку у проектировщиков на всей территории бывшего СССР.

В 2011 году среди создателей программы произошел раскол, и большая их часть во главе с Александром Городецким образовала группу компаний LiraLand. Их программы легко узнать по приставке к названию — «САПР», самая новая на сегодняшний день версия основной расчетной программы называется "Ли́ра-САПР 2017". С самого начала «новый» коллектив взял курс на развитие технологии BIM, сохраняя при этом определенную платформенную независимость от основных вендоров (таких как Autodesk). В результате появилась программа Сапфир (Система автоматизированного проектирования формообразования и расчета), первоначально рассматривавшаяся ее создателями как препроцессор для рас-

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 20   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

четного модуля Лира-САПР, в том числе и для передачи модельных данных через формат «IFC» из наиболее популярных BIM-программ (Revit, ArchiCAD). У другой части разделившихся разработчиков (компания «ЛИРА софт») самая новая версия программы сегодня называется ЛИРА 10.6 [28].

#### 1.4. Железобетонные стеновые панели

Стеновые панели работают в составе конструктивной системы, выполняют ограждающие и несущие функции, обеспечивают конструкционную безопасность и эксплуатационную пригодность зданий и сооружений. Они испытывают различные виды воздействий, вызывая в материале конструкций плоское напряженное состояние. В зависимости от предъявляемых требований панели выполняют одно- и многослойными, из тяжелого и легкого бетонов, одно- и многопролетными, с отверстиями и проемами, составными [18].

Наружные стены панельных зданий проектируют несущими, самонесущими или ненесущими. Применение самонесущих стен преимущественно ограничено зданиями средней этажности. Несмотря на исключительное разнообразие опробованных во всех странах систем разрезов наружных стен на сборные элементы, массовое применение получила только однорядная разрезка (панели высотой в этаж, протяженностью на одну-две комнаты). Панели несущих и самонесущих стен проектируют как внецентренно сжатые бетонные конструкции. Однако, однослойные панели даже ненесущих стен содержат конструктивное армирование, необходимое для анкеровки стальных связевых элементов и для предохранения панелей от сколов и трещин при транспортировании и монтаже [12].

Согласно ГОСТ 11024-2012 [6] исследуемые панели классифицирую как 1НС (НСТ) - однослойная наружная стеновая ненесущая панель однорядной разрезки.

Армируют панели пространственными сварными арматурными блоками размерами на панель. Блок для панели с проемом состоит из каркаса перемычки, вертикальных и горизонтальных каркасов по граням панели и проемов, подъемных петель и связевых элементов [12].

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 21   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

По характеру работы в несущей системе здания панели можно разделить на два класса:

- панели, воспринимающие сжимающие усилия;
- панели, испытывающие изгиб.

Несмотря на имеющиеся различия, общей их чертой является работа материала конструкций в условиях плоского напряженного состояния. Для оценки его прочности и трещиностойкости разработана физическая модель разрушения, на основе которой создана теория сопротивления бетона при сжатии.

Панели, испытывающие изгиб, являются балками-стенками т.е. плосконапряженными конструкциями, в которых высота (H) и длина (L) соизмеримы ( $L / H < 2$ ), а толщина значительно меньше этих двух размеров (до 10 раз) [18, 19].

В данной работе рассматриваются панели, воспринимающие сжимающие усилия. Рассчитываем железобетонные стеновую панель в зависимости от соотношений размеров ( $L_{max}=4840$  мм,  $h=200$  мм,  $10 < L_{max}/h < 100$ ) как плиту (тонкие пластинки), железобетонные плиты обычно считают жесткими [9].

Если же говорить о подобных исследованиях железобетонных панелей, то необходимо сказать о труде Соколова Б.С. "Прочность и трещиностойкость стеновых панелей зданий" [18]. В его монографии изложен новый подход к расчету железобетонных стеновых панелей зданий с использованием теории сопротивления бетона и железобетона при сжатии. Основой для разработки методик расчета панелей служит теория сопротивления анизотропных материалов сжатию.

Изучение и анализ литературы, посвященной исследованиям сжатых элементов, показали, что в сжимающем силовом потоке между грузовыми и опорными площадками существуют две области напряженного состояния: область сжатия-сжатия непосредственно под площадками и сжатия-растяжения – между ними. Размеры областей зависят, в основном, от отношения длины площадок к высоте элемента. Разрушение материала в силовом потоке может происходить в обеих областях. Однако, поскольку прочность материала в области сжатия-растяжения меньше, чем в области сжатия-сжатия, разрушение в большинстве случаев начинается с области сжатия-растяжения. При этом под грузовыми и опорными пло-

|  |  |          |         |      |  |  |  |  |      |
|--|--|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
|  |  |          |         |      |  |  |  |  | Лист |
|  |  |          |         |      |  |  |  |  | 22   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |  |  |  |  |      |

АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР

щадками формируются уплотнения в виде клиньев, повторяющих в основании форму площадок (пирамиду, конус и др.), под действием которых, по мере увеличения внешних усилий от нуля до разрушающих, происходит изменение напряженно-деформированного состояния в области сжатия-растяжения, характеризующееся тремя стадиями – упругой, стадией образования и раскрытия трещин, стадией разрушения.

Рабочая гипотеза Соколова: в области сжатия-сжатия образуются уплотнения в виде клиньев, под действием которых при увеличении нагрузок происходит разрушение бетона в области сжатия-растяжения сжимающего силового потока от преодоления сопротивления материала отрыву, сдвигу и раздавливанию. На основании этой гипотезы разработана физическая модель, описывающая процесс разрушения материала при сжатии, обоснованы стадии изменения напряженно-деформированного состояния [18, 19].

В ходе проведения натурных испытаний Соколовым были подробно изучены процессы образования трещин и разрушения железобетона, однако вопросы о характере деформирования панелей под действием нагрузки не рассматривались.

### 1.5. Постановка задачи

Имеются результаты испытаний трех железобетонных стеновых панелей по ГОСТ 8829-94 [5]. Необходимо замоделировать данный эксперимент в ПК «Лира-САПР 2015», используя рабочие чертежи панелей (геометрические характеристики, армирование, размеры проемов и т.д.), схемы испытаний (программы нагружений, закрепление панелей), учитывая нелинейные свойства материалов (физическую и геометрическую нелинейности). Исследуя основные параметры, выполнить несколько вариантов моделирования для определения подходящей конечно-элементной модели. Сравнить результаты численного и натурального экспериментов, сделать выводы о работе конструкций.

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 23   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

## 2. Натурные испытания железобетонных панелей

Испытания панелей проводились согласно ГОСТ 8829-94 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости» [5]. Условная схема испытаний приведена на рисунках 2.1, 2.2.

### 1. Объекты испытаний:

- панель стеновая железобетонная 1 НС 48.30-1;
- панель стеновая железобетонная 1 НСТ 58.30-1;
- панель стеновая железобетонная 1 НСТ 58.30.

### 2. Цель испытаний: определение разрушающей нагрузки

### 3. Атмосферные условия:

- температура воздуха в испытательном помещении ( $18\pm 3$ ) °С,
- относительная влажность ( $60\pm 20$ ) %,
- атмосферное давление ( $720\pm 30$ ) мм рт. столба.

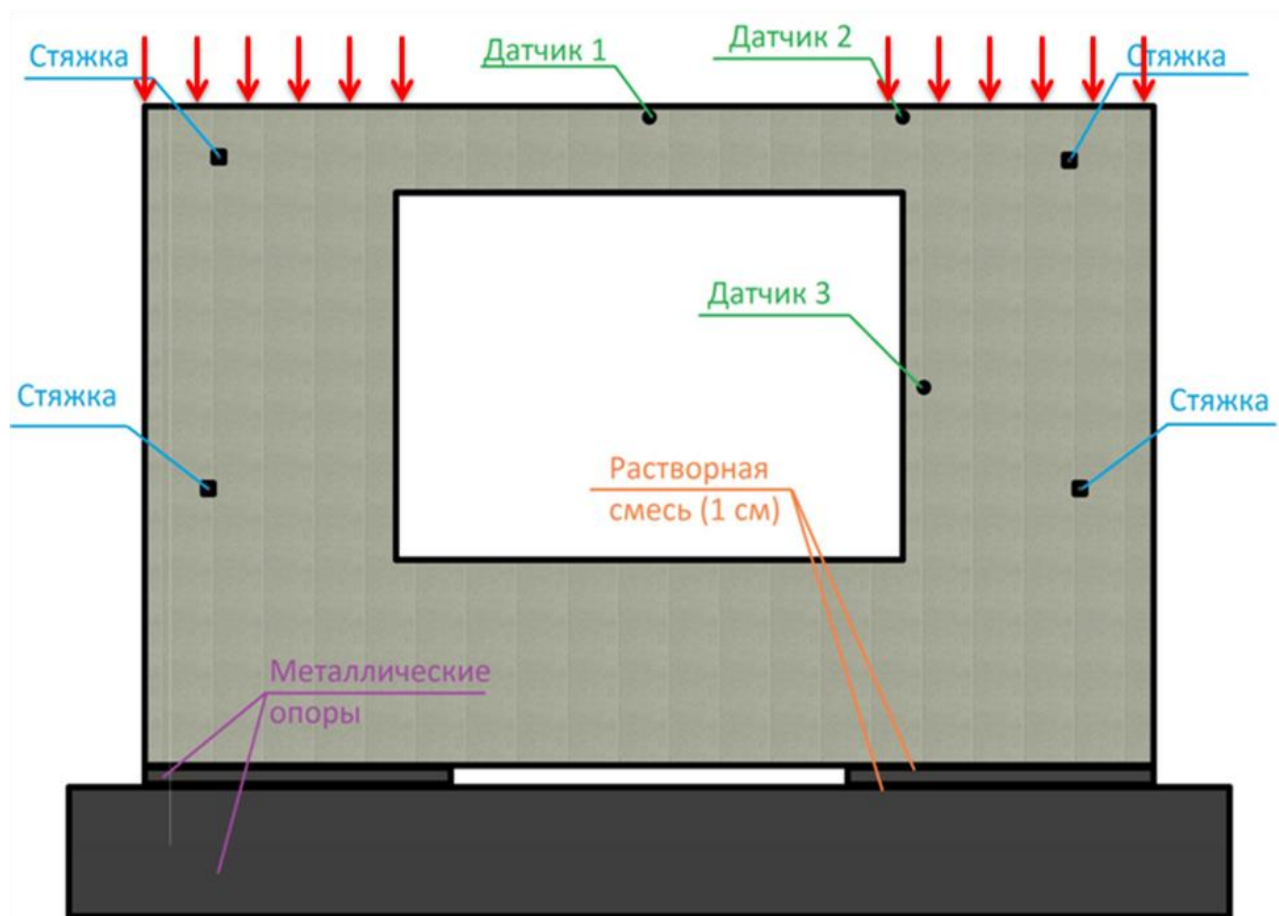


Рис. 2.1. Схема испытаний. Вид спереди

|  |  |          |         |      |  |  |  |  |  |      |
|--|--|----------|---------|------|--|--|--|--|--|------|
|  |  |          |         |      |  |  |  |  |  | Лист |
|  |  |          |         |      |  |  |  |  |  | 24   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |  |  |  |  |  |      |

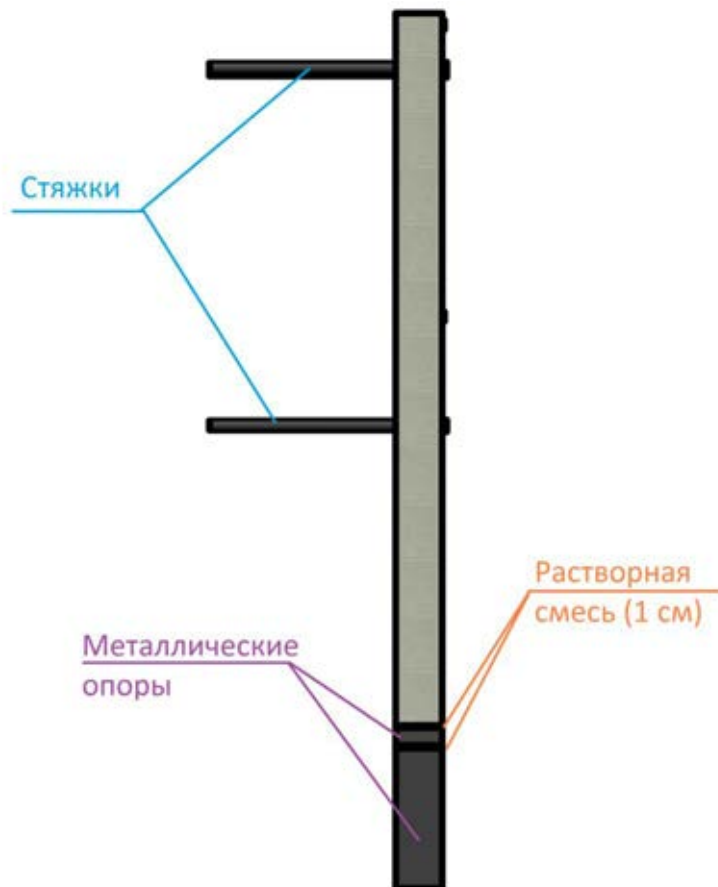


Рис. 2.2. Схема испытаний. Вид сбоку.

#### 4. Условия проведения испытаний:

Панели испытывали в том положении, в котором они будут эксплуатироваться в конструкциях зданий. Опираие испытываемого изделия на шарнирные опоры осуществлялось через стальные плиты, симметрично расположенные относительно оси опоры. На опорные плиты перед установкой на них испытываемого изделия был уложен выравнивающий слой цементного раствора, прочность которого достаточна для восприятия нагрузки на опорах, таким образом, панели установлены на опоры на растворную смесь [5]. Примем толщину выравнивающего цементного раствора 1 см, на эту толщину произведем расчет жесткости раствора.



## 2.1. Панель стеновая железобетонная 1 НС 48.30-1

Эксплуатационные и расчётные нагрузки: контрольная нагрузка по проверке жесткости  $q= 125,8$  тс/м; расчетная нагрузка по проверке прочности  $q=144,7$  тс/м. Величина нагрузки, приходящейся на один пролёт, определялась по зависимости

$$Q_{\text{расч}}=q \cdot l, \quad (1)$$

где:  $q$  - распределённая нагрузка;

$l$  - длина пролёта.

Нагружение панели производилось от одного насоса, запись показаний датчиков силы (силы  $Q_1, Q_2$ ) производилась отдельно.

Схема установки для испытаний и расстановки датчиков перемещений приведена на рис.2.5, вид установки приведен на рисунках 2.3, 2.4.

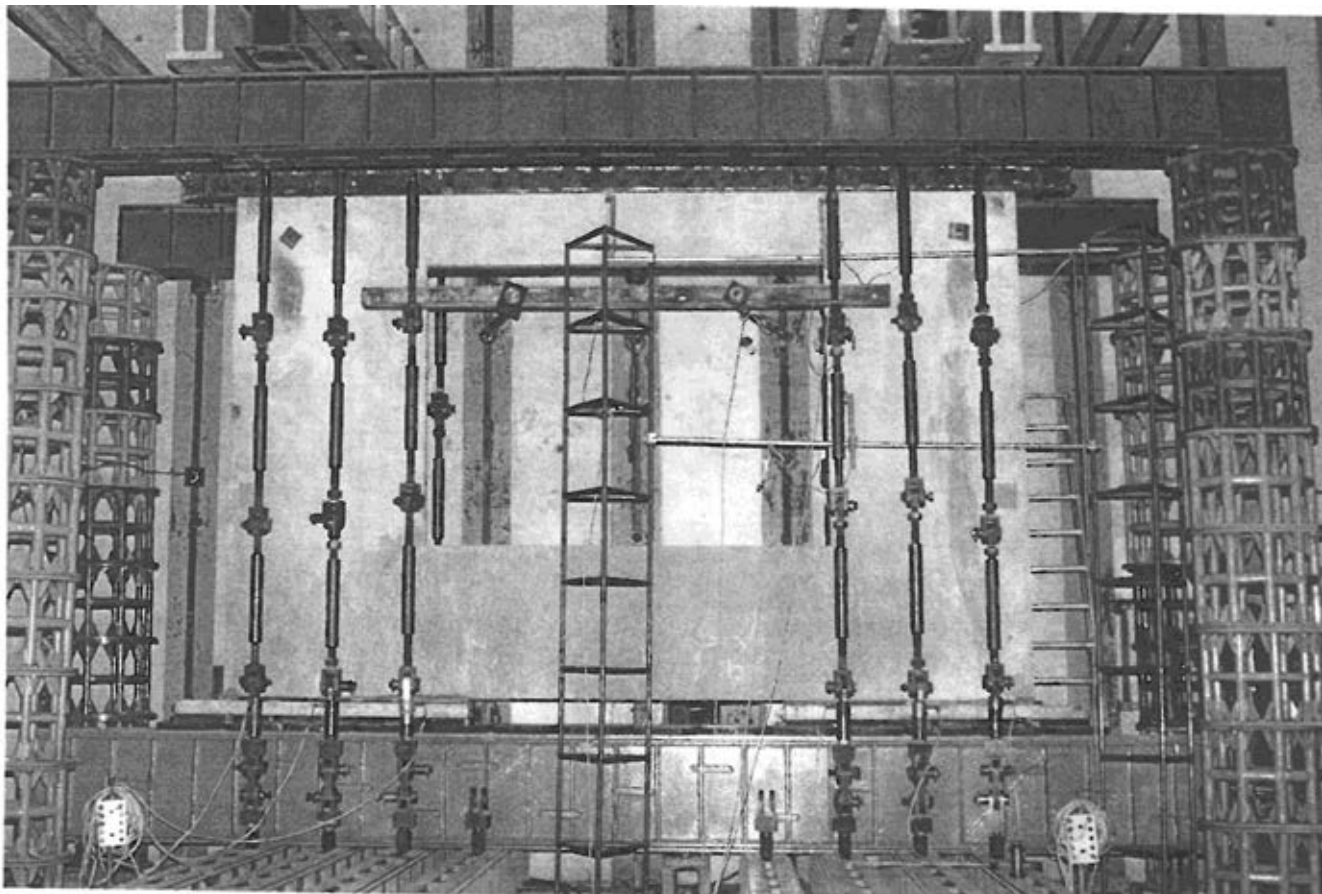


Рис. 2.3. Фото испытаний. Вид спереди

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 26   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

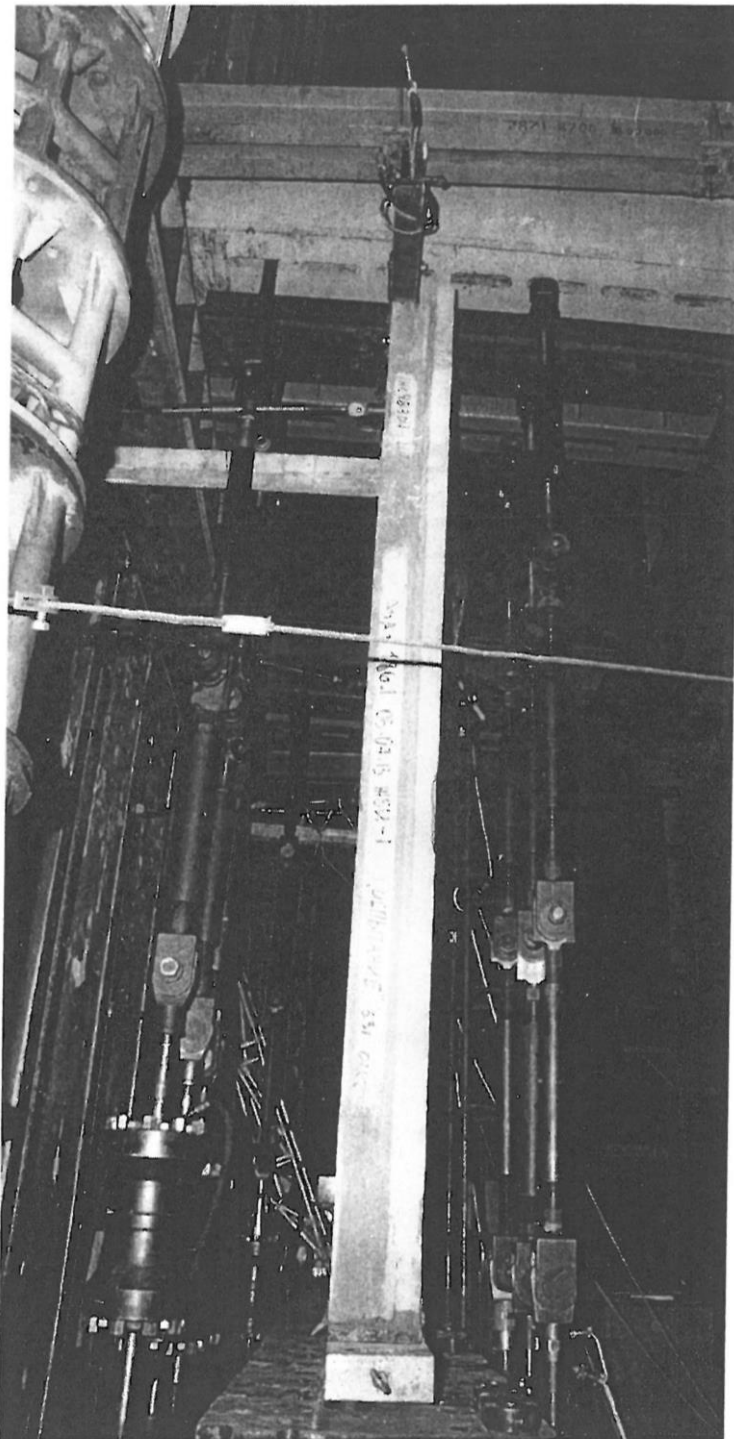


Рисунок 2. Вид испытательной установки панели 1 НС 48.30-1

Рис. 2.4. Фото испытаний. Вид спереди

### 2.1.1. Геометрические характеристики панели 1 НС 48.30-1

$t = 0,2$  м – толщина плиты;

$b = 4,78$  м – ширина панели;

$h = 3,05$  м – высота плиты;

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 27   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

Проем размерами 2,4x1,7 м;

$a' = 45 \text{ мм} = 0,045 \text{ м}$  – минимальный защитный слой бетона;

$a = 0,05 \text{ м}$ .

Армирование панели состоит из объемных каркасов, состоящих из плоских каркасов и сеток, отдельных стержней. При расчете учитываем основные каркасы и сетки. Расчетные площади поперечных сечений при определенном числе стержней определяем по Приложению 6 из учебника Байкова В.Н "Железобетонные конструкции" [2], см. таблицы 2.1, 2.2.

