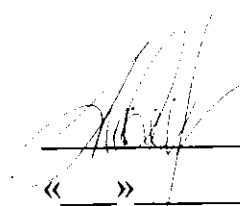




Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНО-СЕРТИФИКАЦИОННЫЙ УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И
РЕСУРСА КОМПОНЕНТОВ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ
«ЦЕНТР МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И РЕСУРСА»
ООО «НСУЦ «ЦМиР»

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «НСУЦ «ЦМиР»


_____ М.Б. Бакиров
« ____ » _____ 2010 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЁТ

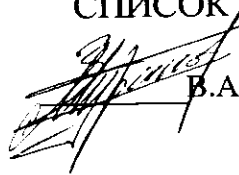
ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ МАШИННОГО ЗАЛА,
ДЕАЭРАТОРНОГО ОТДЕЛЕНИЯ И ЭТАЖЕРКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ
ЭНЕРГОБЛОКА №1 БАЛАКОВСКОЙ АЭС

№ ТО-001/МЗ/06-10

Москва 2010

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

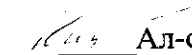
Ответственный
исполнитель по работе,
руководитель группы



В.А. Муранов

Организация работ, общее
редактирование отчета

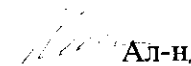
Ведущий инженер



Ал-сей С. Киселев

Проведение расчётов на прочность

Ведущий инженер



Ал-ндр С. Киселев

Проведение расчётов на прочность

Нормоконтролер



Л.Б. Собољкова

Оформление отчётных материалов

»

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АЭС	Атомная электростанция
БалАЭС	Балаковская атомная электростанция
ВВЭР	Водо-водяной энергетический реактор
ДО	Деаэрационное отделение
ЖБК	Железобетонные конструкции
ИК	Инструментальный контроль
НК	Неразрушающий контроль
НД	Нормативная документация
НИР	Научно-исследовательская работа
МК	Металлоконструкции
МЗ	Машинный зал
ППР	Планово-предупредительный ремонт
ПКД	проектно-конструкторская документация
СК	Строительные конструкции
ЦМиР	Центр материаловедения и ресурса
ЭЭТУ	Этажерка электротехнических устройств

РЕФЕРАТ

Отчет 77 страниц, 67 рисунков, 9 таблиц

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ, ПРОЧНОСТЬ, ОСАДКИ, МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ, РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ.

Настоящий технический отчёт подготовлен согласно договору №06/10 от 19.11.2010 «Проведение расчета строительных конструкций здания машинного зала энергоблока №1 Балаковской АЭС по результатам натурного обследования с целью обоснования эксплуатационного ресурса».

Технический отчёт подготовлен с целью проведения поверочного расчета на прочность несущего каркаса машинного зала, деаэрационного отделения (ДО) и этажерки электротехнических устройств (ЭЭТУ) с учетом неравномерных осадок фундаментов колонн и эксплуатационных нагрузок.



ООО «НСУЦ «ЦМР»

Центр материаловедения и ресурса

129281, г. Москва, ул. Летчика Бабушкина, д.32, корп.2, E-mail: estm@ore.ru Тел/факс: (499) 503-95-29

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1. Назначение и описание строительных конструкций	7
2 Расчет напряженно-деформированного состояния каркаса зданий машзала, ДО и ЭЭТУ от неравномерных осадок фундаментов колонн	18
Расчет на устойчивость (в плоскости изгиб. момента).	57
Расчет на устойчивость (в плоскости изгиб. момента).	61
Расчет на устойчивость (в плоскости изгиб. момента).	66
Выводы.....	74
Список использованных источников	76



ООО «НСУЦ «ЦМР»

Центр материаловедения и ресурса

129281, г. Москва, ул. Летчика Бабушкина, д.32, корп.2, E-mail: tsstm@orc.ru Тел/факс: (499) 503-95-29

Введение

В связи с истечением проектного срока службы энергоблока № 1 Балаковской АЭС необходимо выполнить работы по оценке технического состояния и остаточного ресурса строительных конструкций здания машинного зала, деаэрационного отделения и этажерки электротехнических устройств.

Для оценки технического состояния и остаточного ресурса строительных конструкций необходимо провести комплекс работ, включающий в себя следующие этапы:

- сбор и анализ исходных данных о техническом состоянии строительных конструкций;
- расчет напряженно-деформированного состояния несущего каркаса строительных конструкций в целях определения наиболее нагруженных зон;
- разработка и согласование программы обследования и Рабочей программы контроля строительных конструкций;
- проведение визуально-измерительного и инструментального экспертного контроля элементов строительных конструкций;
- проведение поверочных расчётов наиболее нагруженных (критических) зон строительных конструкций с учётом полученных результатов натурного обследования с целью обоснования эксплуатационного ресурса.

Целью данного этапа работы является проведение поверочного расчета на прочность несущего каркаса машинного зала, деаэрационного отделения (ДО) и этажерки электротехнических устройств (ЭЭТУ) с учетом неравномерных осадок фундаментов колонн, эксплуатационных нагрузок и полученных результатов натурного обследования с целью обоснования эксплуатационного ресурса.

На основании проведённого расчётного обоснования будет разработано Заключение и проект Технического решения о возможности дальнейшей эксплуатации строительных конструкций здания машинного зала, деаэрационного отделения и этажерки электротехнических устройств энергоблока № 1 Балаковской АЭС на сверх проектный срок 30 лет.

1. Назначение и описание строительных конструкций

Машинный зал, деаэрационное отделение и этажерка электротехнических устройств входят в состав турбинного отделения. Введены в эксплуатацию 01.12.1985 г.

Проект машзала, деаэрационного отделения (ДО) и этажерки электротехнических устройств (ЭЭТУ) выполнен в конце 70-х годов в соответствии с Унифицированным проектом АЭС с ВВЭР-1000 и НТД, действующей на указанный период времени.

Машинный зал, деаэрационное отделение и этажерка электротехнических устройств торцами примыкают к реакторному отделению. Они имеют общие цифровые (с «1» по «12» для машзала и ДО, с «1» по «10» – для машзала, ДО и ЭЭТУ) оси. Машзал расположен в буквенных осях «А-Б», деаэрационное отделение – в буквенных осях «Б-В», этажерка электротехнических устройств – в буквенных осях «В-Г» (рисунок 1.1 и 1.2).

Машинный зал

Деаэрационное
отделение

ЭЭТУ



Рисунок 1.1 – Общий вид местонахождения машинного зала, деаэрационного отделения
и этажерки электротехнических устройств