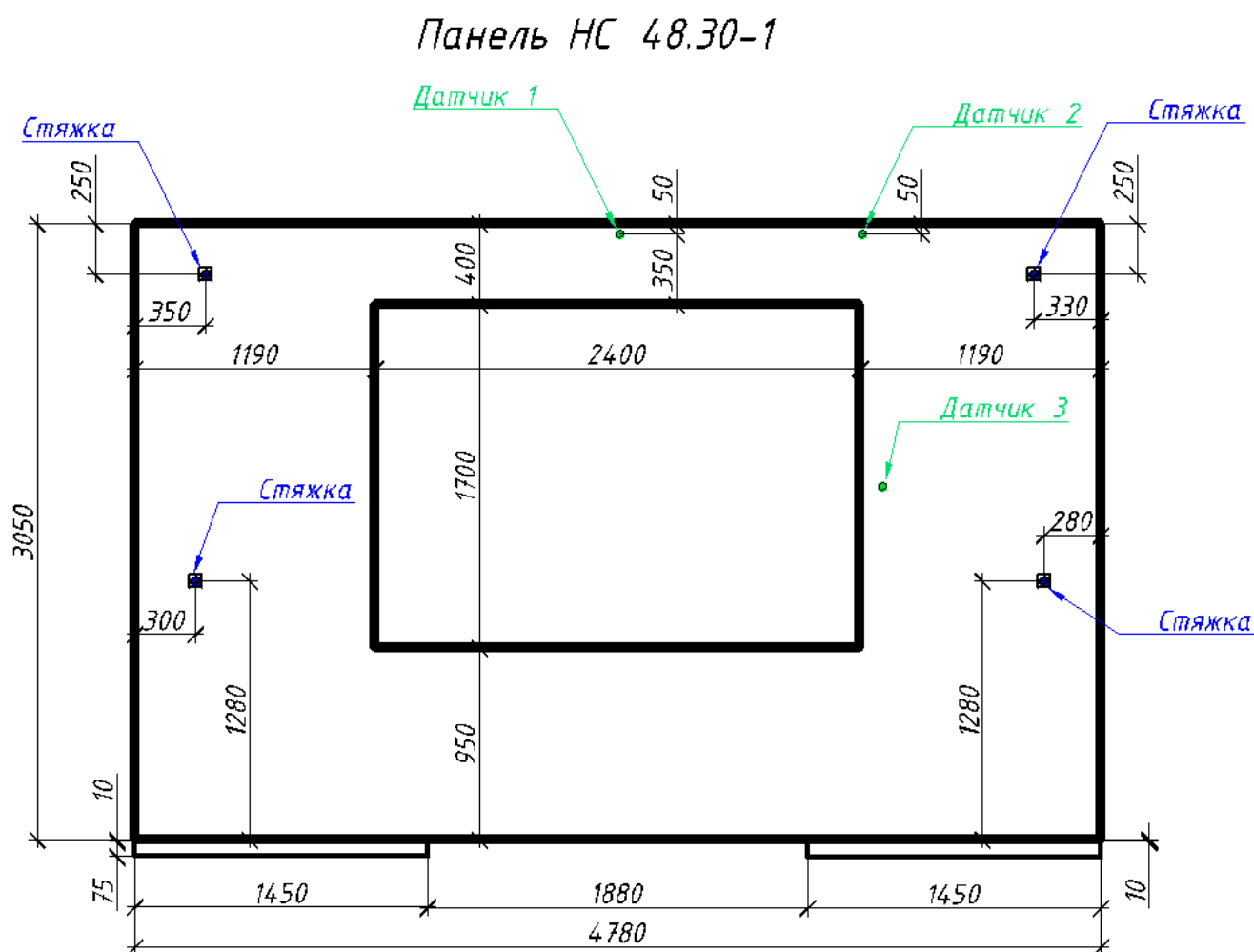


Рис. 2.5. Геометрические характеристики панели 1 НС 48.30-1

Табл. 2.1. Каркасы и сетки

| Сетки   | Каркасы     |
|---------|-------------|
| С49     | К50 - 2 шт. |
| С50л/пр | К44         |
| С52     | К46         |

Табл. 2.2. Армирование плиты 1НС 48.30-1

| Участок панели           | Слои    | Состав сетки/каркаса на 1 п.м.   | S, см <sup>2</sup> | Привязка, z, см | Толщина пласта (H <sub>x</sub> , H <sub>y</sub> ), см |
|--------------------------|---------|----------------------------------|--------------------|-----------------|---|
| I<br>(верх<br>середина)  | K50     | Y: 6Ø5 (Bp-I)<br>X: 2Ø10 (A-III) | 1,18<br>1,57       | 4,5             | 0,0118<br>0,0157                                      |
|                          | C49     | Y: 6Ø8 (A-III)<br>X: 6Ø5 (Bp-I)  | 3,02<br>1,18       |                 | 5   |
|                          | K50     | Y: 6Ø5 (Bp-I)<br>X: 2Ø10 (A-III) | 1,18<br>1,57       | -4,5            | 0,0118<br>0,0157                                      |
| II<br>(бока)             | K44     | Y: 8Ø8 (A-III)<br>X: 5Ø5 (Bp-I)  | 4,02<br>0,98       | 4,5             | 0,0402<br>0,0098                                      |
|                          | C50л/пр | Y: 6Ø8 (A-III)<br>X: 6Ø5 (Bp-I)  | 3,02<br>1,18       |                 | 5   |
|                          | K44     | Y: 8Ø8 (A-III)<br>X: 5Ø5 (Bp-I)  | 4,02<br>0,98       | -4,5            | 0,0402<br>0,0098                                      |
| III<br>(низ<br>середина) | K46     | Y: 3Ø8 (A-III)<br>X: 5Ø5 (Bp-I)  | 1,51<br>0,98       | 4,5             | 0,0151<br>0,0098                                      |
|                          | C52     | Y: 6Ø8 (A-III)<br>X: 6Ø5 (Bp-I)  | 3,02<br>1,18       |                 | 5   |
|                          | K46     | Y: 3Ø8 (A-III)<br>X: 5Ø5 (Bp-I)  | 1,51<br>0,98       | -4,5            | 0,0151<br>0,0098                                      |
| IV<br>(углы)             | K44     | Y: 8Ø8 (A-III)<br>X: 5Ø5 (Bp-I)  | 4,02<br>0,98       | 5,5             | 0,0402<br>0,0098                                      |
|                          | K50     | Y: 6Ø5 (Bp-I)<br>X: 2Ø10 (A-III) | 1,18<br>1,57       |                 | 4,5   |
|                          | C52     | Y: 6Ø8 (A-III)<br>X: 6Ø5 (Bp-I)  | 3,02<br>1,18       | 5               |   |
|                          | K50     | Y: 6Ø5 (Bp-I)<br>X: 2Ø10 (A-III) | 1,18<br>1,57       |                 | -4,5  |
|                          | K44     | Y: 8Ø8 (A-III)<br>X: 5Ø5 (Bp-I)  | 4,02<br>0,98       | -5,5            | 0,0402<br>0,0098                                      |

Координаты датчиков для замеров перемещений, установленных на панели при натурных испытаниях приведены в таблице 2.3. Координаты стяжек, удерживающих плиту от горизонтальных перемещений при натурных испытаниях, представлены в таблице 2.4. Координаты точек проема панели приведены в таблице 2.5. (для удобства моделирования). За начало координат (0,0,0) принят левый нижний угол панели.

|  |  |          |         |      |  |      |
|--|--|----------|---------|------|--|------|
|  |  |          |         |      |  | Лист |
|  |  |          |         |      |  | 29   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |  |      |

АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР

Табл. 2.3. Координаты датчиков для замеров перемещений

| № точки замера | Координата по «X» | Координата по «Z» |
|----------------|-------------------|-------------------|
| 1              | 2.4               | 3                 |
| 2              | 3.6               | 3                 |
| 3              | 3.7               | 1.75              |

Табл. 2.4. Координаты стяжек, удерживающих плиту по оси «Y»

| Номер стяжки | Координата по «X» | Координата по «Z» |
|--------------|-------------------|-------------------|
| 1            | 0.35              | 2.8               |
| 2            | 4.45              | 2.8               |
| 3            | 0.3               | 1.28              |
| 4            | 4.5               | 1.28              |

Табл. 2.5. Координаты точек проема панели 1 НС 48.30-1

| Номер стяжки | Координата по «X» | Координата по «Z» |
|--------------|-------------------|-------------------|
| 1            | 1.19              | 0.9               |
| 2            | 1.19              | 2.6               |
| 3            | 3.6               | 0.9               |
| 4            | 3.6               | 2.6               |

### 2.1.2. Программа натурных испытаний панели 1 НС 48.30-1

Распределённая нагрузка  $q$  заменялась комплексом сосредоточенных сил  $Q$ . Нагружение панели по схеме рис. 1 проводились два раза. Нагружение №1 (опрессовка) проводилось нагрузкой 20% от контрольной нагрузки по жёсткости. Нагружение № 2 проводилось этапами до контрольных нагрузок по жесткости и трещиностойкости в соответствии с таблицей 2 (рис. 2.6), в которой приведены заданные и фактические созданные нагрузки, а так же значения перемещений.

### 2.1.3. Результаты испытаний панели 1 НС 48.30-1

При выдержке на этапе 45% появилась трещина в районе закладной под силой  $Q1$ . После сброса нагрузки до нуля систему измерений перемещения демонтировали. Нагружение № 3 проводилось этапами в соответствии с таблицей 2 (рис. 2.6), в которой приведены заданные и фактические созданные нагрузки.

При выдержке на этапе 127 % была обнаружена трещина вдоль фасадной стороны панели. На последующих этапах происходило раскрытие данной трещины. Нагружение проводилось до 142%. Максимальная достигнутая нагрузка при

|  |  |          |         |      |  |      |
|--|--|----------|---------|------|--|------|
|  |  |          |         |      |  | Лист |
|  |  |          |         |      |  | 30   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |  |      |

АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР

испытаниях составила  $Q_1 = 270,2$  тс (с учетом веса оснастки), запас прочности по силе  $Q$  по отношению к расчетной нагрузке превышает 1,42.

| № этапа                                  | Проверка жесткости |      |      |       |       |      | Демонтаж датчиков перемещения. | Проверка прочности |       |       |       |      |
|--|--------------------|------|------|-------|-------|------|--------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|------|
|  | 1                  | 2    | 3    | 4     | 5     | 6    |                                | 1                  | 2     | 3     | 4     | 5    |
| %  | 20                 | 40   | 60   | 80    | 100   | Ост. |                                | 130                | 140   | 150   | 160   | Ост. |
| $q_{доп}$ , тс/м заданная                | 25,2               | 50,3 | 75,5 | 100,6 | 125,8 | -    |                                | 188,1              | 202,6 | 217,1 | 231,5 | -    |
| $Q$ , тс заданная                        | 32,6               | 65,2 | 97,7 | 130,3 | 162,9 | -    |                                | 243,6              | 262,3 | 281,1 | 299,8 | -    |
| $Q_1$ , тс при испытаниях                | 32,5               | 65,0 | 97,7 | 130,4 | 163,0 | 3,9  |                                | 243,8              | 261,7 | 281,1 | 299,8 | 2,4  |
| $Q_2$ , тс при испытаниях                | 30,8               | 62,3 | 94,2 | 126,0 | 157,5 | 2,4  |                                | 235,7              | 256,0 | 277,0 | 297,0 | 8,5  |
| $Q_1$ , тс с учетом веса оснастки        | 35,8               | 68,3 | 101  | 133,7 | 166,3 | 7,2  |                                | 247,1              | 265,0 | 284,4 | 303,1 | 5,7  |
| $Q_2$ , тс, с учетом веса оснастки       | 34,1               | 65,6 | 97,5 | 129,3 | 160,8 | 5,7  |                                | 239,0              | 259,3 | 280,3 | 300,3 | 11,8 |
| $q_{доп}$ , тс/м, с учетом веса оснастки | 27,7               | 52,8 | 78,0 | 103,3 | 128,4 | -    |                                | 190,8              | 204,6 | 219,6 | 234,1 | -    |
| $\Delta 1$ , мм                          | -1,5               | -3,0 | -4,5 | -6,2  | -7,8  | -0,1 |                                |                    |       |       |       |      |
| $\Delta 2$ , мм                          | -1,7               | -3,3 | -5,0 | -7,0  | -8,5  | -1   |                                |                    |       |       |       |      |
| $\Delta 3$ , мм                          | 0,8                | 1,9  | 2,9  | 4,0   | 5,2   | 0,6  |                                |                    |       |       |       |      |
| Время выдержки, мин.                     | 5                  | 5    | 5    | 5     | 10    | -    |                                | 10                 | 5     | 5     | 8     | -    |

Результаты нагружения панели 1 НС 48.30-1.

Рис. 2.6. Результаты испытаний панели 1НС 48.30-1

## 2.2. Панель стеновая железобетонная 1 НСТ 58.30

Эксплуатационные и расчётные нагрузки: контрольная нагрузка по проверке жесткости  $q=64,1$  тс/м; расчетная нагрузка по проверке прочности  $q=73,8$  тс/м.

Распределённая нагрузка  $q$  заменялась комплексом сосредоточенных сил  $Q$ . Величина нагрузки, приходящейся на один пролёт, определялась по зависимости (1).

Нагружение панели производилось от двух насосов, запись показаний датчиков силы (силы  $Q_1, Q_2, P_1, P_2$ ), датчиков перемещения ( $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3$ ) производилась отдельно. Схема установки для испытаний приведена на рис. 2.9, вид установки приведен на рисунках 2.7, 2.8.

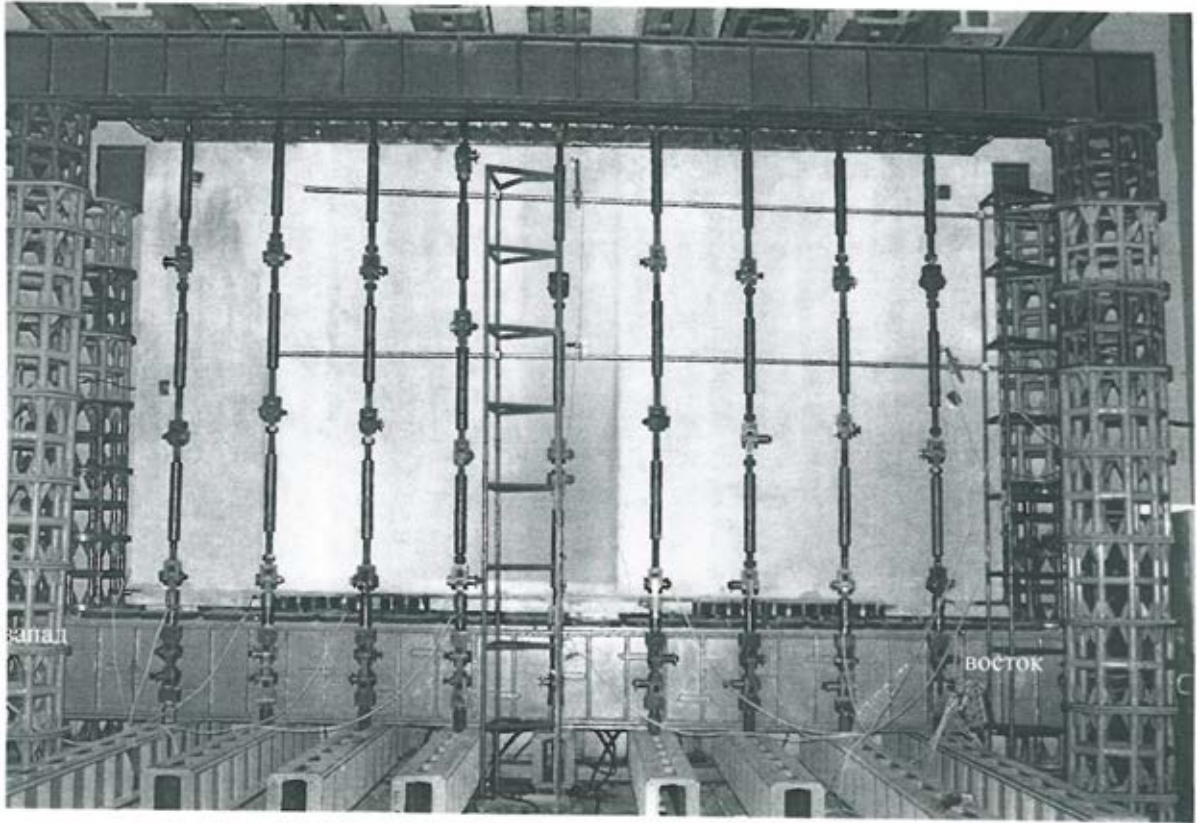


Рис. 2.7. Фото испытаний. Вид спереди.

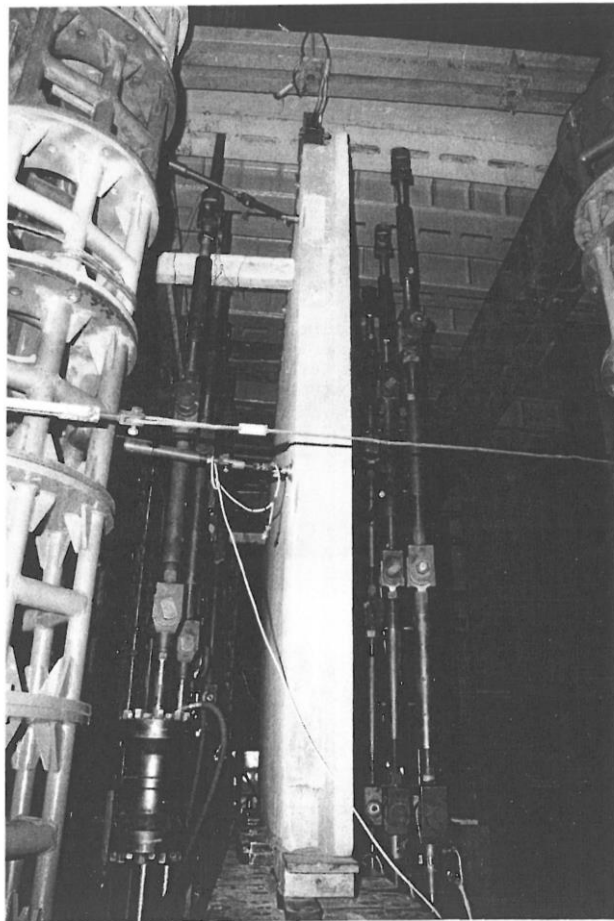


Рисунок 2. Вид испытательной установки панели 1 НСТ 58.30.  
Рис. 2.8. Фото испытаний. Вид сбоку.

|          |         |      |  |
|----------|---------|------|--|
|          |         |      |  |
|          |         |      |  |
| № докум. | Подпись | Дата |  |







Табл. 2.9. Координаты стяжек, удерживающих плиту по оси «Y»

| Номер стяжки | Координата по «X» | Координата по «Z» |
|--------------|-------------------|-------------------|
| 1            | 0.5               | 2.8               |
| 2            | 5.4               | 2.8               |
| 3            | 0.45              | 1.5               |
| 4            | 5.45              | 1.5               |

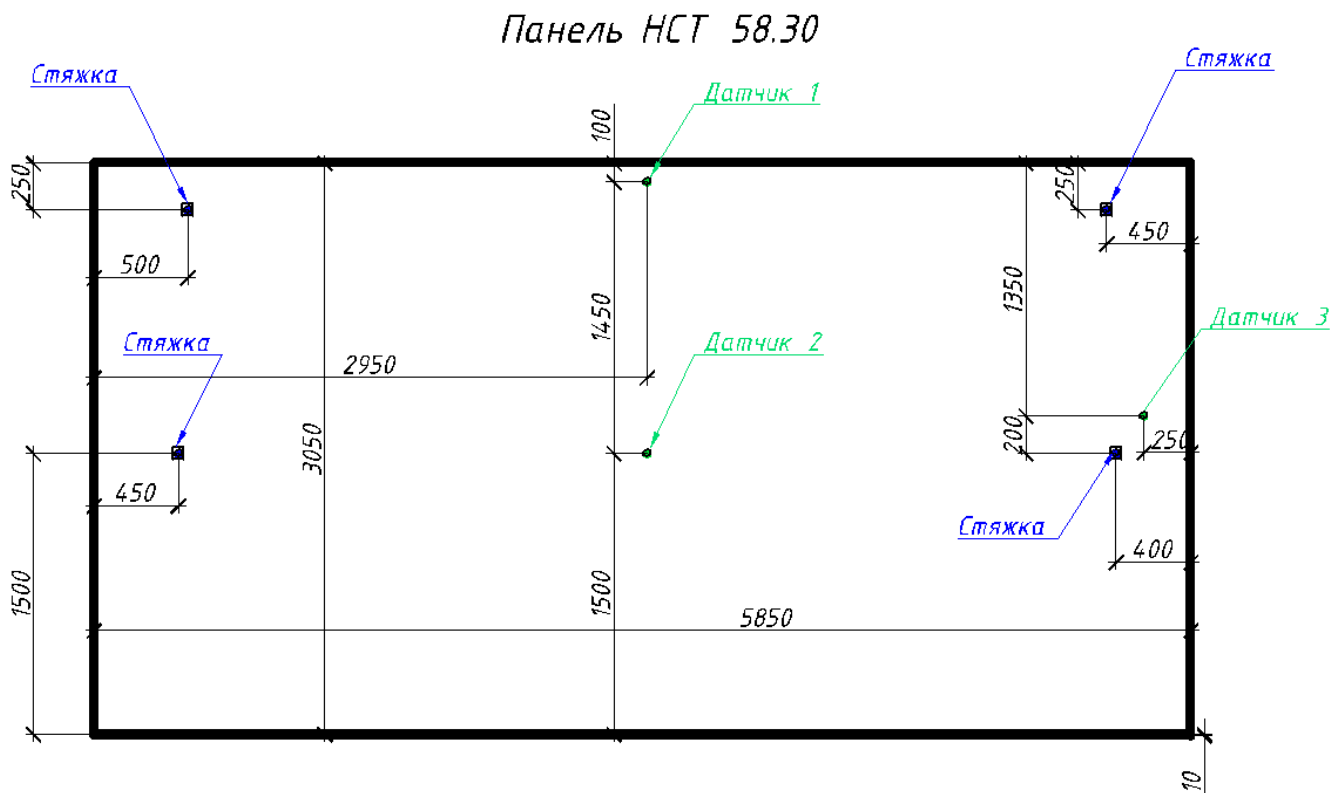


Рис. 2.9. Геометрические характеристики панели 1НСТ 58.30.

### 2.2.2. Программа натуральных испытаний панели 1 НСТ 58.30

Распределённая нагрузка  $q$  заменялась комплексом сосредоточенных сил  $Q$ . Нагружения панели по схеме (рис. 2.7, 2.8) проводились два раза. Нагружение № 1 проводилось этапами до контрольных нагрузок по жесткости и трещиностойкости в соответствии с таблицей 2 (рис. 2.10), в которой приведены заданные и фактические созданные нагрузки, а также значения перемещений. После сброса нагрузки до нуля систему измерений перемещения демонтировали. Нагружение № 2 проводилось этапами в соответствии с таблицей (рис. 2.10), в которой приведены заданные и фактические созданные нагрузки. Нагружение проводилось до 170% от расчетной нагрузки по прочности.

### 2.2.3. Результаты испытаний панели 1 НСТ 58.30

Максимальная достигнутая нагрузка при испытаниях составила  $q = 126,5$  тс/м (с учетом веса оснастки). Несущую способность панель при максимальных нагрузках не потеряла.

Таблица 2

| № этапа   | Проверка жесткости |       |       |       |       |      | Демонтаж датчиков перемещения (1,2,3) и датчиков силы (P1, P2) | Проверка прочности |       |       |       |       |       |       |   |
|---|--------------------|-------|-------|-------|-------|------|--|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
|   | 1                  | 2     | 3     | 4     | 5     | 6    |  | 1                  | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8 |
| %   | 20                 | 40    | 60    | 80    | 100   | Ост. | 100  | 110                | 120   | 130   | 140   | 150   | 160   | 170   |   |
| q <sub>доп</sub> , тс/м заданная                | 12,8               | 25,6  | 38,5  | 51,3  | 64,1  | -    | 73,8   | 81,2               | 88,6  | 96    | 103,3 | 110,7 | 118,1 | 125,5 |   |
| Q, тс заданная                                  | 70,8               | 141,7 | 212,5 | 283,4 | 354,2 | -    | 407,8  | 448,6              | 489,4 | 530,2 | 570,9 | 611,7 | 652,5 | 693,3 |   |
| Q, тс при испытаниях                            | 70,8               | 141,8 | 212,5 | 283,2 | 354,4 | 12,2 | 407,9  | 448,5              | 489,4 | 530,4 | 571,0 | 611,8 | 652,6 | 693,4 |   |
| Q тс, с учетом веса оснастки                    | 81,1               | 152,1 | 222,8 | 293,5 | 364,7 | 22,5 | 418,2  | 458,8              | 499,7 | 540,7 | 581,3 | 622,1 | 662,9 | 703,7 |   |
| q <sub>доп</sub> , тс/м, с учетом веса оснастки | 14,6               | 27,3  | 40,1  | 52,8  | 65,6  | -    | 75,2   | 82,5               | 89,8  | 97,2  | 104,5 | 111,8 | 119,2 | 126,5 |   |
| Δ1, мм  | -0,2               | -0,6  | -1,1  | -1,5  | -1,9  | -0,3 |  |                    |       |       |       |       |       |       |   |
| Δ2, мм  | -0,2               | 0,1   | 0,3   | 0,6   | 0,8   | -0,2 |  |                    |       |       |       |       |       |       |   |
| Δ3, мм  | 0,1                | 0,4   | 0,8   | 1,1   | 1,5   | -0,1 |  |                    |       |       |       |       |       |       |   |
| P1, тс  | 0,0                | 0,0   | 0,1   | 0,3   | 0,5   | 0,0  |  |                    |       |       |       |       |       |       |   |
| P2, тс  | 0,0                | 0,2   | 0,4   | 0,6   | 0,7   | -0,1 |  |                    |       |       |       |       |       |       |   |
| Время выдержки, мин.                            | 5                  | 5     | 5     | 5     | 10    | -    | 10   | 5                  | 5     | 10    | 5     | 5     | 10    | 5     |   |

Примечание:

- знак « - » (минус) у датчиков перемещения означает перемещение панели в направлении стрелки датчика, знак «+» (плюс) - против стрелки датчика;

Результаты нагружения панели 1 НСТ 58.30.

Рис. 2.10. Результаты испытаний панели 1НСТ 58.30.

### 2.3. Панель стеновая железобетонная 1 НСТ 58.30-1

Эксплуатационные и расчётные нагрузки: контрольная нагрузка по проверке жесткости  $q=84,1$  тс/м; расчетная нагрузка по проверке прочности  $q=96,8$  тс/м.

Нагружение панели производилось от двух насосов, запись показаний датчиков силы (силы  $Q_1, Q_2, P1, P2$ ), датчиков перемещений ( $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3$ ) производилась отдельно. Схема установки для испытаний приведена на рис. 2.13, вид установки приведен на рис. 2.11, 2.12.

|          |         |      |                                 |      |
|----------|---------|------|---------------------------------|------|
| № докум. | Подпись | Дата | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|          |         |      |                                 | 35   |

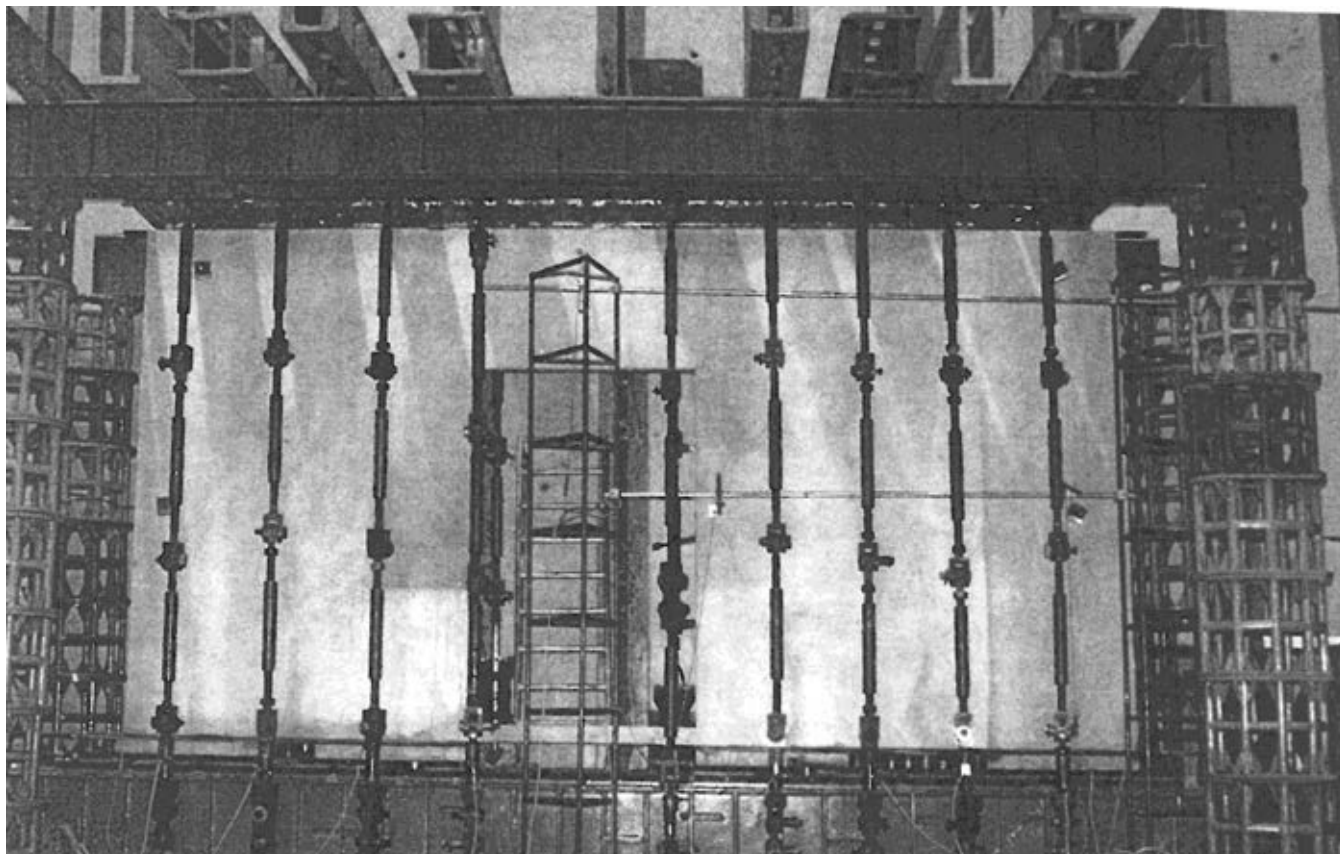


Рис. 2.11. Фото испытаний. Вид спереди.

### **2.3.1. Геометрические характеристики панели 1 НСТ 58.30-1**

$t = 0,2$  м – толщина плиты;

$b = 5,85$  м – ширина панели;

$h = 3,05$  м – высота плиты;

Проём плиты  $1,31 \times 2,1$  м

$a' = 45$  мм =  $0,045$  м – минимальный защитный слой бетона;  $a = 0,05$  м.

Армирование панели состоит из объемных каркасов, состоящих из плоских каркасов и сеток, отдельных стержней. При расчете учитываем основные каркасы и сетки (см. таблицы 2.10, 2.11).

Табл. 2.10. Каркасы и сетки.

| Сетки | Каркасы |
|-------|---------|
| С44   | К44     |
| С47   | К49     |
| С48   |         |

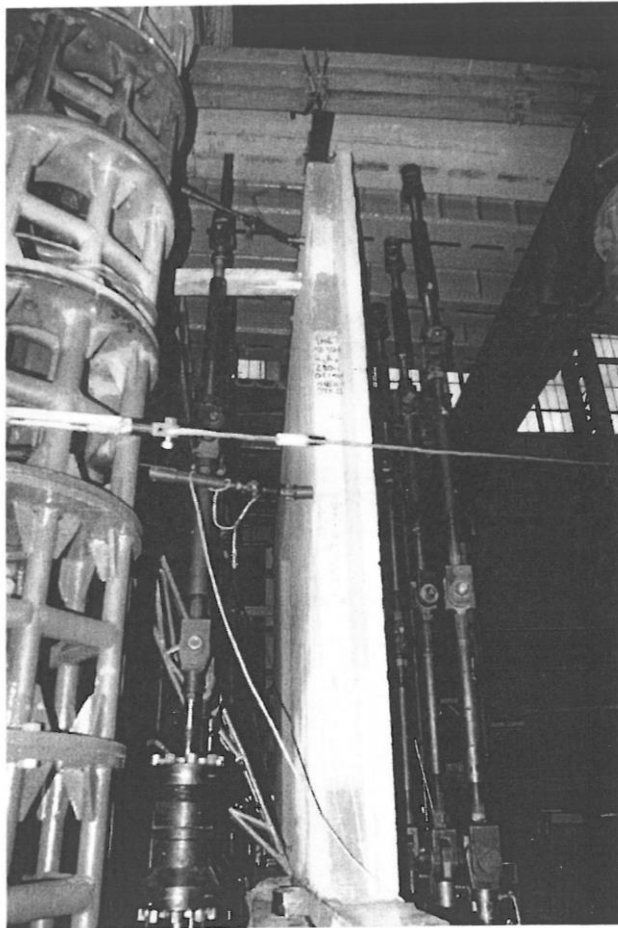


Рисунок 2. Вид испытательной установки панели 1НСТ 58.30-1.

Рис. 2.12. Фото испытаний. Вид сбоку.

Панель НСТ 58.30-1

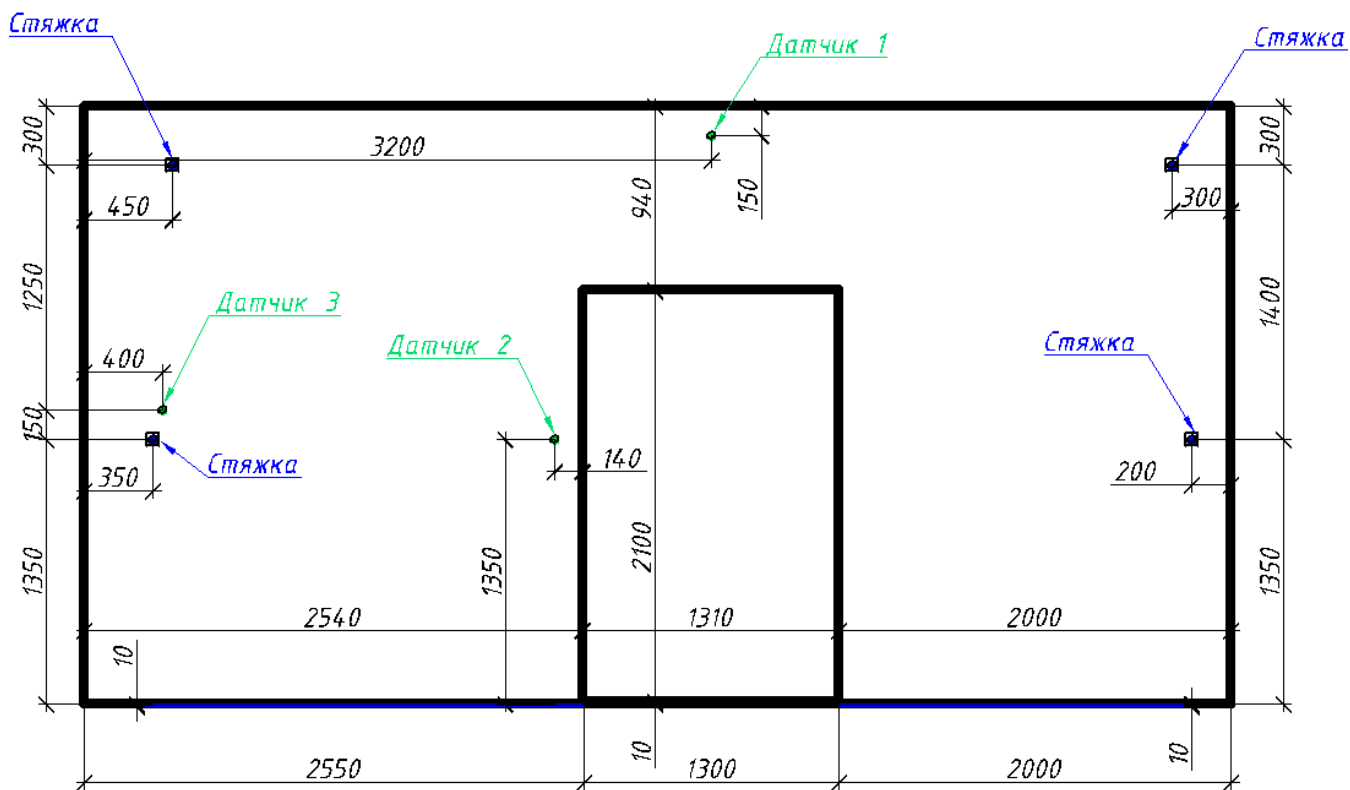


Рис. 2.13. Геометрические характеристики панели 1НСТ 58.30-1.

|          |         |                                 |  |      |  |
|----------|---------|---------------------------------|--|------|--|
|          |         |                                 |  | Лист |  |
|          |         |                                 |  | 37   |  |
|          |         | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР |  |      |  |
| № докум. | Подпись | Дата                            |  |      |  |

Табл. 2.11. Армирование панели 1 НСТ 58.30-1.

| Участок панели | Слои           | Состав сетки/каркаса на 1 п.м. | Привязка, z, см | S, см <sup>2</sup> | Толщина пласта, см |
|----------------|----------------|--------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| I<br>(верх)    | K44            | Y: 8Ø8 (A-III)                 | 4,02            | 4,5                | 0,0402             |
|                |                | X: 3Ø5 (Bp-I)                  | 0,59            |                    | 0,0059             |
|                | K49            | Y: 6Ø8 (A-III)                 | 3,02            | 5,5                | 0,0302             |
|                |                | X: 4Ø5 (Bp-I)                  | 0,79            |                    | 0,0079             |
|                | C44            | Y: 6Ø8 (A-III)                 | 3,02            | 5                  | 0,0302             |
| X: 6Ø5 (Bp-I)  | 1,18           | 0,0118                         |                 |                    |                    |
| II<br>(бок)    | K44            | Y: 8Ø8 (A-III)                 | 4,02            | 4,5                | 0,0402             |
|                |                | X: 3Ø5 (Bp-I)                  | 0,59            |                    | 0,0059             |
|                | C47            | Y: 6Ø8 (A-III)                 | 3,02            | 5                  | 0,0302             |
| X: 6Ø5 (Bp-I)  | 1,18           | 0,0118                         |                 |                    |                    |
| III<br>(бок)   | K44            | Y: 8Ø8 (A-III)                 | 4,02            | 4,5                | 0,0402             |
|                |                | X: 3Ø5 (Bp-I)                  | 0,59            |                    | 0,0059             |
|                | C48            | Y: 6Ø8 (A-III)                 | 3,02            | 5                  | 0,0302             |
| X: 6Ø5 (Bp-I)  | 1,18           | 0,0118                         |                 |                    |                    |
| K44            | Y: 8Ø8 (A-III) | 4,02                           | -4,5            | 0,0402             |                    |
|                | X: 3Ø5 (Bp-I)  | 0,59                           |                 | 0,0059             |                    |

Координаты датчиков для замеров перемещений, установленных на панели при натурных испытаниях приведены в таблице 2.12. Координаты стяжек, удерживающих плиту от горизонтальных перемещений при натурных испытаниях, представлены в таблице 2.13. Координаты точек проема панели приведены в таблице 2.14 (для удобства моделирования). За начало координат (0,0,0) принят левый нижний угол панели.

Табл. 2.12. Координаты датчиков для замеров перемещений

| № точки замера | Координата по «X» | Координата по «Z» |
|----------------|-------------------|-------------------|
| 1              | 3.2               | 2.9               |
| 2              | 2.4               | 1.35              |
| 3              | 0.4               | 1.5               |

Табл. 2.13. Координаты стяжек, удерживающих плиту по оси «Y»

| Номер стяжки | Координата по «X» | Координата по «Z» |
|--------------|-------------------|-------------------|
| 1            | 0.45              | 2.75              |
| 2            | 5.55              | 2.75              |
| 3            | 0.35              | 1.35              |
| 4            | 5.65              | 1.35              |

Табл.2.14. Координаты проема панели 1НС 58.30-1

| Номер стяжки | Координата по «X» | Координата по «Z» |
|--------------|-------------------|-------------------|
| 1            | 2.55              | 0.1               |
| 2            | 3.85              | 0.1               |
| 3            | 2.55              | 2.2               |
| 4            | 3.85              | 2.2               |

### 2.3.2. Программа натурных испытаний панели 1 НСТ 58.30-1

Распределённая нагрузка  $q$  заменялась комплексом сосредоточенных сил  $Q$ . Нагружения панели по схеме (рис. 2.11, 2.12) проводились два раза. Нагружение № 1 проводилось этапами до контрольных нагрузок по жесткости и трещиностойкости в соответствии с таблицей 2 (рис. 2.14), в которой приведены заданные и фактические созданные нагрузки, а также значения перемещений. После сброса нагрузки до нуля систему измерений перемещения демонтировали. Нагружение № 2 проводилось этапами в соответствии с таблицей 2 (рис. 2.14), в которой приведены заданные и фактические созданные нагрузки. Нагружение проводилось до 170% от расчетной нагрузки по прочности.

### 2.3.3. Результаты испытаний панели 1 НСТ 58.30-1

В процессе нагружения наблюдалось раскрытие усадочных трещин. Несущую способность панель при максимальных нагрузках не потеряла, запас прочности по силе  $Q$  по отношению к расчетной нагрузке превышает 1,7.

| № этапа   | Проверка жесткости |      |       |       |       |      |   | Проверка прочности |       |       |              |       |       |              |       |
|---|--------------------|------|-------|-------|-------|------|---|--------------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|
|   | 1                  | 2    | 3     | 4     | 5     | 6    |   | 1                  | 2     | 3     | 4            | 5     | 6     | 7            | 8     |
| %   | 20                 | 40   | 60    | 80    | 100   | Ост. | Демонтаж датчиков перемещения и датчиков силы (P1, P2). | 100                | 110   | 120   | 130<br>C=1,3 | 140   | 150   | 160<br>C=1,6 | 170   |
| Q <sub>доп</sub> , тс/м заданная                | 16,8               | 33,6 | 50,5  | 67,3  | 84,1  | -    |   | 96,8               | 106,5 | 116,2 | 125,8        | 135,5 | 145,2 | 154,9        | 164,6 |
| Q1, тс заданная                                 | 38,5               | 77,0 | 115,6 | 154,1 | 192,6 | -    |   | 221,7              | 243,8 | 266,0 | 288,2        | 310,3 | 332,5 | 354,7        | 376,8 |
| Q2, тс заданная                                 | 45,2               | 90,5 | 135,7 | 181,0 | 226,2 | -    |   | 260,4              | 286,4 | 312,5 | 338,5        | 364,5 | 390,6 | 416,6        | 442,7 |
| Q1, тс при испытаниях                           | 38,8               | 77,0 | 115,0 | 154,3 | 192,6 | 3,7  |   | 221,7              | 243,7 | 265,9 | 288,3        | 310,2 | 332,6 | 354,8        | 371,5 |
| Q2, тс при испытаниях                           | 45,2               | 90,3 | 135,8 | 181,1 | 225,8 | 5,2  |   | 259,5              | 286,4 | 312,2 | 338,5        | 364,1 | 390,9 | 416,5        | 442,0 |
| Q1, тс с учетом веса оснастки                   | 43,6               | 81,8 | 119,8 | 159,1 | 197,4 | 8,5  |   | 226,5              | 248,5 | 270,7 | 293,1        | 315,0 | 337,4 | 359,6        | 376,3 |
| Q2, тс с учетом веса оснастки                   | 50,7               | 95,8 | 141,3 | 186,6 | 231,3 | 10,7 |   | 265,0              | 291,9 | 317,7 | 344,0        | 369,6 | 396,4 | 422,0        | 447,5 |
| Q <sub>доп</sub> , тс/м, с учетом веса оснастки | 19                 | 36   | 53    | 69    | 86    | -    |   | 99                 | 109   | 118   | 128          | 138   | 147   | 157          | 164   |
| Δ1, мм  | -1,0               | -1,8 | -2,6  | -3,5  | -4,3  | -1,0 |   |                    |       |       |              |       |       |              |       |
| Δ2, мм  | 0,1                | 0,5  | 0,9   | 1,3   | 1,7   | 0,0  |   |                    |       |       |              |       |       |              |       |
| Δ3, мм  | 0,2                | 0,5  | 0,8   | 1,2   | 1,5   | 0,1  |   |                    |       |       |              |       |       |              |       |
| P1, тс  | 0,1                | 0,3  | 0,6   | 1,0   | 1,3   | 0,0  |   |                    |       |       |              |       |       |              |       |
| P2, тс  | 0,3                | 0,6  | 0,8   | 1,1   | 1,4   | -0,1 |   |                    |       |       |              |       |       |              |       |
| Время выдержки, мин.                            | 5                  | 5    | 5     | 5     | 10    | -    |   |                    |       |       |              |       |       |              |       |
|   |                    |      |       |       |       |      |   | 10                 | 5     | 5     | 10           | 5     | 5     | 10           | 5     |

Примечание:

- знак «-» (минус) у датчиков перемещения означает перемещение панели в направлении стрелки датчика, знак «+» (плюс) - против стрелки датчика.

Результаты нагружения панели 1 НСТ 58.30-1.

Рис. 2.14. Результаты испытаний панели 1 НСТ 58.30-1.

|  |  |          |         |      |  |  |  |  |  |  |      |
|--|--|----------|---------|------|--|--|--|--|--|--|------|
|  |  |          |         |      |  |  |  |  |  |  | Лист |
|  |  |          |         |      |  |  |  |  |  |  | 40   |
|  |  |          |         |      |  |  |  |  |  |  |      |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |  |  |  |  |  |  |      |

АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР

### 3. Расчет панелей в ПК "Лири-САПР"

При построении расчетной модели основное внимание уделено отражению действительного состояния конструкции, соответствующей ее работе в составе несущей системы здания. Железобетон рассматривается как физически нелинейный, анизотропный, комплексный материал, состоящий из двух совместно работающих сред - бетона и «размазанной» по объему арматуры.

#### 3.1. Построение расчетной конечно-элементной модели панелей

Для моделирования панели принят физически нелинейный универсальный прямоугольный конечный элемент КЭ 241 оболочки. Конечный элемент 241 предназначен для определения напряженно-деформированного состояния тонких пологих оболочек. Оболочка рассматривается как биматериальная система с изотропными физически нелинейными материалами, узел конечного элемента имеет шесть степеней свободы [23]. В качестве КЭ (тип КЭ 241) принята квадратная ячейка размерами 50x50 мм (параметр d), все остальные размеры округлены с точностью до 50 мм.

Параметры арматуры панелей заданы через армирование стержневого типа (физический эквивалент сетки) отдельными слоями со своими привязками, согласно приведенных ранее таблиц, через толщину слоя по направлениям "X" и "Y", что позволяет учесть отдельно рабочее и конструктивное армирование.

#### 3.1.1. Жесткостные характеристики панелей

##### Бетон

Класс бетона по прочности на сжатие – В25;

Марка по морозостойкости - F150;

Марка по водонепроницаемости - W4.

Условия работы:  $\varphi_{int} \leq 60$ ,  $t < -40^\circ\text{C}$ .

$R_{b,n} = R_b = 18,5 \text{ МПа} = 1886,4 \text{ т/м}^2$ ,  $R_{bt,n} = R_{bt} = 1,55 \text{ МПа} = 158 \text{ т/м}^2$  [Табл. 6.7, 21].

$E_b = 30000 \text{ МПа} = 3060000 \text{ т/м}^2$  [Табл. 6.11, 21].

|  |  |          |         |      |  |  |  |  |  |      |
|--|--|----------|---------|------|--|--|--|--|--|------|
|  |  |          |         |      |  |  |  |  |  | Лист |
|  |  |          |         |      |  |  |  |  |  | 41   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |  |  |  |  |  |      |



## Арматура

Сетки А400 (А-III), стержни Вр500 (Вр-I).

$$E_s = 2,0 \cdot 10^5 \text{ МПа [п. 6.2.12, 21].}$$

При моделировании панелей в программном комплексе можно задать всего 1 тип арматуры через значение модуля упругости, принимаем АIII-А400 (А350).

$$R_s (A400) = \sigma_s = 400 \text{ МПа [Табл. 6.13, 21].}$$

### **3.1.2. Моделирование условий опирания, тяжей**

Панель опирается на опоры через раствор, жесткость которого учтена с помощью одноузловых элементов связи конечной жесткости КЭ 56, которые применяются для учета конечной жесткости (податливости) опорных связей по 6-и направлениям одновременно [15]. Одноузловой конечный элемент 56 упругих связей относительно глобальных осей координат. В программе нужно указать параметры жесткости КЭ:  $R_x, R_y, R_z$  - погонные жесткости связи на растяжение-сжатие вдоль глобальных осей  $X, Y, Z$ ;  $R_{ux}, R_{uy}, R_{uz}$  - погонные жесткости связи на поворот вокруг глобальных осей  $X, Y, Z$  [23].

Погонные жесткости связи на растяжение-сжатие задаем одинаковыми вдоль всех глобальных осей и определяем через податливости, которые определяем по приложению 4 «Рекомендации по определению податливости соединений элементов несущих конструкций» в Пособии по проектированию жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85), Выпуск 3 «Конструкции жилых зданий» [14]. Моделируем податливость растворного шва как контактного стыка стеновых панелей.

Коэффициент податливости при сжатии  $\lambda_c$  соединения элементов определяют в зависимости от конструктивного типа стыка.

Для контактного горизонтального стыка, в котором сжимающую нагрузку передают через слой раствора, толщиной не более 30 мм, коэффициент податливости при сжатии  $\lambda_{c,con}$  определяют по формуле [ф.4, прил. 4, 14]:

$$\lambda_{c,con} = (\lambda_m + h_{con} / E_{b,w}) A / A_{con}, \quad (2)$$

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 42   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

где  $\lambda_m$  - коэффициент податливости горизонтального растворного шва при сжатии, определяемый по п.4 настоящего приложения;

Принимаем для горизонтального шва коэффициент податливости растворного шва  $\lambda_m = 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н}$  для тяжелого бетона [п.4, приложение 4, 14].

$h_{con}$  - высота контактного участка стыка;

$h_{con} = 10 \text{ мм}$ , толщина раствора;

$E_{b,w}$  - модуль деформации бетона стены;

$E_{b,w} = 30 \cdot 10^3 \text{ МПа} = 30 \cdot 10^3 \text{ Н/мм}^2$ ;

$A$  - площадь горизонтального сечения стены в уровне расположения проемов;

$A_{con}$  - площадь контактного участка стыка, через которую передают сжимающую нагрузку [14].

Отношение  $\frac{A}{A_{con}} = 1$ , т.к. моделируем контактный стык, в этом случае вся

нагрузка передается через раствор.

Получаем  $\lambda_{c,con} = (0,01 + 10 / 3 \cdot 10^4) \cdot 1 = 0,01033 \text{ мм}^3/\text{Н} = 1,033 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{Н} = 1,01337 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{т}$ .

Находим жесткость на растяжение-сжатие, как величину, обратную податливости, умножая полученное значение на площадь ячейки согласно расчетной схеме. Т.к. размеры каждого КЭ панели равны 50 мм, определяем коэффициенты жесткости на растяжение-сжатие для нашего конкретного случая.

$$C_c = \frac{1}{\lambda_{c,con}} (d \cdot t), \quad (3)$$

$$C_c = \frac{1}{1,01337 \cdot 10^{-7}} (0,05 \cdot 0,2) = 98680,6 \text{ т/м} - \text{средние узлы};$$

$$C_c = \frac{1}{1,01337 \cdot 10^{-7}} (0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,5) = 49340,3 \text{ т/м} - \text{крайние узлы}.$$

Податливость на сдвиг принимаем по п.6, как для платформенного стыка. Опертые по контуру панели перекрытий при платформенном стыке стеновых панелей могут рассматриваться как связи сдвига между стенами перпендикулярного направления.

|  |  |          |         |      |  |  |  |  |      |
|--|--|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
|  |  |          |         |      |  |  |  |  | Лист |
|  |  |          |         |      |  |  |  |  | 43   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |  |  |  |  |      |

АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР

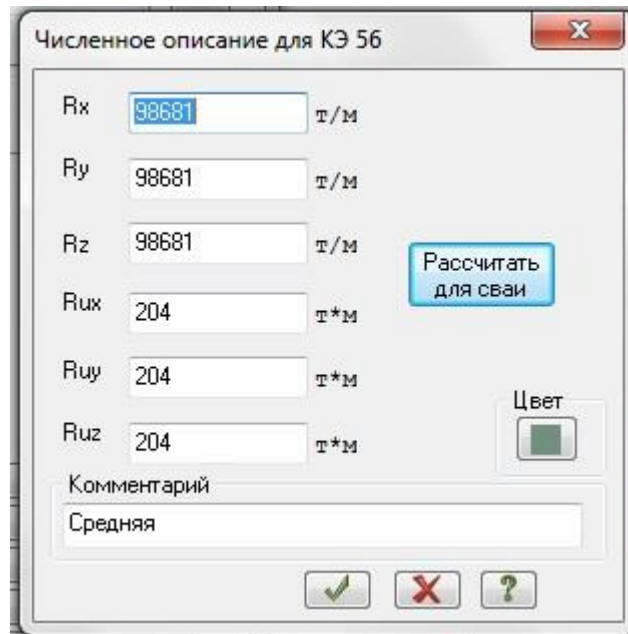


Рис. 3.1. Жесткости растворного шва для средних точек (условно "шов").

Для такой связи при марке раствора в швах не ниже 100 и деформациях сдвига не более 0,5 мм коэффициент податливости при сдвиге  $\lambda_{\tau, pl} = 5 \cdot 10^{-6}$  мм/Н ( $5 \cdot 10^{-6}$  см/кгс) [п.6, прил.4, 14].

$\lambda_{\tau, pl} = 5 \cdot 10^{-6}$  мм/Н =  $5 \cdot 10^{-9}$  м/Н =  $4,9 \cdot 10^{-5}$  м/т. Находим жесткость на сдвиг, как величину, обратную податливости, умножая полученное значение на площадь ячейки согласно расчетной схеме.

Т.к. размеры каждого КЭ равны 50 мм, определяем коэффициенты жесткости при сдвиге для нашего конкретного случая:

$$C_{\tau} = \frac{1}{\lambda_{\tau, pl}} (d \cdot t), \quad (4)$$

$$C_{\tau} = \frac{1}{4,9 \cdot 10^{-5}} (0,05 \cdot 0,2) = 204 \text{ т} \cdot \text{м} - \text{средние узлы};$$

$$C_{\tau} = \frac{1}{4,9 \cdot 10^{-5}} (0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,5) = 102 \text{ т} \cdot \text{м} - \text{крайние узлы}.$$

Полученные значения для моделирования жесткости растворного шва для средних и крайних точек показаны на рисунках 3.1, 3.2.

Рис. 3.2. Жесткости растворного шва крайних точек (условно "шов").

В реальном здании стеновые панели по краям со всех сторон удерживаются посредством растворных швов (стыков). В натурных испытаниях присутствует только одна панель, опирание ее вертикально по оси "Z" на раствор реализовано. Однако от горизонтальных перемещений по осям "X" и "Y" плиту "держит" только трение о раствор (бетон-бетон). Поэтому можно заменить численное описание для 56 КЭ для характеристик Rx, Ry. Вычислим эти значения через силу трения.

Расчет силы (Fтр) выполняется по формуле:

$$F_{тр} = k \cdot N, \quad (5)$$

где k - коэффициент трения, принимаем 0,6 [прил. 14, 25];

N - сила реакции опоры, включающая в себя вертикальную нагрузку и вес. Воспользуемся функцией "Суммирование нагрузок" для определения силы трения, вычисляем силу реакции опоры для максимальной нагрузки (рис. 3.3).

Для плиты 1 НС 48.30-1 получаем:

$$F_{тр} = 0.6 \cdot 365 = 219 \text{ т, принимаем жесткость растворного шва } 219 \text{ т/м.}$$

Для плиты 1 НСТ 58.30-1 получаем:

$$F_{тр} = 0.6 \cdot 468 = 280.8 \text{ т, принимаем жесткость растворного шва } 281 \text{ т/м.}$$

Для плиты 1 НСТ 58.30 получаем:

$$F_{тр} = 0.6 \cdot 393 = 235.8 \text{ т, принимаем жесткость растворного шва } 236 \text{ т/м.}$$

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 45   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

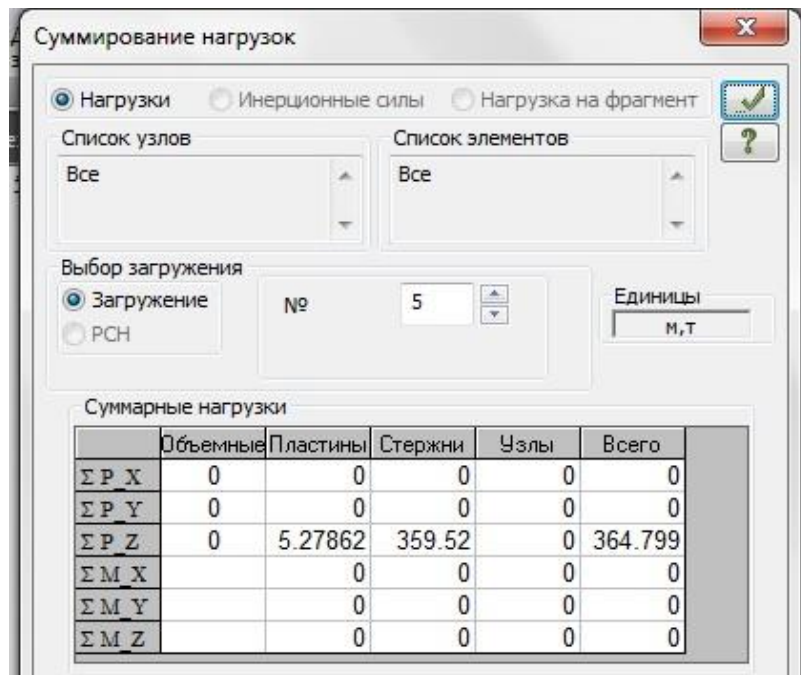


Рис. 3.3. Функция "Суммирование нагрузок".

Кроме того, можно предположить, что трение почти не удерживает плиту от поворота по оси X, поэтому задаем в характеристиках нулевое значение ( $R_{ux}=0$ ). Полученное численное описание показано на рисунке 3.4.

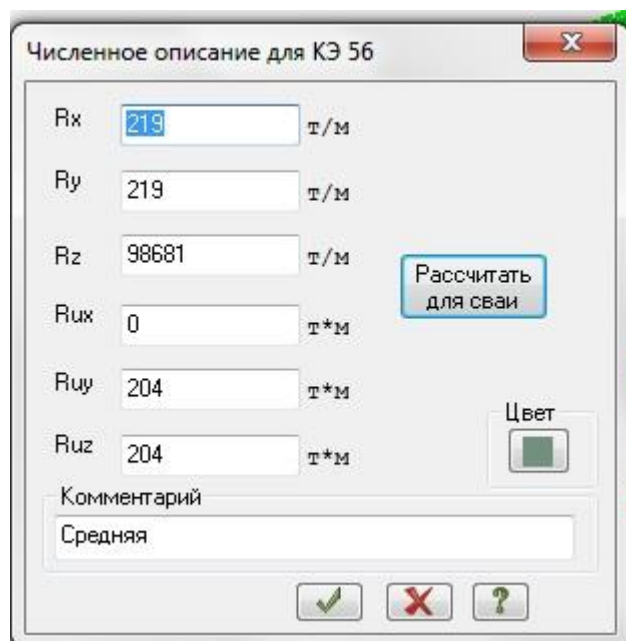


Рис. 3.4. Жесткости растворного шва (условное "трение").

Таким образом, опирание плиты на опоры рассмотрим, используя 2 варианта моделирования (условно "шов" и "трение").

В расчетной модели, как и в натуральных испытаниях, учтен эксцентриситет опирания плиты на растворный шов, для более подробных исследований он реализован с помощью жестких стержней и стержней с конечной жесткостью ( $10^9$  или  $10^{20}$  т/м<sup>2</sup>) см. рис. 3.5.

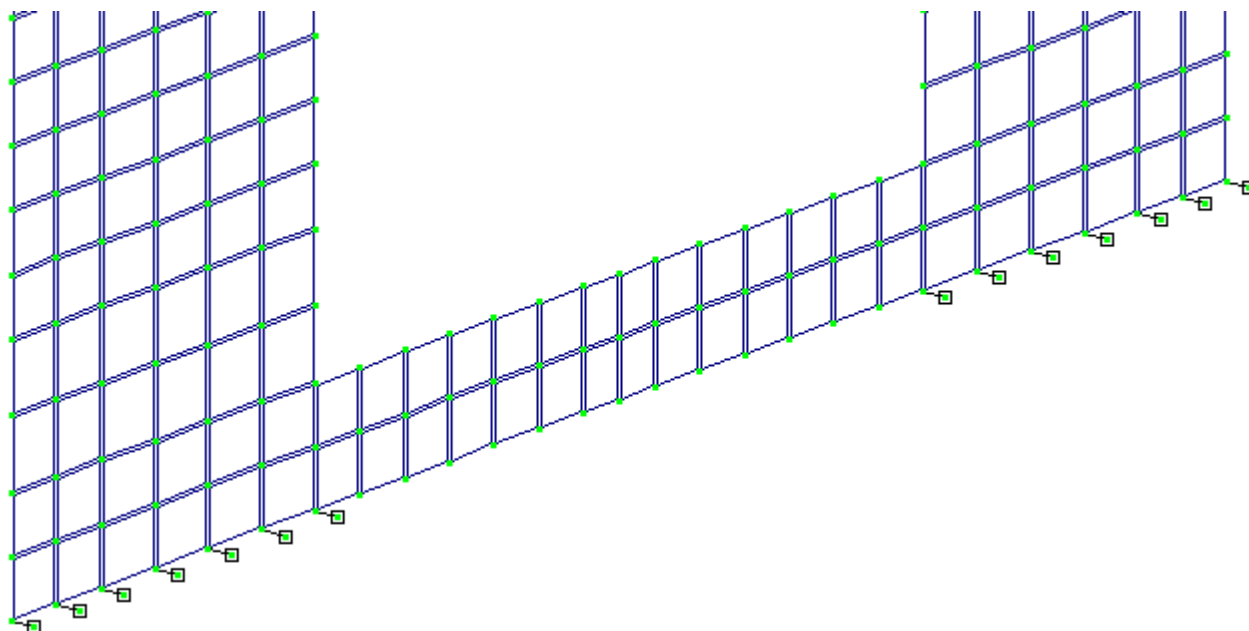


Рис. 3.5. Моделирование эксцентриситета опирания панели на растворный шов.

В качестве закреплений панели по оси «У» используются 4 стяжки, которые моделируем с помощью 251 конечного элемента - одноузловой КЭ односторонней связи с учетом предельного усилия. Нелинейный конечный элемент 251 предназначен для моделирования односторонней линейной связи, воспринимающей либо растяжение, либо сжатие. Связь может быть ориентирована вдоль одной из глобальных осей координат или локальных осей координат узла [3, 23].

Жесткость стяжек определяем через закон Гука по формуле:

$$k = \frac{EA}{L}, \quad (6)$$

где  $k$  - коэффициент упругости (в ПК «Ли́ра-САПР» 'R');

$E$  - модуль упругости;

$E = 2 \cdot 10^5$  МПа = 20394000 т/м<sup>2</sup>;

$R_y = 210$  МПа = 21414 т/м<sup>2</sup> =  $\sigma$ ;

$N=5$  т (характеристика тяжа из отчета по испытаниям);

$A$  - площадь поперечного сечения,

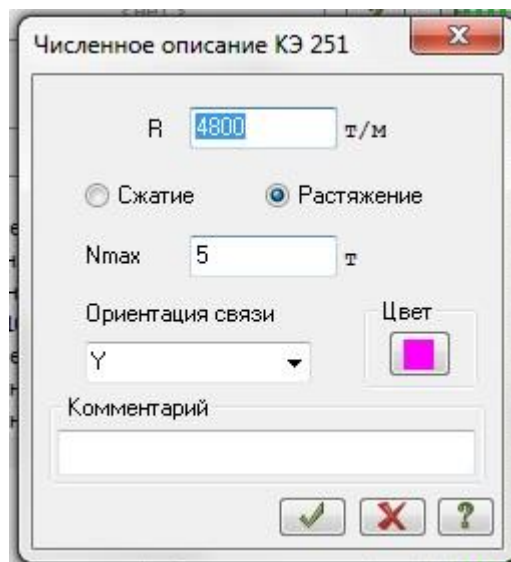
По формуле для определения напряжения при сжатии ( $\sigma$ ) имеем

$$\sigma = \frac{N}{A}, \quad (7)$$

отсюда  $A = \frac{N}{\sigma} = \frac{5}{21414} = 2,335 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;

$L$  - длина,  $L=1$  м

$$k = \frac{20394000 \cdot 2.335 \cdot 10^{-4}}{1} = 4762 \text{ т/м, принимаем } 4800 \text{ т/м (рис. 3.6).}$$



Численное описание КЭ 251

R 4800 т/м

Сжатие  Растяжение

Nmax 5 т

Ориентация связи Y

Цвет

Комментарий

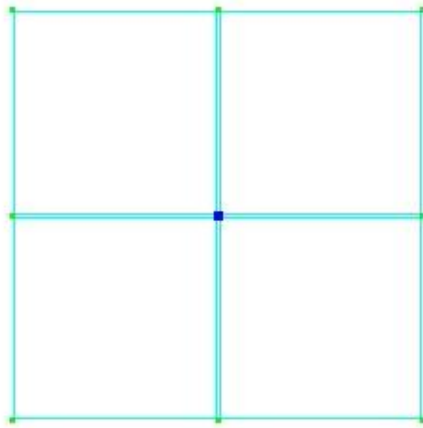
OK Cancel Help

Рис. 3.6. Жесткость стяжки.

Рассмотрим несколько вариантов моделей тяжей:

1. Одна точка с жесткостью  $R=4800$  т/м (рис. 3.7);
2. Девять точек с жесткостью  $R=540$  т/м, сторона "квадрата", моделирующего распределение нагрузки от тяжа, составляет 5 см (рис. 3.8);
3. Отверстие - квадрат со стороной 2,5 см, крайние точки по периметру закреплены с жесткостью  $R=600$  т/м (рис. 3.9).

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 48   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |



Численное описание КЭ 251

R  т/м

Сжатие  Растяжение

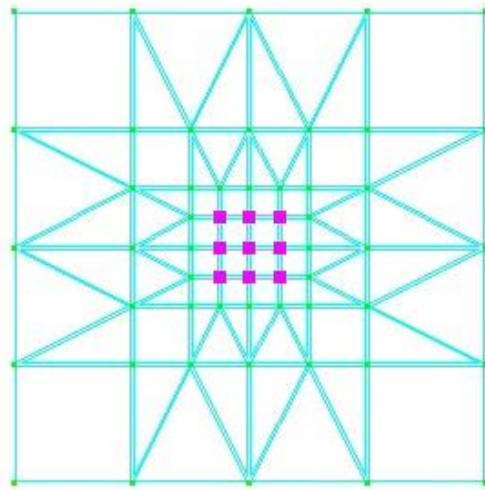
Nmax  т

Ориентация связи  
Y

Цвет

Комментарий

Рис. 3.7. Модель "прикрепления" стяжки к плите - 1 точка.



Численное описание КЭ 251

R  т/м

Сжатие  Растяжение

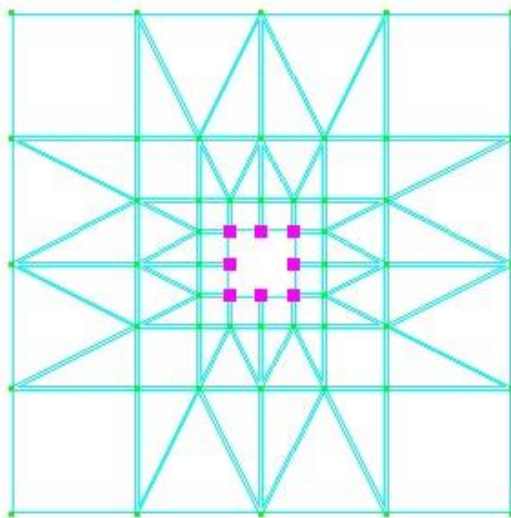
Nmax  т

Ориентация связи  
Y

Цвет

Комментарий

Рис. 3.8. Модель "прикрепления" стяжки к плите - 9 точек.



Численное описание КЭ 251

R  т/м

Сжатие  Растяжение

Nmax  т

Ориентация связи  
Y

Цвет

Комментарий

Рис. 3.9. Модель "прикрепления" стяжки к плите - отверстие.

|          |         |      |  |
|----------|---------|------|--|
|          |         |      |  |
| № докум. | Подпись | Дата |  |



### 3.1.3. Свойства материалов

Для моделирования основного и армирующего материалов панелей будем использовать 2 варианта.

При первом варианте основной материал (бетон) задан при помощи нелинейного закона №25 (Рис. 3.10), армирующий материал задан нелинейным законом №11 (Рис. 3.11).

Закон 25 - экспоненциальная зависимость для железобетона с нормативной прочностью. Закон использует параметры: класс бетона; тип бетона; модуль упругости; предельное значение напряжения на сжатие (отрицательное значение); предельное значение напряжения на растяжение; маркировка бетонов (в нашем случае ТА – бетон тяжелый естественного твердения).

Закон 11 - экспоненциальная зависимость

Параметры закона нелинейного деформирования:

- начальное значение модуля Юнга на сжатие;
- начальное значение модуля Юнга на растяжение;
- предельное значение напряжения на сжатие (отрицательное значение);
- предельное значение напряжения на растяжение;
- коэффициент запаса по обобщенному напряжению  $K$ . [3, 8, 23].

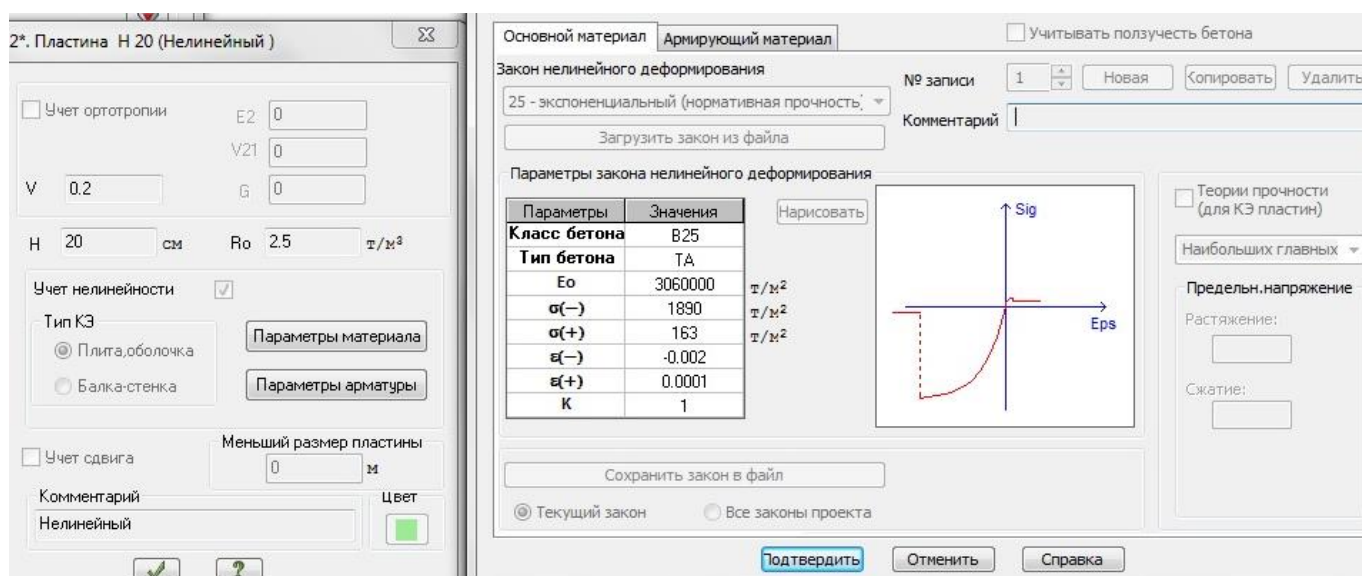


Рис. 3.10. Параметры основного материала. 25 закон.







при непродолжительном действии нагрузки -  $\varepsilon_{bt2} = 0,00015$ . [п. 6.1.22, 21].

Значение предельных относительных деформаций тяжелого бетона при непродолжительном действии нагрузки при осевом растяжении принимаем равными  $\varepsilon_{bt0} = 0,0001$  [п. 6.1.14, 21].

Расчетное значение сопротивления бетона осевому растяжению  $R_{bt}$  определяем по формуле [ф. 6.2 п.6.1.11, 6.1.20, 21]:

$$R_{bt} = \frac{R_{bt,n}}{\gamma_{bt}}, \quad (11)$$

где  $R_{bt}$  - нормативное значение сопротивления бетона осевому сжатию,  $R_{bt,n} = 1,55$  МПа [табл. 6.7, 21];

$\gamma_{bt}$  - коэффициент надежности по бетону при растяжении, значение коэффициента надежности по бетону при растяжении принимают равным 1 для расчета по предельным состояниям второй группы.

$$R_{bt,n} = R_{bt} = 1,55 \text{ МПа} = 158 \text{ т/м}^2 = \sigma_{bt0} = \sigma_{bt2};$$

По формуле (8) определяем значение напряжения  $\sigma_{bt1}$ :

$$\sigma_{bt1} = 0,6 \cdot 158 = 94,8 \text{ т/м}^2;$$

По формуле (10):  $\varepsilon_{bt1} = \frac{94,8}{3060000} = 0,0000309$ .

Полученные значения сводим в таблицу 3.14. Полученная кусочно-линейная диаграмма бетона по 14 закону показана на рис. 3.14.

Табл. 3.1.14 закон нелинейного деформирования бетона.

| Обозначение по рисунку | Относительная деформация $\varepsilon$ | Обозначение по рисунку | Напряжения $\sigma$ , $\text{т/м}^2$ |
|------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|
| $\varepsilon_{b2}$     | -0.0035                                | $\sigma_{b2}$          | -1886.4                              |
| $\varepsilon_{b0}$     | -0.002                                 | $\sigma_{b0}$          | -1886.4                              |
| $\varepsilon_{b1}$     | -0.0003698                             | $\sigma_{b1}$          | -1134.84                             |
|                        | 0                                      |                        | 0                                    |
| $\varepsilon_{bt1}$    | 0.0000309                              | $\sigma_{b1}$          | 94.8                                 |
| $\varepsilon_{bt0}$    | 0.0001                                 | $\sigma_{bt0}$         | 158                                  |
| $\varepsilon_{bt2}$    | 0.00015                                | $\sigma_{bt2}$         | 158                                  |









### 3.2. Проведение численного эксперимента

В данной работе исследованы деформации стеновых панели из плоскости, т.е. по оси «У» согласно расчетной схеме. Согласно схемам испытаний на каждой панели установлены по 3 датчика перемещений, которые зафиксировали перемещения 3-х характерных точек панелей (рис. 3.18, 3.19, 3.20).

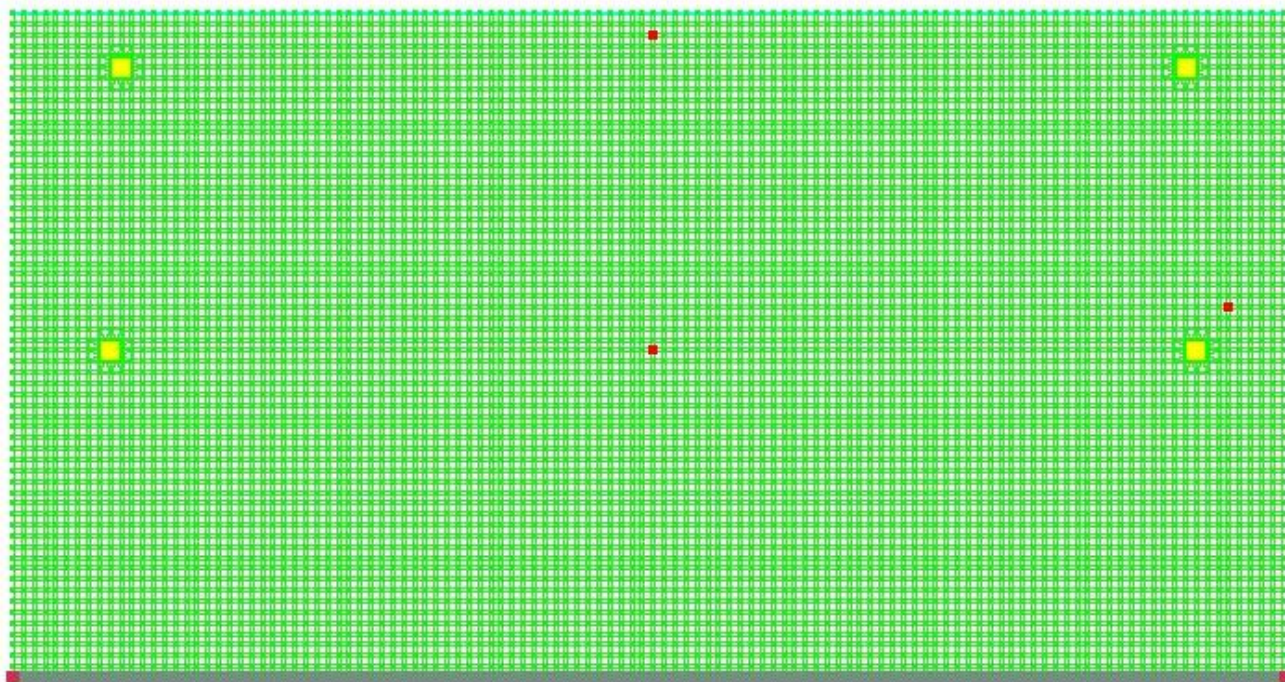


Рис. 3.18. Точки панели 58.30 с датчиками перемещений (показаны красным).

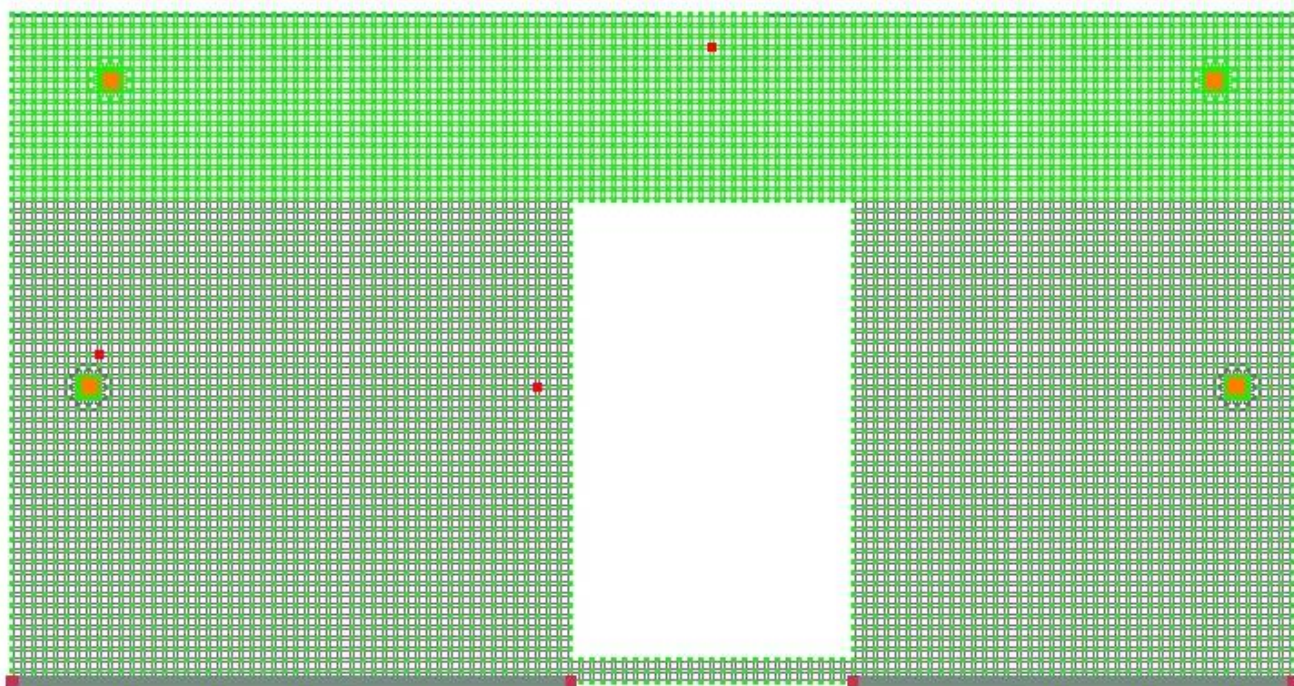


Рис. 3.19. Точки панели 58.30-1 с датчиками перемещений (показаны красным).



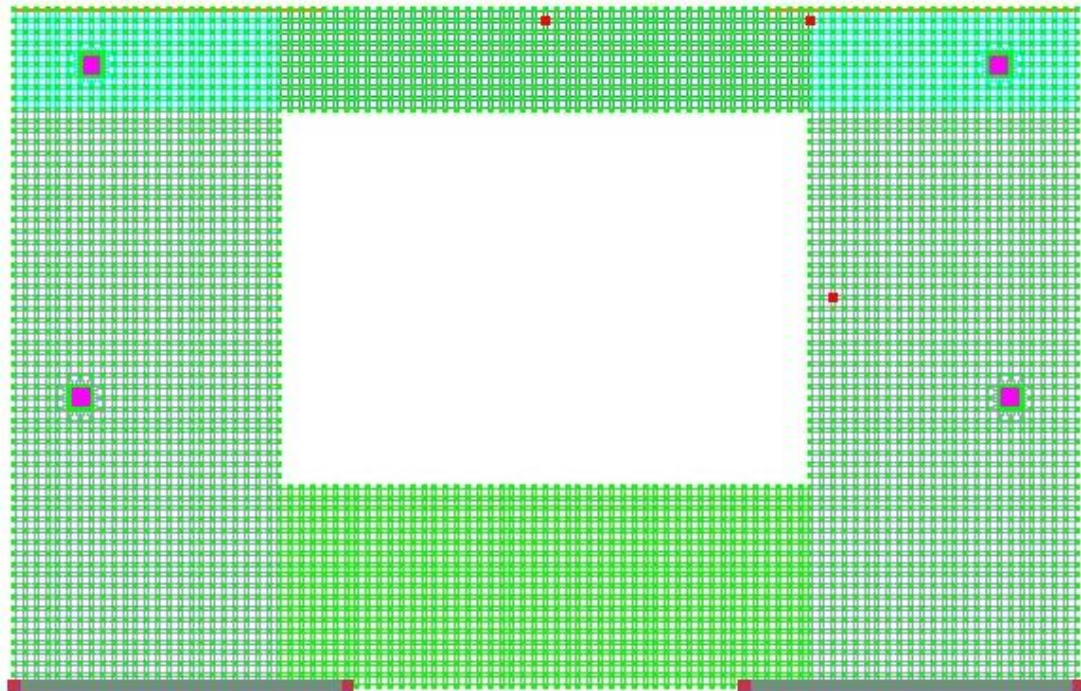


Рис. 3.20. Точки панели 48.30-1 с датчиками перемещений (показаны красным).

### 3.2.1. Первое приближение

Цель расчетов при первом приближении – при максимальной нагрузке 100% по жесткости для каждой плиты определить, при каких вариантах моделирования характер деформирования панелей при численном эксперименте больше всего схож с результатами натурных испытаний, параметры для расчетов указаны в таблице 3.3.

Табл.3.3. Параметры первого приближения

| Плита         | Нагрузка 100% по жесткости, т/м | Деформации $\delta_t$ , мм |         |         |
|---------------|---------------------------------|----------------------------|---------|---------|
|               |                                 | 1 точка                    | 2 точка | 3 точка |
| 1 НС 48.30-1  | 128.4                           | -7,8                       | -8,5    | 5,2     |
| 1 НСТ 58.30   | 65.6                            | -1,9                       | 0,8     | 1,5     |
| 1 НСТ 58.30-1 | 86                              | -4,3                       | 1,7     | 1,5     |

При расчете использован простой шаговый метод нелинейного нагружения, с пошаговым увеличением прикладываемой нагрузки (равномерное нагружение конструкции за 5 шагов, т.к. при реальных испытаниях панель нагружалась нагрузкой по 20% за 5 шагов). Принимаем общие характеристики для всех плит: арматура - стержни по таблицам (см. п. 2.1.1, 2.2.1, 2.3.1) слоями, диаметр тяжа принимаем 2

см, принимаем отверстие под тяж диаметром 2,5 см (если есть), суммарная жесткость точек ( $\sum R$ ) тяжей составляет 4800 т/м, выравнивающий шов растворного шва принимаем равным 1 см (см. п. 3.1.2) при расчетах учитываем собственный вес плит, связи по нижнему краю отсутствуют, принимаем автоматическое разбиение элементов (при создании отверстия).

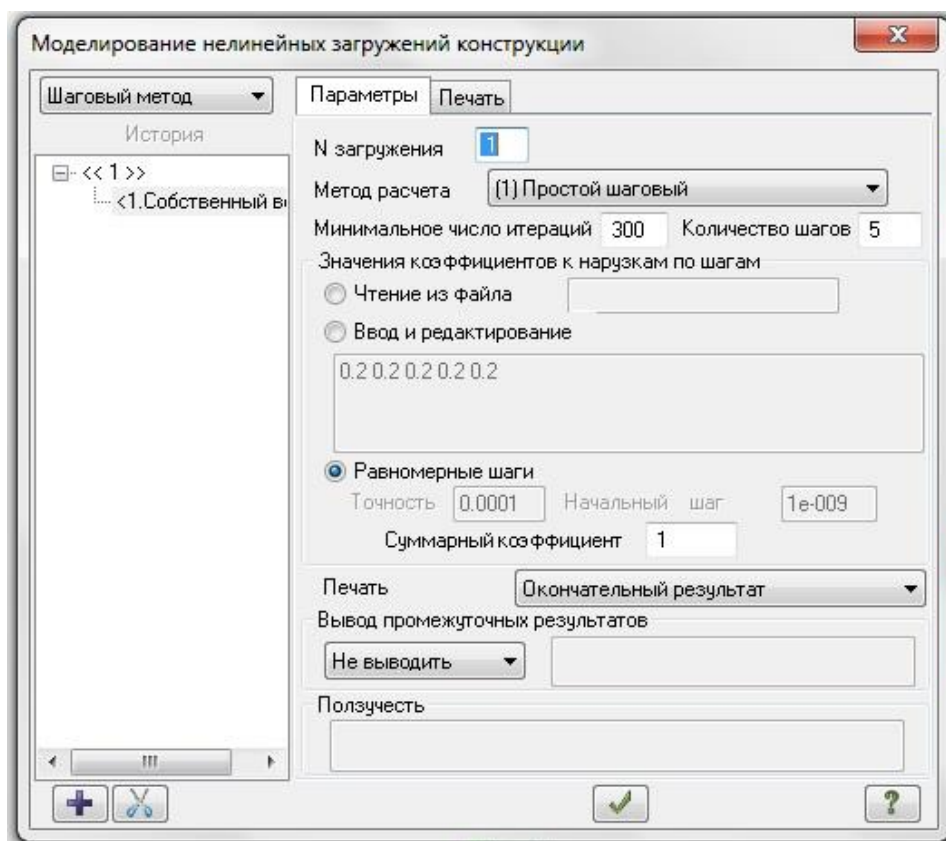


Рис. 3.21. Моделирование нелинейных загрузок при первом приближении.

При расчетах зафиксированы значения прогибов по оси "У" точек, где в натурных испытаниях установлены датчики (при данной нагрузке получены наибольшие деформации панели при проверке жесткости).

Для каждой плиты выполнены 20 вариантов моделирования, которые имеют различные параметры (табл. 3.4, 3.5, 3.6):

1. Нелинейные законы основного и армирующего материалов (25, 11 и 14, 14);
2. Способ опирания панелей (условно "шов" и "трение", см. п. 3.1.3);
3. Способ моделирования стяжек (1 точка, 9 точек, отверстие, см. п. 3.1.2);
4. Способ моделирования эксцентриситетов приложения нагрузки и опирания плит (жесткие вставки или элементы с конечной жесткостью).



Табл. 3.4. Результаты численного эксперимента панели 58.30 (Д приближение)

| № в а | Р. | Параметры материала |            | Закрепление плиты 48.30-1 по низу (параметры КЭ 56) |         |         |         |         |         | Модель стяжек (КЭ 251) | Деформации, мм |           |                                      | Примечания (Шов или трение) (Жесткие вставки или элементы с кон. жест.) |                                       |  |
|-------|----|---------------------|------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|------------------------|----------------|-----------|--------------------------------------|---|---------------------------------------|--|
|       |    | Закон осн.          | Закон арм. | Rx, т/м   | Ry, т/м | Rz, т/м | Rux, тм | Ruy, тм | Ruz, тм |                        | 1              | 2         | 3                                    |   |                                       |  |
| 1     | 25 | 11                  | 11         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204            | 1 точка   | $\delta t = -7.8$<br>X=2.4 м, Z=3 м* | $\delta t = -8.5$<br>X=3.6 м, Z=3 м                                     | $\delta t = 5.2$<br>X=3.7 м, Z=1.75 м | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                     |
| 2     | 25 | 11                  | 11         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204            | 9 точек   | -3.77333<br>(-51.62%)                | -3.06848<br>(-63.90%)   | 1.58884<br>(-69.45%)                  | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                     |
| 3     | 25 | 11                  | 11         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204            | отверстие | -3.77865<br>(-51.56%)                | -3.07307<br>(-63.85%)   | 1.59095<br>(-69.40%)                  | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                     |
| 4     | 25 | 11                  | 11         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204            | отверстие | -6.1478<br>(-21.18%)                 | -5.25303<br>(-38.20%)   | 1.89767<br>(-63.51%)                  | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                     |
| 5     | 25 | 11                  | 11         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204            | отверстие | -5.76893<br>(-26.04%)                | -4.95596<br>(-41.69%)   | 1.94926<br>(-62.51%)                  | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> -верх, низ - 10 <sup>9</sup> |
| 6     | 25 | 11                  | 11         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204            | отверстие | -5.8217<br>(-25.36%)                 | -4.99371<br>(-41.25%)   | 1.94138<br>(-62.67%)                  | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> верх и низ                   |
| 7     | 25 | 11                  | 11         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 0       | 204                    | 204            | 1 точка   | -0.700635<br>(-91.02%)               | -1.34178<br>(-84.21%)   | 4.1617<br>(-19.97%)                   | Трение, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                  |
| 8     | 25 | 11                  | 11         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 0       | 204                    | 204            | 9 точек   | -3.26355<br>(-58.16%)                | -3.6342<br>(-57.24%)  | 5.16908<br>(-0.59%)                   | Трение, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                  |
| 9     | 25 | 11                  | 11         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 0       | 204                    | 204            | отверстие | -2.90987<br>(-62.69%)                | -3.36229<br>(-60.44%)   | 5.22678<br>(0.51%)                    | Трение, верх-жесткие вставки, по низу 10 <sup>9</sup>              |
| 10    | 25 | 11                  | 11         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 0       | 204                    | 204            | отверстие | -2.90987<br>(-62.69%)                | -3.36229<br>(-60.44%)   | 5.22678<br>(0.51%)                    | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>21</sup> верх, низ 10 <sup>9</sup>    |
| 11    | 14 | 14                  | 14         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204            | 1 точка   | -2.928<br>(-62.46%)                  | -3.38496<br>(-60.18%)   | 5.22187<br>(0.42%)                    | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>21</sup> верх и низ                   |
| 12    | 14 | 14                  | 14         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204            | 9 точек   | -3.9914<br>(-48.83%)                 | -3.63948<br>(-57.18%)   | 0.974248<br>(-81.26%)                 | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                     |
| 13    | 14 | 14                  | 14         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204            | отверстие | -1.48735<br>(-80.93%)                | -1.26208<br>(-85.15%)   | 0.750408<br>(-85.57%)                 | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                     |
| 14    | 14 | 14                  | 14         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204            | отверстие | -3.4192<br>(-56.16%)                 | -3.05623<br>(-64.04%)   | 1.16784<br>(-77.54%)                  | Шов, верх-жесткие вставки, по низу 10 <sup>9</sup>                 |
| 15    | 14 | 14                  | 14         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204            | отверстие | -3.34425<br>(-57.13%)                | -2.98066<br>(-64.93%)   | 1.18604<br>(-77.19%)                  | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> верх, низ 10 <sup>9</sup>    |
| 16    | 14 | 14                  | 14         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 0       | 204                    | 204            | 1 точка   | -3.3515<br>(-57.03%)                 | -2.98623<br>(-51.62%)   | 1.18502<br>(-77.21%)                  | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> верх и низ                   |
| 17    | 14 | 14                  | 14         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 0       | 204                    | 204            | 9 точек   | -2.37021<br>(-69.61%)                | -2.44313<br>(-71.26%)   | 2.71766<br>(-47.74%)                  | Трение, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                  |
| 18    | 14 | 14                  | 14         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 0       | 204                    | 204            | отверстие | -0.488907<br>(-93.73%)               | -0.731465<br>(-91.39%)  | 1.64442<br>(-68.38%)                  | Трение, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                  |
| 19    | 14 | 14                  | 14         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 0       | 204                    | 204            | отверстие | -2.39018<br>(-69.36%)                | -2.46123<br>(-71.04%)   | 2.71847<br>(-47.72%)                  | Трение, верх-жесткие вставки, по низу 10 <sup>9</sup>              |
| 20    | 14 | 14                  | 14         | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 0       | 204                    | 204            | отверстие | -2.31441<br>(-70.33%)                | -2.39189<br>(-71.86%)   | 2.73648<br>(-47.38%)                  | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>21</sup> верх, низ 10 <sup>9</sup>    |
|       |    |                     |            | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 0       | 204                    | 204            | отверстие | -2.31495<br>(-70.32%)                | -2.39518<br>(-71.82%)   | 2.73631<br>(-47.38%)                  | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>21</sup> верх и низ                   |



Табл. 3.5. Результаты численного эксперимента панели 58.30 (1 приближение)

| № в. | Параметры материала | Закрепление плиты 58.30 по низу (параметры КЭ 56) |         |         |         |         |         | Модель стяжек (КЭ 251) | Деформации δz, мм   |                    |                     | Примечания (Шов или трение) (Жесткие вставки или элементы с кон. жест.) |
|------|---------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---|
|      |                     | Кх, т/м   | Ky, т/м | Rz, т/м | Rux, тм | Ruy, тм | Ruz, тм |                        | δT=1.9              | δT=0.8             | δT=1.5              |   |
|      |                     |   |         |         |         |         |         |                        |                     |                    |                     |   |
| 1    | 25 II               | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204     | 204     | 1 т. по Y              | -1.34185 (-29.38%)  | 1.01099 (26.37%)   | 0.116365 (-92.24%)  | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                          |
| 2    | 25 II               | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204     | 204     | 9 точек                | -2.55732 (34.60%)   | 0.707282 (-11.59%) | 0.719219 (-52.05%)  | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                          |
| 3    | 25 II               | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204     | 204     | отверстие              | -2.61748 (37.76%)   | 0.701078 (-12.37%) | 0.714079 (-52.39%)  | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                          |
| 4    | 25 II               | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204     | 204     | отверстие              | -1.81674 (-4.38%)   | 0.996036 (24.50%)  | 0.648852 (-56.74%)  | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> -верх, низ - 10 <sup>9</sup>      |
| 5    | 25 II               | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204     | 204     | отверстие              | -1.81713 (-4.36%)   | 0.995758 (24.47%)  | 0.648673 (-56.76%)  | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> верх и низ                        |
| 6    | 25 II               | 236   | 236     | 98681   | 0       | 204     | 204     | 1 точка                | -1.65274 (-13.01%)  | 3.32052 (315.07%)  | 1.38492 (-7.67%)    | Трение, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                       |
| 7    | 25 II               | 236   | 236     | 98681   | 0       | 204     | 204     | 9 точек                | -1.61654 (-14.92%)  | 3.31216 (314.02%)  | 1.36765 (-8.82%)    | Трение, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                       |
| 8    | 25 II               | 236   | 236     | 98681   | 0       | 204     | 204     | отверстие              | -1.7367 (-8.59%)    | 3.33614 (317.02%)  | 1.47682 (-1.55%)    | Трение, верх-жесткие вставки, по низу 10 <sup>9</sup>                   |
| 9    | 25 II               | 236   | 236     | 98681   | 0       | 204     | 204     | отверстие              | -1.63353 (-14.02%)  | 3.19653 (299.57%)  | 1.44009 (-3.99%)    | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>21</sup> верх, низ 10 <sup>9</sup>         |
| 10   | 25 II               | 236   | 236     | 98681   | 0       | 204     | 204     | отверстие              | -1.63391 (-14.00%)  | 3.19665 (299.58%)  | 1.44027 (-3.98%)    | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>21</sup> верх и низ                        |
| 11   | 14                  | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204     | 204     | 1 т. по Y              | -0.583108 (-69.31%) | 0.501537 (-37.31%) | 0.0357659 (-97.62%) | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                          |
| 12   | 14                  | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204     | 204     | 9 точек                | -1.58164 (-16.76%)  | 0.309015 (-61.37%) | 0.415767 (-72.28%)  | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                          |
| 13   | 14                  | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204     | 204     | отверстие              | -1.59796 (-15.90%)  | 0.304857 (-61.89%) | 0.413406 (-72.44%)  | Шов, верх-жесткие вставки, по низу 10 <sup>9</sup>                      |
| 14   | 14                  | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204     | 204     | отверстие              | -1.16193 (-38.85%)  | 0.482783 (-39.65%) | 0.364968 (-75.67%)  | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> верх, низ 10 <sup>9</sup>         |
| 15   | 14                  | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204     | 204     | отверстие              | -1.16196 (-38.84%)  | 0.482662 (-39.67%) | 0.364871 (-75.68%)  | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> верх и низ                        |
| 16   | 14                  | 236   | 236     | 98681   | 0       | 204     | 204     | 1 точка                | -0.891618 (-53.07%) | 1.18706 (48.38%)   | 0.862627 (-42.49%)  | Трение, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                       |
| 17   | 14                  | 236   | 236     | 98681   | 0       | 204     | 204     | 9 точек                | -0.88294 (-53.53%)  | 1.18705 (48.38%)   | 0.858614 (-42.76%)  | Трение, верх-жесткие вставки, низ 10 <sup>9</sup>                       |
| 18   | 14                  | 236   | 236     | 98681   | 0       | 204     | 204     | отверстие              | -0.920147 (-51.57%) | 1.19358 (49.20%)   | 0.895039 (-40.33%)  | Трение, верх-жесткие вставки, по низу 10 <sup>9</sup>                   |
| 19   | 14                  | 236   | 236     | 98681   | 0       | 204     | 204     | отверстие              | -0.832347 (-56.19%) | 1.20352 (50.44%)   | 0.862412 (-42.51%)  | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>21</sup> верх, низ 10 <sup>9</sup>         |
| 20   | 14                  | 236   | 236     | 98681   | 0       | 204     | 204     | отверстие              | -0.832368 (-56.19%) | 1.2035 (50.44%)    | 0.862413 (-42.51%)  | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>21</sup> верх и низ                        |



Табл. 3.6. Результаты численного эксперимента панели 58.30-1 (1 приближение)

| №  | Параметры материала | Закрепление плиты 58.30-1 по низу (параметры КЭ 56) |         |         |         |         |         | Модель стяжек (КЭ 251) | Деформации δz, мм |     |     | Примечания (Шов или трение) (Жесткие вставки или элементы с кон. жест.) |   |
|----|---------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|------------------------|-------------------|-----|-----|---|---|
|    |                     | Ry, т/м   |         | Rz, т/м |         | Rux, тм | Ruy, тм |                        | Ruz, тм           | 1   | 2   |   | 3   |
|    |                     | Rx, т/м   | Ry, т/м | Rz, т/м | Rux, тм | Ruy, тм | Ruz, тм |                        |                   |     |     |   |   |
| 1  | 25                  | 11  | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204               | 204 | 204 | 1 точка   | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10°                    |
| 2  | 25                  | 11  | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204               | 204 | 204 | 9 точек   | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10°                    |
| 3  | 25                  | 11  | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204               | 204 | 204 | отверстие   | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10°                    |
| 4  | 25                  | 11  | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204               | 204 | 204 | отверстие   | Шов, жест. элементы: 10 <sup>1</sup> -верх, низ - 10° |
| 5  | 25                  | 11  | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204               | 204 | 204 | отверстие   | Шов, жест. элементы: 10 <sup>2</sup> верх и низ       |
| 6  | 25                  | 11  | 281     | 281     | 281     | 281     | 0       | 204                    | 204               | 204 | 204 | 1 точка   | Трение, верх-жесткие вставки, низ 10°                 |
| 7  | 25                  | 11  | 281     | 281     | 281     | 281     | 0       | 204                    | 204               | 204 | 204 | 9 точек   | Трение, верх-жесткие вставки, низ 10°                 |
| 8  | 25                  | 11  | 281     | 281     | 281     | 281     | 0       | 204                    | 204               | 204 | 204 | отверстие   | Трение, верх-жесткие вставки, по низу 10°             |
| 9  | 25                  | 11  | 281     | 281     | 281     | 281     | 0       | 204                    | 204               | 204 | 204 | отверстие   | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>1</sup> верх, низ 10°    |
| 10 | 25                  | 11  | 281     | 281     | 281     | 281     | 0       | 204                    | 204               | 204 | 204 | отверстие   | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>2</sup> верх и низ       |
| 11 | 14                  | 14  | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204               | 204 | 204 | 1 точка   | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10°                    |
| 12 | 14                  | 14  | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204               | 204 | 204 | 9 точек   | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10°                    |
| 13 | 14                  | 14  | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204               | 204 | 204 | отверстие   | Шов, верх-жесткие вставки, низ 10°                    |
| 14 | 14                  | 14  | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204               | 204 | 204 | отверстие   | Шов, жест. элементы: 10 <sup>2</sup> верх, низ 10°    |
| 15 | 14                  | 14  | 98681   | 98681   | 98681   | 98681   | 204     | 204                    | 204               | 204 | 204 | отверстие   | Шов, жест. элементы: 10 <sup>2</sup> верх и низ       |
| 16 | 14                  | 14  | 281     | 281     | 281     | 281     | 0       | 204                    | 204               | 204 | 204 | 1 точка   | Трение, верх-жесткие вставки, низ 10°                 |
| 17 | 14                  | 14  | 281     | 281     | 281     | 281     | 0       | 204                    | 204               | 204 | 204 | 9 точек   | Трение, верх-жесткие вставки, низ 10°                 |
| 18 | 14                  | 14  | 281     | 281     | 281     | 281     | 0       | 204                    | 204               | 204 | 204 | отверстие   | Трение, верх-жесткие вставки, по низу 10°             |
| 19 | 14                  | 14  | 281     | 281     | 281     | 281     | 0       | 204                    | 204               | 204 | 204 | отверстие   | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>1</sup> верх, низ 10°    |
| 20 | 14                  | 14  | 281     | 281     | 281     | 281     | 0       | 204                    | 204               | 204 | 204 | отверстие   | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>2</sup> верх и низ       |







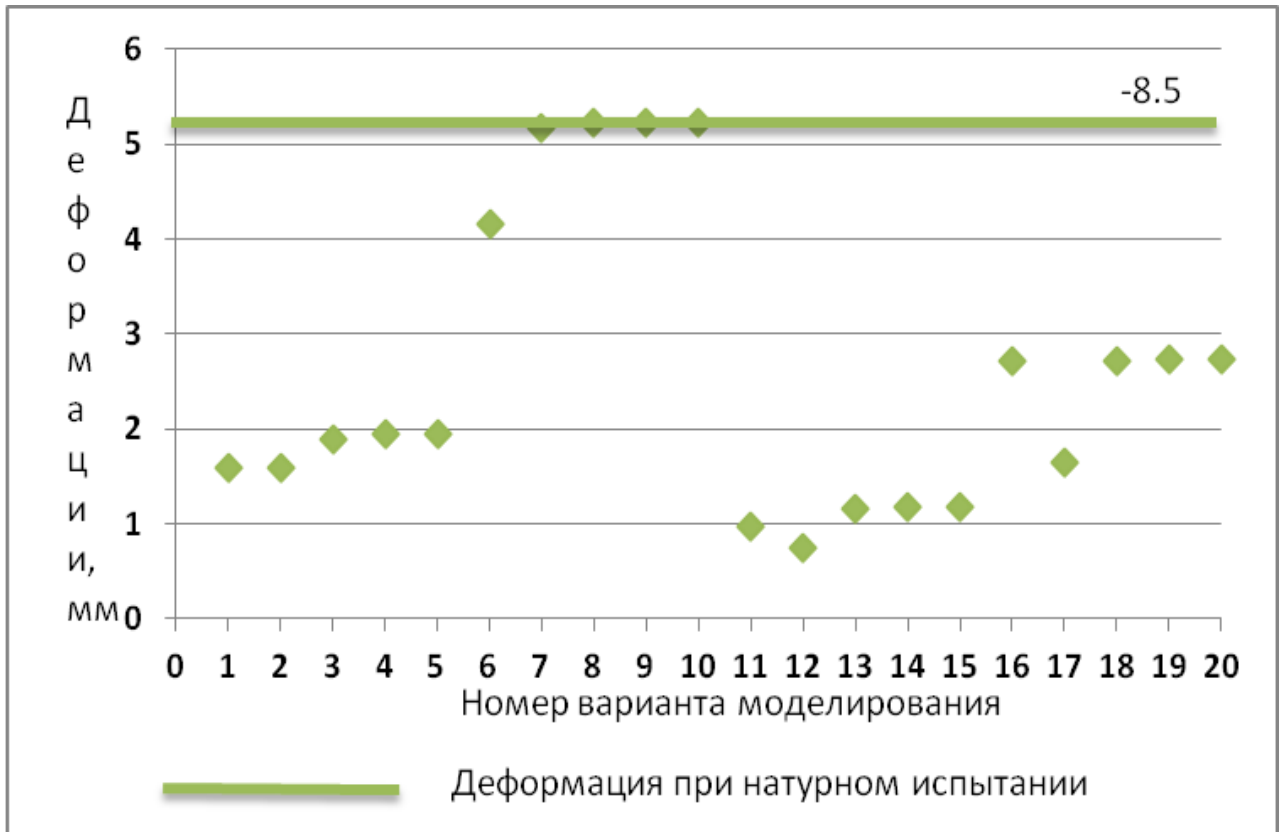


Рис. 3.28. Диаграмма результатов точки 1 плиты 1НС 48.30-1.

*Панель НСТ 58.30*

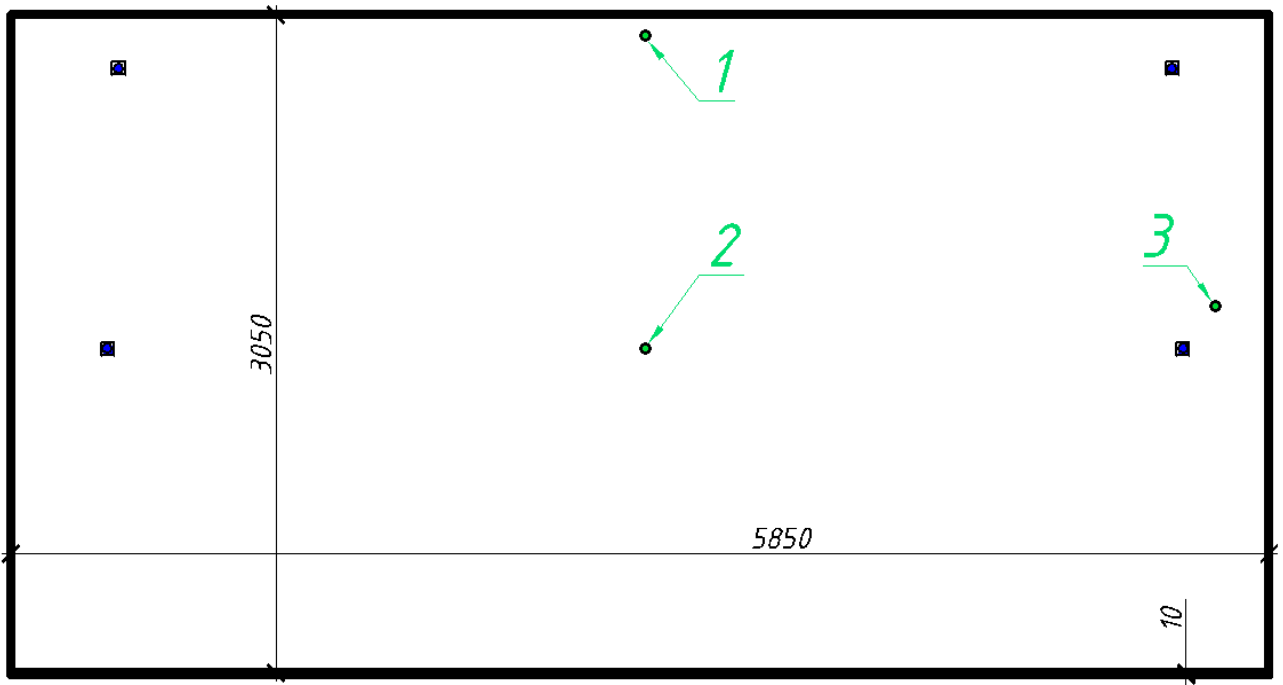


Рис. 3.29. Панель 1НСТ 58.30

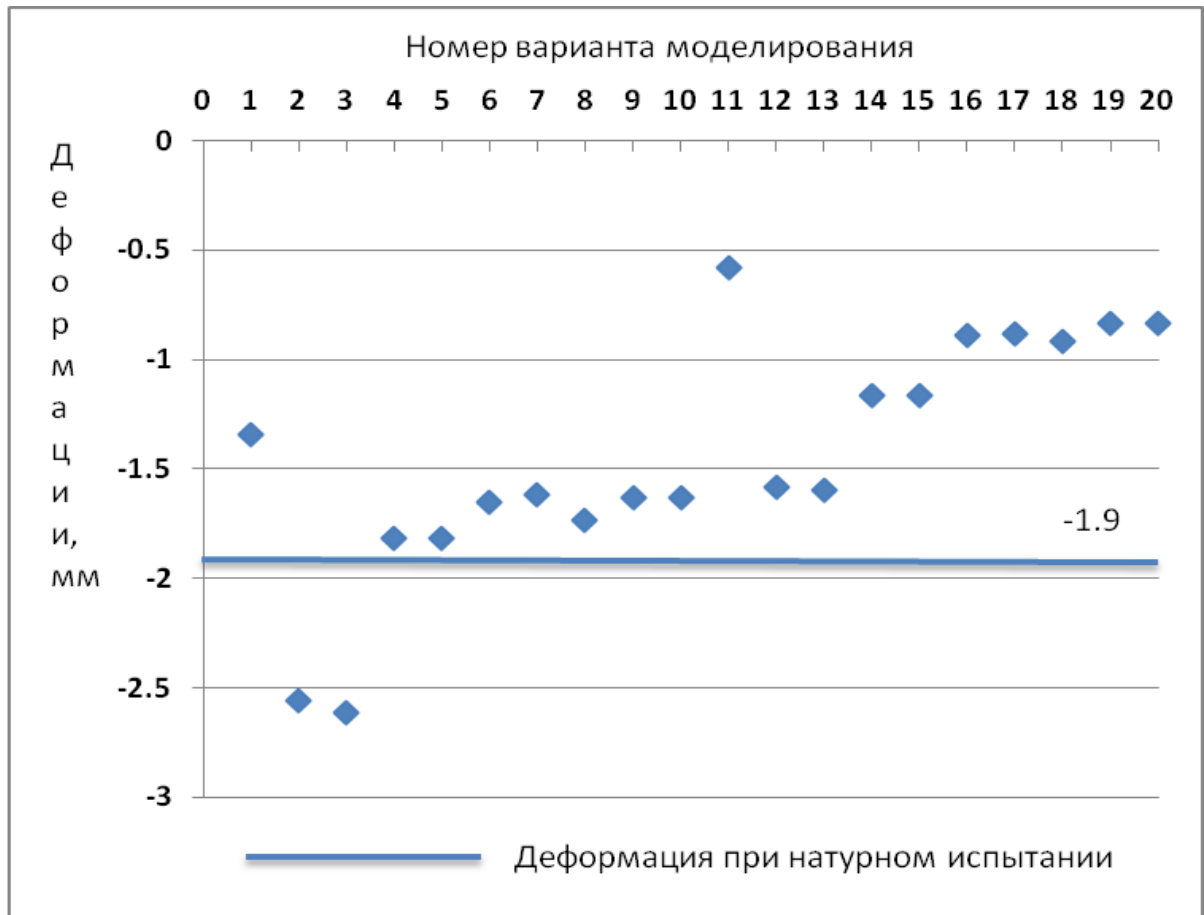


Рис. 3.30. Диаграмма результатов точки 1 плиты 1НСТ 58.30.



Рис. 3.31. Диаграмма результатов точки 2 плиты 1НСТ 58.30.

|  |  |          |         |      |
|--|--|----------|---------|------|
|  |  |          |         |      |
|  |  |          |         |      |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |



Рис. 3.32. Диаграмма результатов точки 3 плиты 1НСТ 58.30.

Панель НСТ 58.30-1

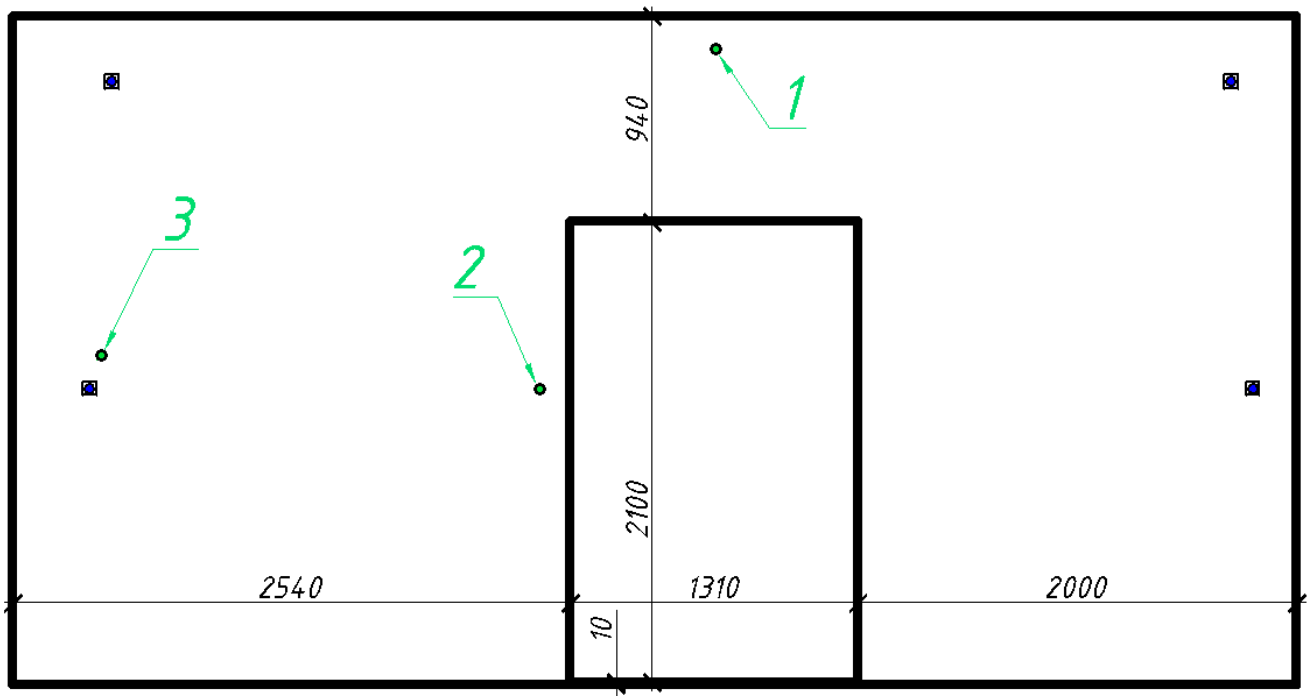


Рис. 3.33. Панель 1НСТ 58.30-1.

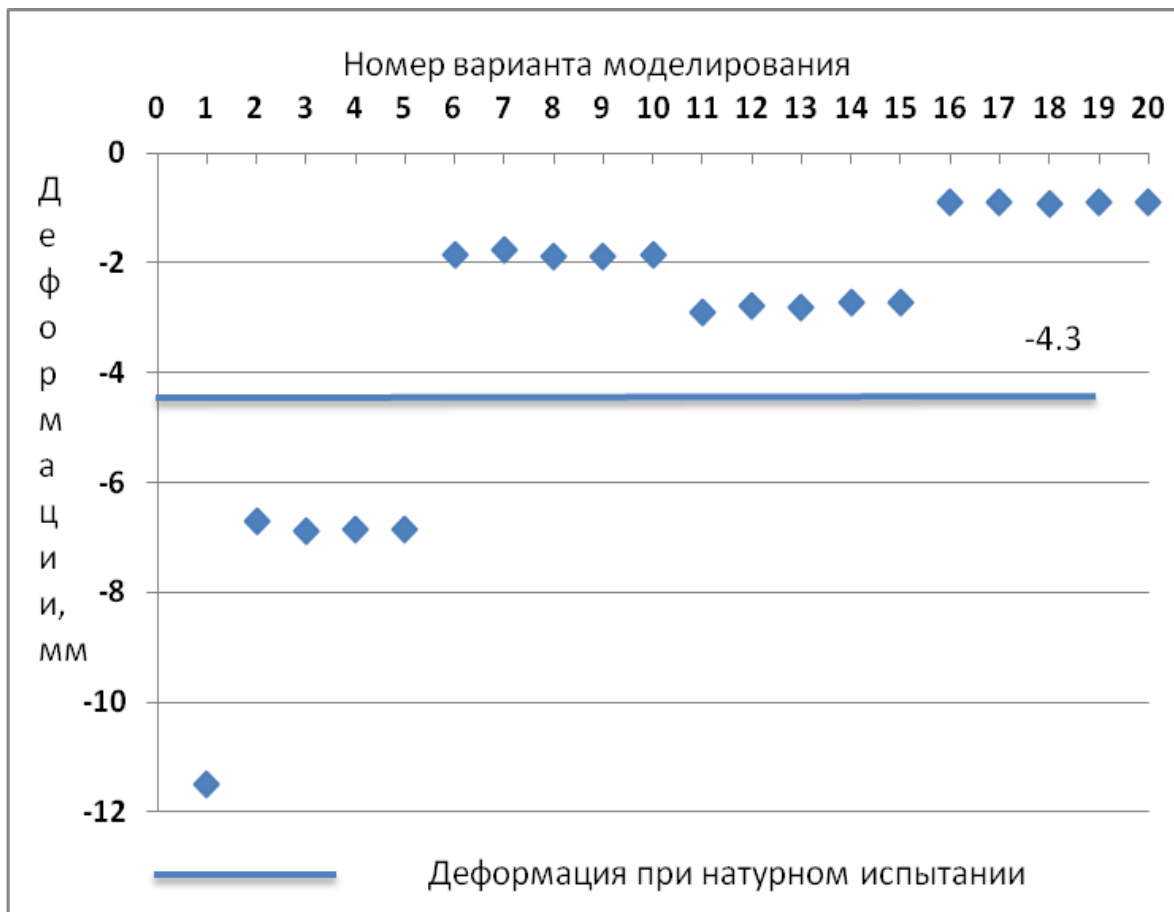


Рис. 3.34. Диаграмма результатов точки 1 плиты 1НСТ 58.30-1.

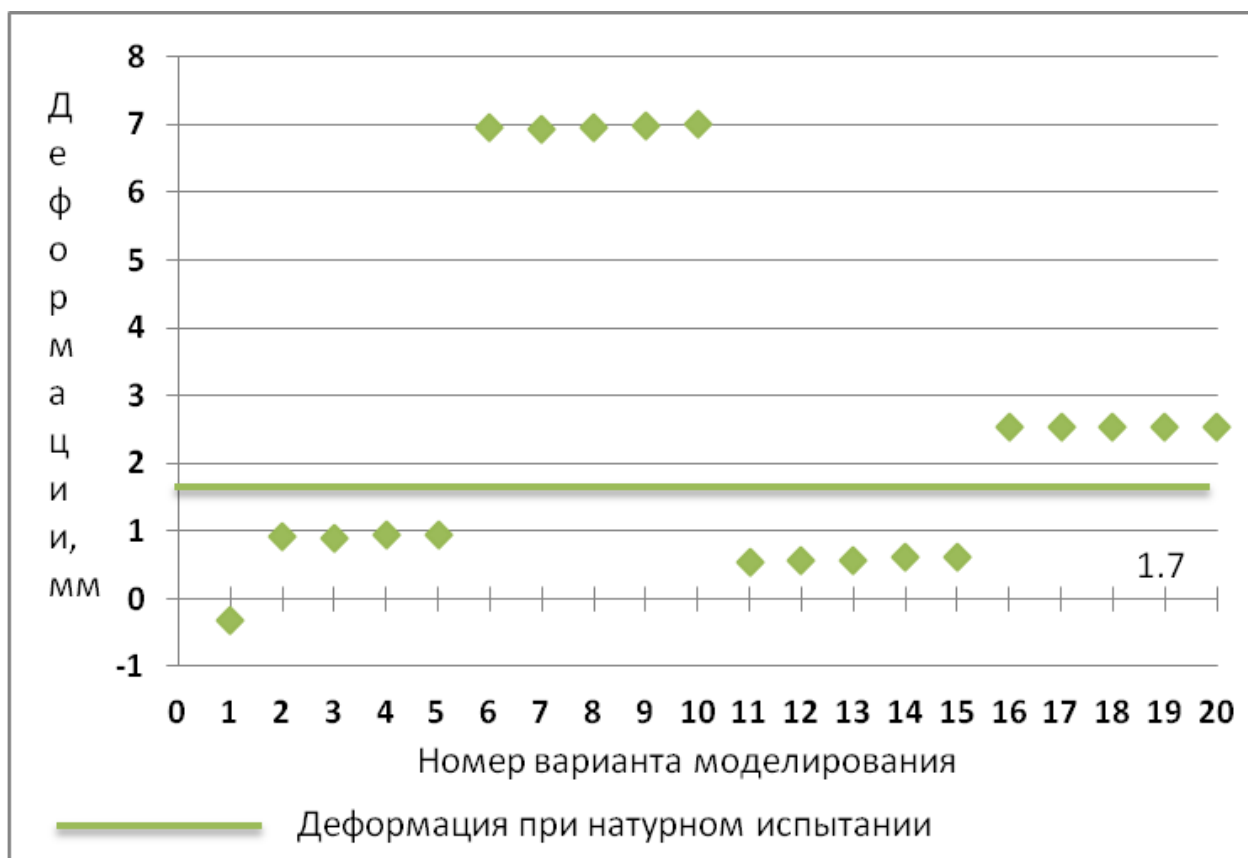


Рис. 3.35. Диаграмма результатов точки 2 плиты 1НСТ 58.30-1.

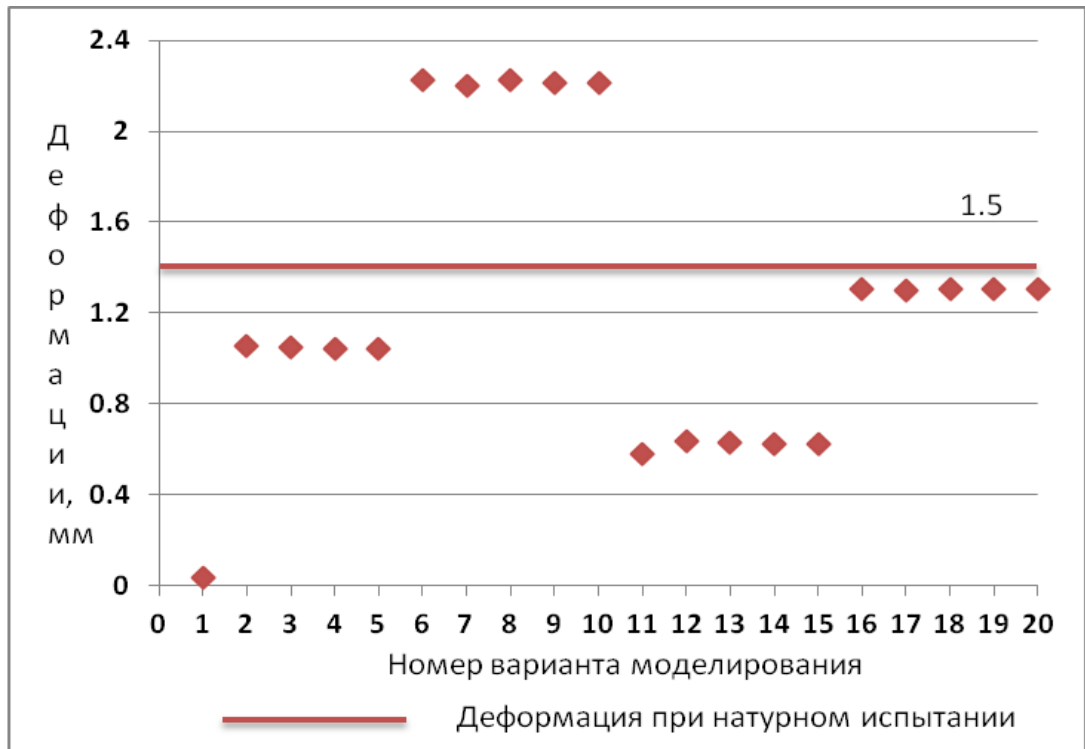


Рис. 3.36. Диаграмма результатов точки 3 плиты 1НСТ 58.30-1.

По диаграммам, составленным для каждой из точек панелей, видно, что плита 1 НСТ 58.30 имеет самые близкие к экспериментальным результаты по всем трем точкам.

Наиболее вероятный тип деформированной панели показан на рис. 3.37, 3.38, 3.39.

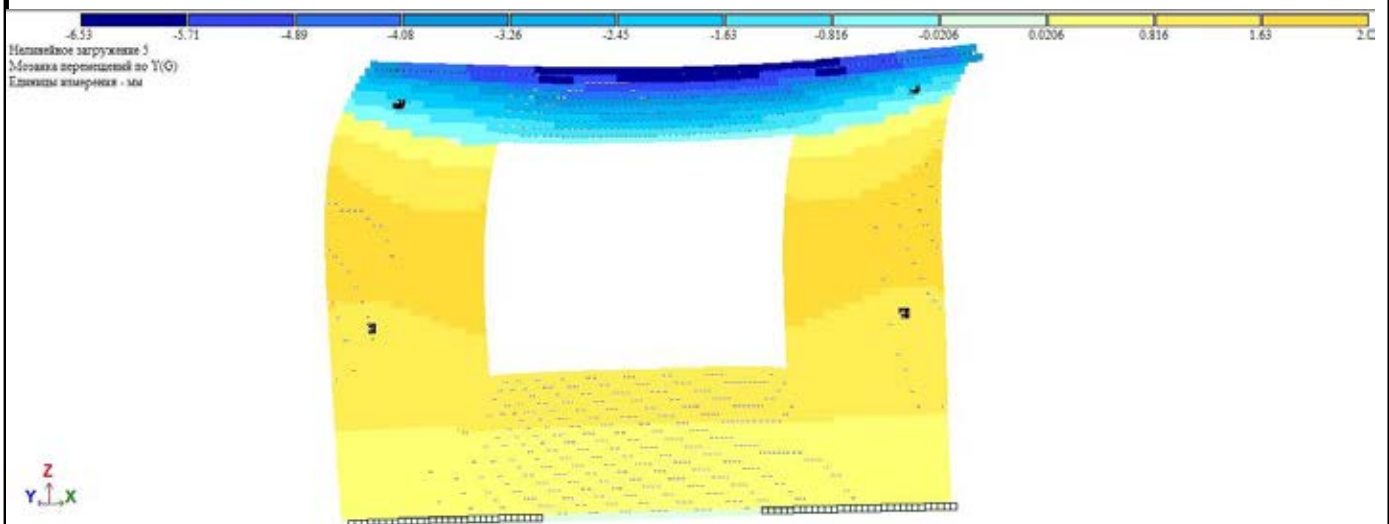


Рис. 3.37. Деформированная схема панели 1НС 48.30-1.

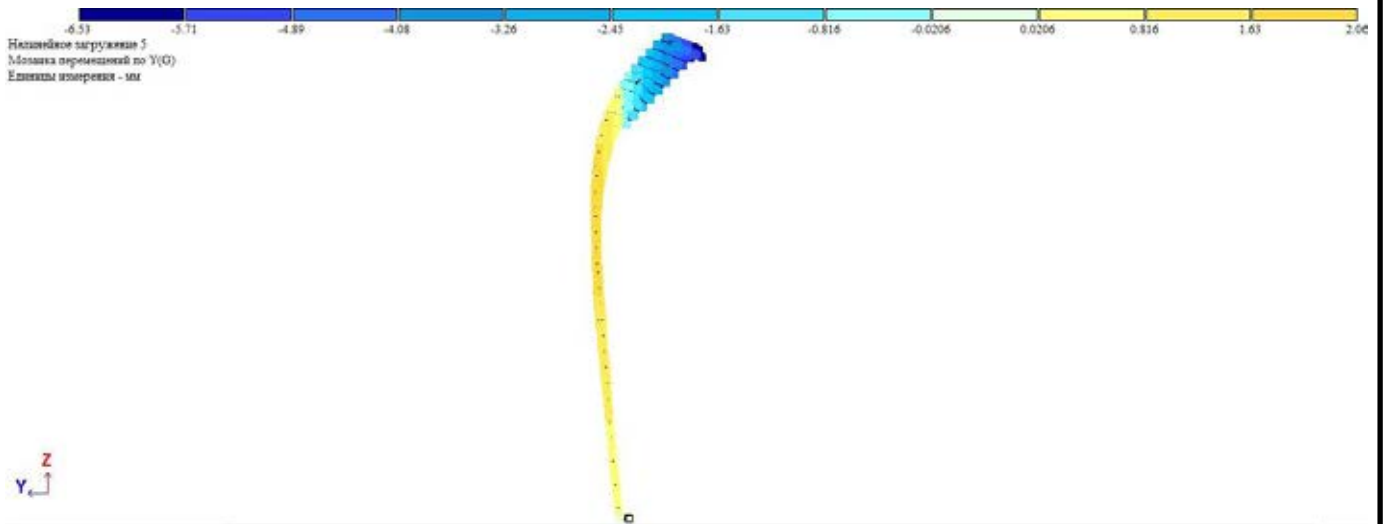


Рис. 3.38. Деформированная схема панели 1НС 48.30-1. Вид сбоку.

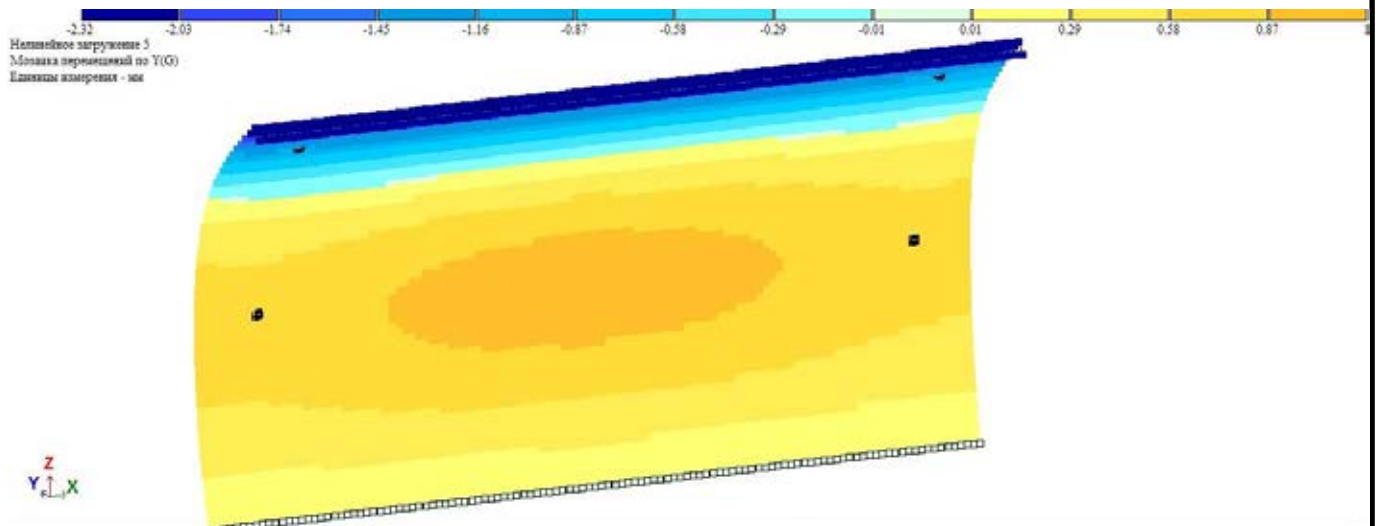


Рис. 3.39. Деформированная схема панели 1НСТ 58.30. Вид сбоку.

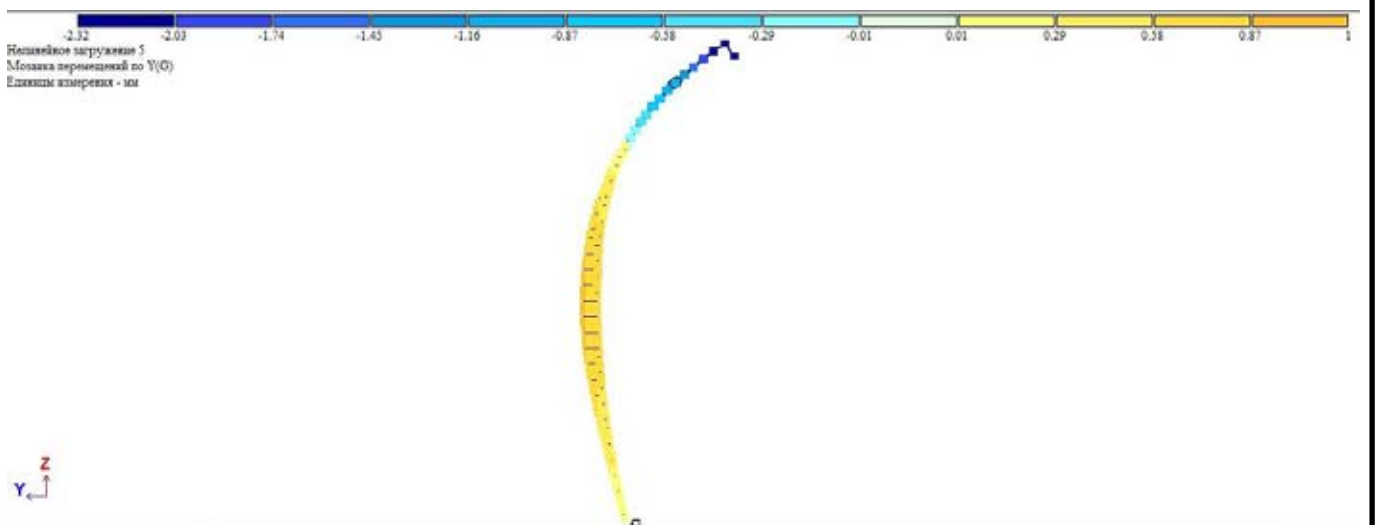


Рис. 3.40. Деформированная схема панели 1НСТ 58.30. Вид сбоку.

В ходе анализа полученных данных выбраны 5-ый и 15-ый варианты для всех 3-х плит, как наиболее близкие одновременно для всех точек. Эти варианты были более подробно посчитаны во втором приближении. Кроме указанных 5-го и 15-го вариантов для плит 1НСТ 58.30 и 1НСТ 58.30-1 очень близким оказался 20-ый вариант. Сводная таблица отобранных для дальнейшего исследования результатов (табл. 3.7).

Табл. 3.7. Сводные результаты численного эксперимента по панелям при первом приближении

| № ва | Параметры материала |    | Закрепление плиты 48.30-1 по низу (параметры КЭ 56) |            |           |         |         |           | Модель стяжек (КЭ 251) | Деформации бз, мм      |                       |                       | Примечания (Шов или трение) (Жесткие вставки или элементы с кон. жест.) |
|------|---------------------|----|---|------------|-----------|---------|---------|-----------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---|
|      |                     |    | Rx, т/м   | Ry, т/м    | Rz, т/м   | Rux, тм | Ruy, тм | Ruz, тм   |                        | 1                      | 2                     | 3                     |   |
|      |                     |    | Закон осн.  | Закон арм. | δт = -7.8 |         |         | δт = -8.5 |                        |                        | δт = 5.2              |                       |   |
| 5    | 25                  | 11 | 98681   | 98681      | 98681     | 204     | 204     | 204       | отверстие              | -5.8217<br>(-25.36%)   | -4.99371<br>(-41.25%) | 1.94138<br>(-62.67%)  | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> верх и низ                        |
| 15   | 14                  | 14 | 98681   | 98681      | 98681     | 204     | 204     | 204       | отверстие              | -3.3515<br>(-57.03%)   | -2.98623<br>(-51.62%) | 1.18502<br>(-77.21%)  | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> верх и низ                        |
| № ва | Параметры материала |    | Закрепление плиты 58.30 по низу (параметры КЭ 56)   |            |           |         |         |           | Модель стяжек (КЭ 251) | Деформации бз, мм      |                       |                       | Примечания (Шов или трение) (Жесткие вставки или элементы с кон. жест.) |
|      |                     |    | Rx, т/м   | Ry, т/м    | Rz, т/м   | Rux, тм | Ruy, тм | Ruz, тм   |                        | 1                      | 2                     | 3                     |   |
|      |                     |    | Закон осн.  | Закон арм. | δт = -1.9 |         |         | δт = 0.8  |                        |                        | δт = 1.5              |                       |   |
| 5    | 25                  | 11 | 98681   | 98681      | 98681     | 204     | 204     | 204       | отверстие              | -1.81713<br>(-4.36%)   | 0.995758<br>(24.47%)  | 0.648673<br>(-56.76%) | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> верх и низ                        |
| 15   | 14                  | 14 | 98681   | 98681      | 98681     | 204     | 204     | 204       | отверстие              | -1.16196<br>(-38.84%)  | 0.482662<br>(-39.67%) | 0.364871<br>(-75.68%) | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> верх и низ                        |
| 20   | 14                  | 14 | 236   | 236        | 98681     | 0       | 204     | 204       | отверстие              | -0.832368<br>(-56.19%) | 1.2035<br>(50.44%)    | 0.862413<br>(-42.51%) | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>21</sup> верх и низ                        |
| № ва | Параметры материала |    | Закрепление плиты 58.30-1 по низу (параметры КЭ 56) |            |           |         |         |           | Модель стяжек (КЭ 251) | Деформации бз, мм      |                       |                       | Примечания (Шов или трение) (Жесткие вставки или элементы с кон. жест.) |
|      |                     |    | Rx, т/м   | Ry, т/м    | Rz, т/м   | Rux, тм | Ruy, тм | Ruz, тм   |                        | 1                      | 2                     | 3                     |   |
|      |                     |    | Закон осн.  | Закон арм. | δт = -4.3 |         |         | δт = 1.7  |                        |                        | δт = 1.5              |                       |   |
| 5    | 25                  | 11 | 98681   | 98681      | 98681     | 204     | 204     | 204       | отверстие              | -6.84136<br>(59.10%)   | 0.946396<br>(-44.33%) | 1.04093<br>(-30.60%)  | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> верх и низ                        |
| 15   | 14                  | 14 | 98681   | 98681      | 98681     | 204     | 204     | 204       | отверстие              | -2.72327<br>(-36.67%)  | 0.623115<br>(-63.35%) | 0.625703<br>(-58.29%) | Шов, жест. элементы: 10 <sup>21</sup> верх и низ                        |
| 20   | 14                  | 14 | 281   | 281        | 98681     | 0       | 204     | 204       | отверстие              | -0.903056<br>(-79.00%) | 2.53227<br>(48.96%)   | 1.30569<br>(-12.95%)  | Трение, жест. эл-ты: 10 <sup>21</sup> верх и низ                        |

Характер деформирования всех панелей схожий, "верхняя" часть перемещается в одну сторону "средняя" часть - в другую, "нижняя" часть за счет характеристик закрепления (моделирование растворного шва) имеет нулевые перемещения по всем направлениям.

### 3.1.2. Второе приближение

Расчет выбранных при первом приближении вариантов проводим с пошаговым увеличением прикладываемой нагрузки от 20% до 100% по жесткости за 5 загрузений (как и в натуральных испытаниях). Это дает возможность проследить изменение напряженно-деформированного состояния, а также зафиксировать значения деформаций на каждом этапе. При создании таблицы нелинейных загрузений учитываем предыдущие загрузения, используя таблицу создания нелинейных загрузений.

Каждому из 5-ти загрузок присваиваем определенное количество шагов, что позволяет учесть предыдущие нагрузки (для первого загрузки 1 шаг, для второго 2 шага, для третьего - 3 и т.д.) Собственный вес учитываем во всех загрузках (рис. 3.41).

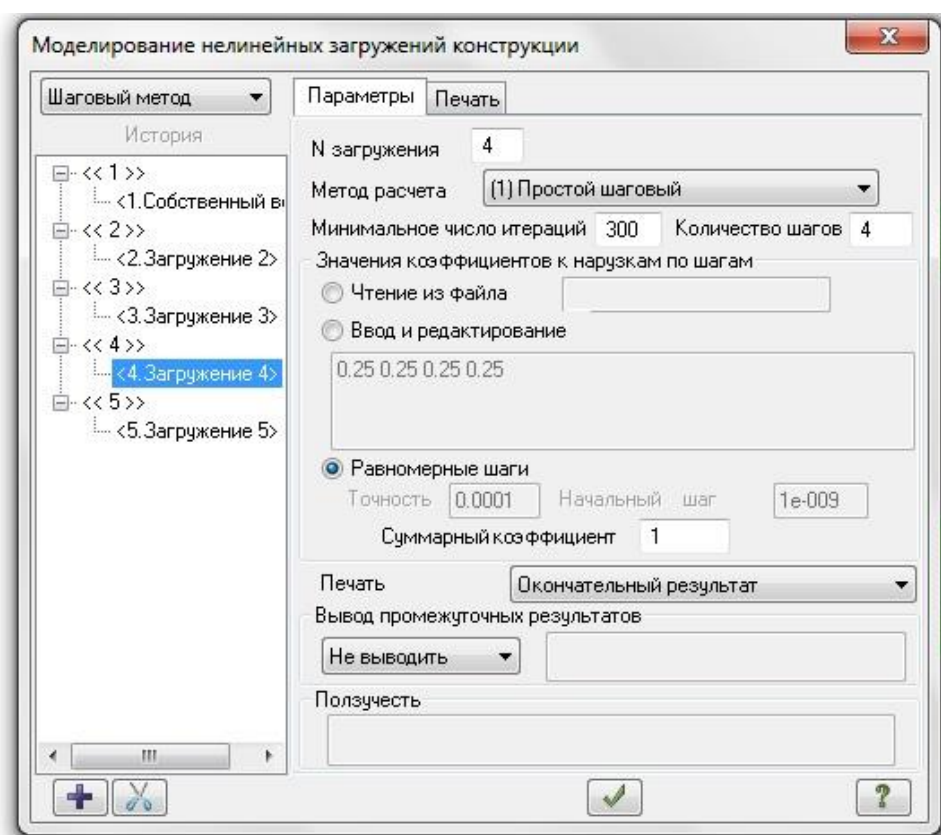


Рис. 3.41. Моделирование нелинейных нагрузок (2 приближение).

В ходе проведения расчетов получились деформации аналогичные результатам натурных испытаний. Результаты численного эксперимента в ходе второго приближения, показавшие наименьшие проценты отклонения от реальных, для каждой панели сведены в таблицу 3.8.



Табл. 3.8. Результаты численного эксперимента по всем панелям.

| <b>Плита 58.30</b>   |  | № загрузки | 1             | 2              | 3             | 4             | 5             |
|----------------------|--|------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| 5 вариант            | Нагрузка, т/м                          |            | 14.6          | 27.3           | 40.1          | 52.8          | 65.6          |
| 1 точка              | $\delta^T$ , мм                        |            | -0.2          | -0.6           | -1.1          | -1.5          | -1.9          |
| X=2.95 м             | $\delta^3$ , мм                        |            | -0.255        | -0.632         | -1.015        | -1.408        | -1.817        |
| Z=2.95 м             | $(\delta^T - \delta^3) / \delta^T$ , % |            | <b>-27.31</b> | <b>-5.39</b>   | <b>7.74</b>   | <b>6.13</b>   | <b>4.38</b>   |
| 2 точка              | $\delta^T$ , мм                        |            | -0.2          | 0.1            | 0.3           | 0.6           | 0.8           |
| X=2.95 м             | $\delta^3$ , мм                        |            | 0.114         | 0.311          | 0.513         | 0.744         | 0.996         |
| Z=1.5 м              | $(\delta^T - \delta^3) / \delta^T$ , % |            | <b>156.84</b> | <b>-210.56</b> | <b>-70.85</b> | <b>-24.07</b> | <b>-24.48</b> |
| 3 точка              | $\delta^T$ , мм                        |            | 0.1           | 0.4            | 0.8           | 1.1           | 1.5           |
| X=5.6 м              | $\delta^3$ , мм                        |            | 0.086         | 0.227          | 0.362         | 0.504         | 0.649         |
| Z=1.7 м              | $(\delta^T - \delta^3) / \delta^T$ , % |            | <b>14.45</b>  | <b>43.26</b>   | <b>54.70</b>  | <b>54.20</b>  | <b>56.75</b>  |
| <b>Плита 58.30-1</b> |  | № загрузки | 1             | 2              | 3             | 4             | 5             |
| 5 вариант            | Нагрузка, т/м                          |            | 19            | 36             | 53            | 69            | 86            |
| 1 точка              | $\delta^T$ , мм                        |            | -1            | -1.8           | -2.6          | -3.5          | -4.3          |
| X=3.2 м*             | $\delta^3$ , мм                        |            | -0.550        | -1.741         | -3.109        | -4.739        | -6.848        |
| Z=2.9 м              | $(\delta^T - \delta^3) / \delta^T$ , % |            | <b>44.96</b>  | <b>3.29</b>    | <b>-19.59</b> | <b>-35.41</b> | <b>-59.25</b> |
| 2 точка              | $\delta^T$ , мм                        |            | 0.1           | 0.5            | 0.9           | 1.3           | 1.7           |
| X=2.4 м              | $\delta^3$ , мм                        |            | 0.144         | 0.341          | 0.553         | 0.752         | 0.944         |
| Z=1.35 м             | $(\delta^T - \delta^3) / \delta^T$ , % |            | <b>-43.88</b> | <b>31.71</b>   | <b>38.61</b>  | <b>42.15</b>  | <b>44.48</b>  |
| 3 точка              | $\delta^T$ , мм                        |            | 0.2           | 0.5            | 0.8           | 1.2           | 1.5           |
| X=0.4 м              | $\delta^3$ , мм                        |            | 0.143         | 0.368          | 0.601         | 0.8095        | 1.041         |
| Z=1.5 м              | $(\delta^T - \delta^3) / \delta^T$ , % |            | <b>28.48</b>  | <b>26.38</b>   | <b>24.87</b>  | <b>32.54</b>  | <b>30.62</b>  |
| <b>Плита 48.30-1</b> |  | № загрузки | 1             | 2              | 3             | 4             | 5             |
| 5 вариант            | Нагрузка, т/м                          |            | 27.7          | 52.8           | 78            | 103.3         | 128.4         |
| 1 точка              | $\delta^T$ , мм                        |            | -1.5          | -3.0           | -4.5          | -6.2          | -7.8          |
| X=2.4 м*             | $\delta^3$ , мм                        |            | -0.499        | -1.432         | -2.565        | -4.026        | -5.804        |
| Z=3 м                | $(\delta^T - \delta^3) / \delta^T$ , % |            | <b>66.71</b>  | <b>52.26</b>   | <b>43.00</b>  | <b>35.07</b>  | <b>25.59</b>  |
| 2 точка              | $\delta^T$ , мм                        |            | -1.7          | -3.3           | -5.0          | -7.0          | -8.5          |
| X=3.6 м              | $\delta^3$ , мм                        |            | -0.454        | -1.276         | -2.246        | -3.474        | -4.989        |
| Z=3 м                | $(\delta^T - \delta^3) / \delta^T$ , % |            | <b>73.31</b>  | <b>61.33</b>   | <b>55.08</b>  | <b>50.38</b>  | <b>41.31</b>  |
| 3 точка              | $\delta^T$ , мм                        |            | 0.8           | 1.9            | 2.9           | 4             | 5.2           |
| X=3.7 м              | $\delta^3$ , мм                        |            | 0.206         | 0.586          | 0.976         | 1.435         | 1.944         |
| Z=1.75 м             | $(\delta^T - \delta^3) / \delta^T$ , % |            | <b>74.21</b>  | <b>69.15</b>   | <b>66.33</b>  | <b>64.13</b>  | <b>62.61</b>  |

Самые близкие результаты испытаний у плиты 1НСТ 58.30 без проема, у плиты с оконным проемом 1НС 48.30-1 результаты, как и у остальных панелей, имеют сходный характер деформации, но большие отклонения. Проем в панели оказывает существенное влияние на напряженное состояние всей конструкции из-за концентраций напряжений.

## 4. ВЫВОДЫ

### 4.1. Результаты численного эксперимента

1. Построена расчетная конечно-элементная модель для в ПК "Лири-САПР" с характеристиками, приближенными к реальным для всех трех типов панелей:

1.1. Выбраны 25 и 11 экспоненциальные законы нелинейного материала, как показавшие более близкие деформации по сравнению с вычисленным по нормативным документам кусочно-линейным 14 законом, это объясняет распространенное применение 25 и 11 законов при расчетах (рис. 4.1);

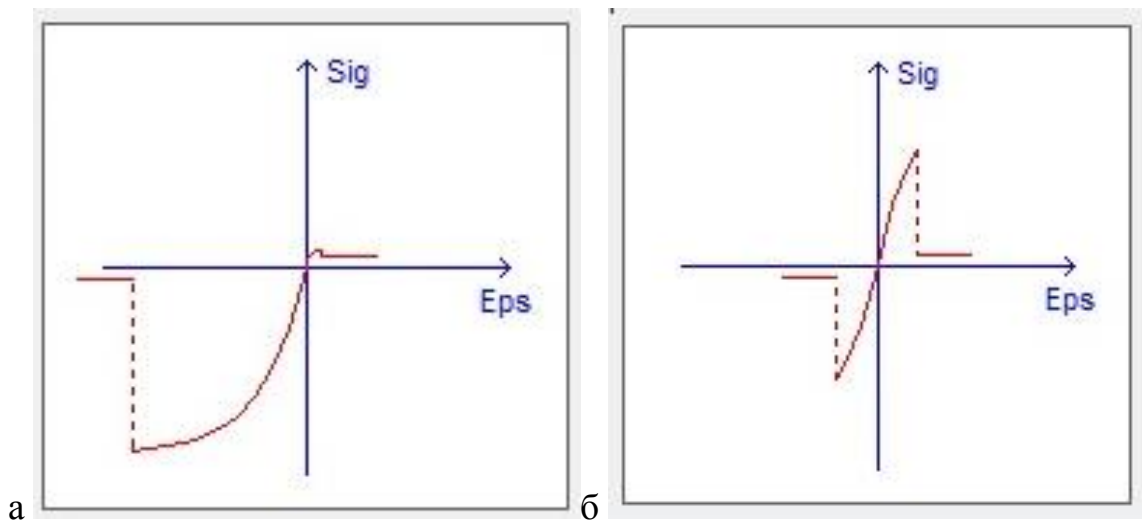


Рис. 4.1. Экспоненциальные законы нелинейного деформирования:  
а - 25 закон для бетона, б - 11 закон для арматуры.

1.2. Для расчетной модели выбрано закрепление плиты по низу - "шов", вычисленные характеристики для растворного шва достаточно реалистично отражают закрепление плиты (рис. 4.2);

1.3. Выбранная модель стяжек "отверстие" («закрепление» точек по краям отверстия при помощи 56 КЭ с жесткостью 600 т/м каждая, см. рис. 4.3) приводит к результатам, напоминающим натурные, это связано с тем, что в лаборатории для закрепления тяжей испытатели вручную выполняли необходимые для закрепления металлических тяжей отверстия;

1.4. В ходе проведения численного эксперимента установлено, что стержни с конечной жесткостью показывают лучшие результаты, чем жесткие вставки.

|  |  |          |         |      |  |  |  |  |      |
|--|--|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
|  |  |          |         |      |  |  |  |  | Лист |
|  |  |          |         |      |  |  |  |  | 75   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |  |  |  |  |      |

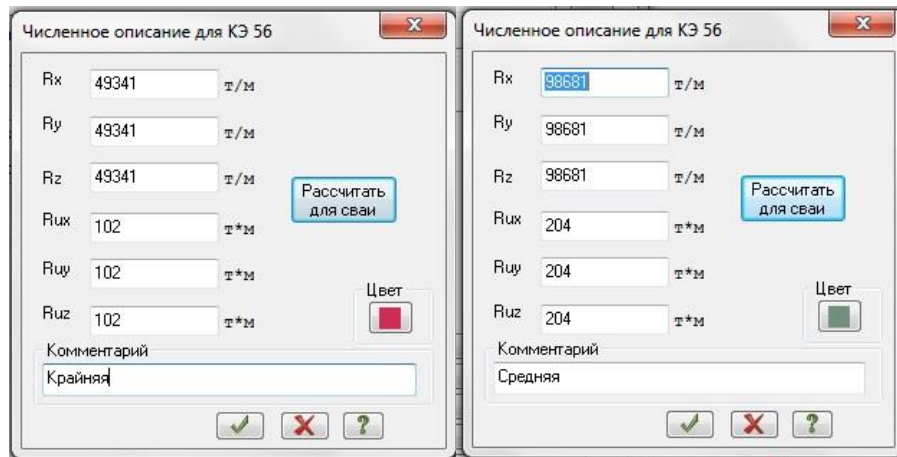


Рис. 4.2. Жесткости растворного шва для крайних и средних точек.

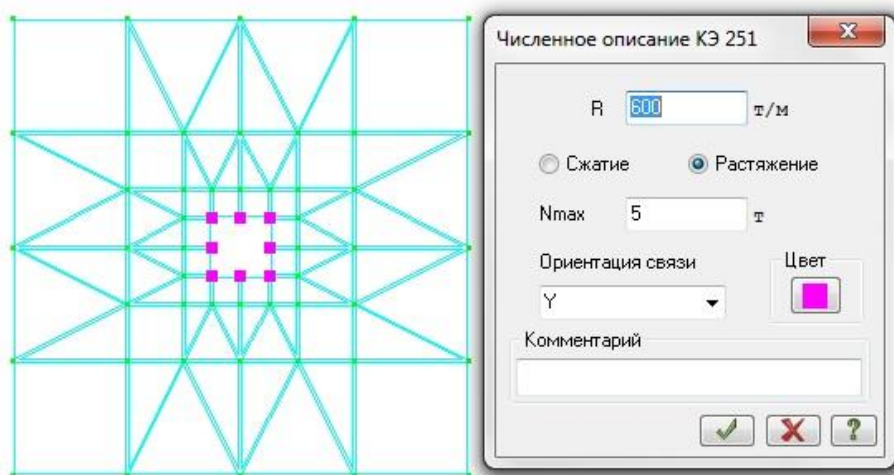


Рис. 4.3. Модель "прикрепления" стяжки к плите - отверстие.

2.1. Выполнено достаточное количество расчетов для разных видов панелей, схожий характер деформирования панелей между собой, а также численного и натурного экспериментов свидетельствует о правильности исследований (рис. 4.4).

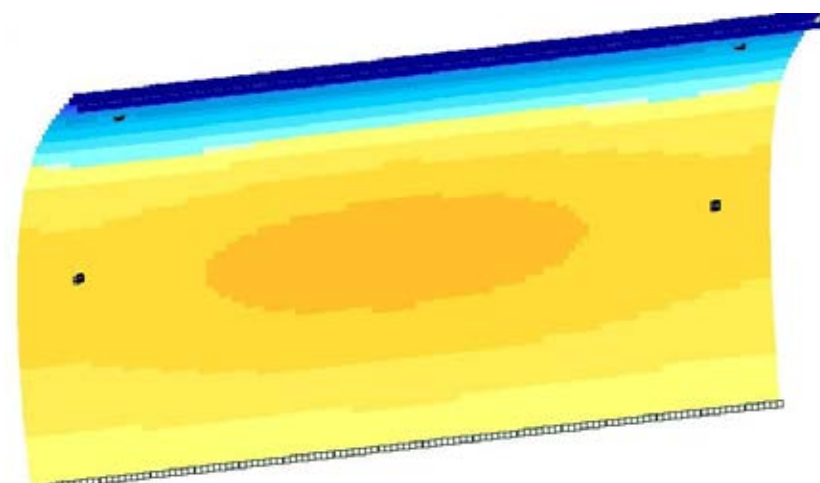


Рис. 4.4. Деформированная схема.

|  |  |          |         |      |
|--|--|----------|---------|------|
|  |  |          |         |      |
|  |  |          |         |      |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |

2.3. При сопоставлении результатов натурального и численного экспериментов получены разные отклонения, некоторые деформации точек достаточно близки к реальным, другие же похожи только по знаку. В целом, минимальное полученное отклонение численного эксперимента от натурального составляет 3,3%. При втором приближении получен анализ 45 значений деформаций, из них 5 результатов численного эксперимента получены с отклонением от натурального менее 10%, 20 результатов с отклонением менее 35%.

#### 4.2. Анализ результатов

Как и ожидалось, результаты испытаний стеновой панели (1НС 58.30) оказались наиболее близкими (за исключением нескольких точек), так как у этой плиты нет проема и жесткость постоянная (армирование постоянное по всему сечению).

Конструкция с проемом вызывает трудности при расчете, так же армирование этой конструкции неоднородное. Отверстие в панели оказывает существенное влияние на напряженное состояние всей конструкции, т.к. в углах и на границе проема происходит концентрация (увеличение) напряжений.

Увеличение размеров отверстий приводит к образованию «внутренней» статической неопределимости конструкций, что влияет на деформации. По результатам численного эксперимента процент расхождения результатов плиты 1 НС 48.30-1 больше, так как проем у этой плиты составляет ориентировочно 1/4 часть от площади плиты (4 вида жесткости), у другой же плиты 1 НСТ 58.30-1 это соотношение меньше и составляет 1/6 часть (2 вида жесткости), что, несомненно, оказывает влияние на работу конструкции.

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 77   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировав деформации, полученные в ходе численного эксперимента, можно считать, что современный нелинейный процессор программного комплекса "ЛИРА-САПР" способен отразить характер работы железобетонной конструкции, при этом только необходимо как можно точнее задать параметры моделирования.

Результаты, полученные в ходе проведения исследования, позволяют "предсказать" работу конструкции до проведения каких-либо реальных испытаний, что, безусловно, может сберечь конструкции от разрушения, а также сэкономить материальные и временные ресурсы на лабораторных испытаниях.

Нелинейная теория расчета конструкций интенсивно развивается, это вызвано различными причинами, но главная из них - внедрение в практику строительства тонкостенных пространственных конструкций (мембран, пластинок, оболочек), а также конструкций (из высокопрочных и других материалов), имеющих нелинейную диаграмму деформирования.

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 78   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агапов, В.М. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций / В.М. Агапов. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. - 248 с.
2. Байков, В.Н. Железобетонные конструкции: Общий курс: Учеб. для вузов / Байков В.Н., Сигалов Э.Е. - 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1991. -767 с.
3. Водопьянов, Р.Ю. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2013: Руководство пользователя. Обучающие примеры / Водопьянов Р.Ю., Титок В.П., Артамонова А.Е. под редакцией Городецкого А.С. - М.: электронное издание, 2015 г., - 460 с.
4. Гвоздев, А.А. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций / Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., Гуца Ю.П., Залесов А.С., Мулин М.Н., Чистяков Е.А. М., Стройиздат, 1978, 204 с.
5. ГОСТ 8829-94. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости.
6. ГОСТ 11024-2012. Панели стеновые наружные бетонные и железобетонные для жилых и общественных зданий.
7. Городецкий, А.С. Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. - М: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. - 360 с.
8. Городецкий, Д.А. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2013: учебное пособие/ Городецкий Д.А., Барабаш М.С., Водопьянов Р.Ю., Титок В.П., Артамонова А.Е. под редакцией Городецкого А.С. , -К.-М.: Электронное издание, 2013 г., - 376 с.
9. Икрин, В.А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности: Учебник для вузов по направлению "Строительство" / В.А. Икрин. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2005 . - 423 с.

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 79   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

10. Клованич, С.Ф. Нелинейные модели материалов в строительной механике / Клованич С.Ф., Малышко Л. - Одесса: ОНМУ, 2017.- 125 с.
11. Лукаш, П.А. Основы нелинейной строительной механики / П.А. Лукаш. – М.: Стройиздат, 1978. – 208 с.
12. Маклакова, Т.Г. Конструкции гражданских зданий: Учебник / Маклакова Т.Г., Нанасова С.М.-М.: Издательство АСВ, 2000 – 280 с.
13. Перельмутер, А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа/ Перельмутер А.В., Сливкер В.И. «Расчетные модели сооружений и возможность их анализа»/ А.В. Перельмутер., В.И. Сливкер. - М.: Издательство СКАД СОФТ, 2011.- 736 стр.
14. Пособие по проектированию жилых зданий к СНиП 2.08.01-85 выпуск 3. Конструкции жилых зданий;
15. Рождественский, В.Б. Верификационный отчет по программному комплексу "ЛИРА-САПР" Том 1. Основные возможности. Библиотека конечных элементов. Примеры применения / В.Б. Рождественский, Москва, 2015 г.
16. Рождественский, В.Б. Верификационный отчет по программному комплексу ЛИРА-САПР Том 2. Верификационные примеры, входящие в состав поставки ПК ЛИРА-САПР/ В.Б. Рождественский, Москва, 2015 г.
17. Верификационный отчет по программному комплексу "ЛИРА-САПР 2015" Том 3/ Задачи, предложенные экспертами, Москва, 2015 г.
18. Соколов, В.С. Прочность и трещиностойкость стеновых панелей зданий: Монография / В.С. Соколов; Москва, Издательство АСВ, 2010.
19. Соколов В.С. Проектирование стеновых панелей зданий. Учебное пособие. / В.С. Соколов - Казань, 1991.
20. Соломин, В.И. Метод конечных элементов. Плоские стержневые системы: Учебное пособие / В.И. Соломин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 73 с.
21. СП 63.13330.2012 "Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения" Актуализированная редакция СНиП 52-101-2003, 2013 г.;

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 80   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |

22. СП 52-101-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры»;

23. Справочная система: ЛИРА-САПР 2015.

24. Трушин, С.И. Метод конечных элементов. Теория и задачи: Учебное пособие/ С.И. Трушин - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. - 256 с.

25. СТП 136-99 Стандарт предприятия Проектная документация для строительства "Специальные вспомогательные сооружения и устройства для строительства мостов" ОАО "Институт Гипростроймост", Москва 1999.

26. СТО ЮУрГУ 04-2008 Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению / составители: Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Л.В. Винокурова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008.

27. Федеральный закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

28. [www.liraland.ru](http://www.liraland.ru).

|  |  |          |         |      |                                 |      |
|--|--|----------|---------|------|---------------------------------|------|
|  |  |          |         |      | АС-256.08.04.01.2017.128.ПЗ ВКР | Лист |
|  |  |          |         |      |                                 | 81   |
|  |  | № докум. | Подпись | Дата |                                 |      |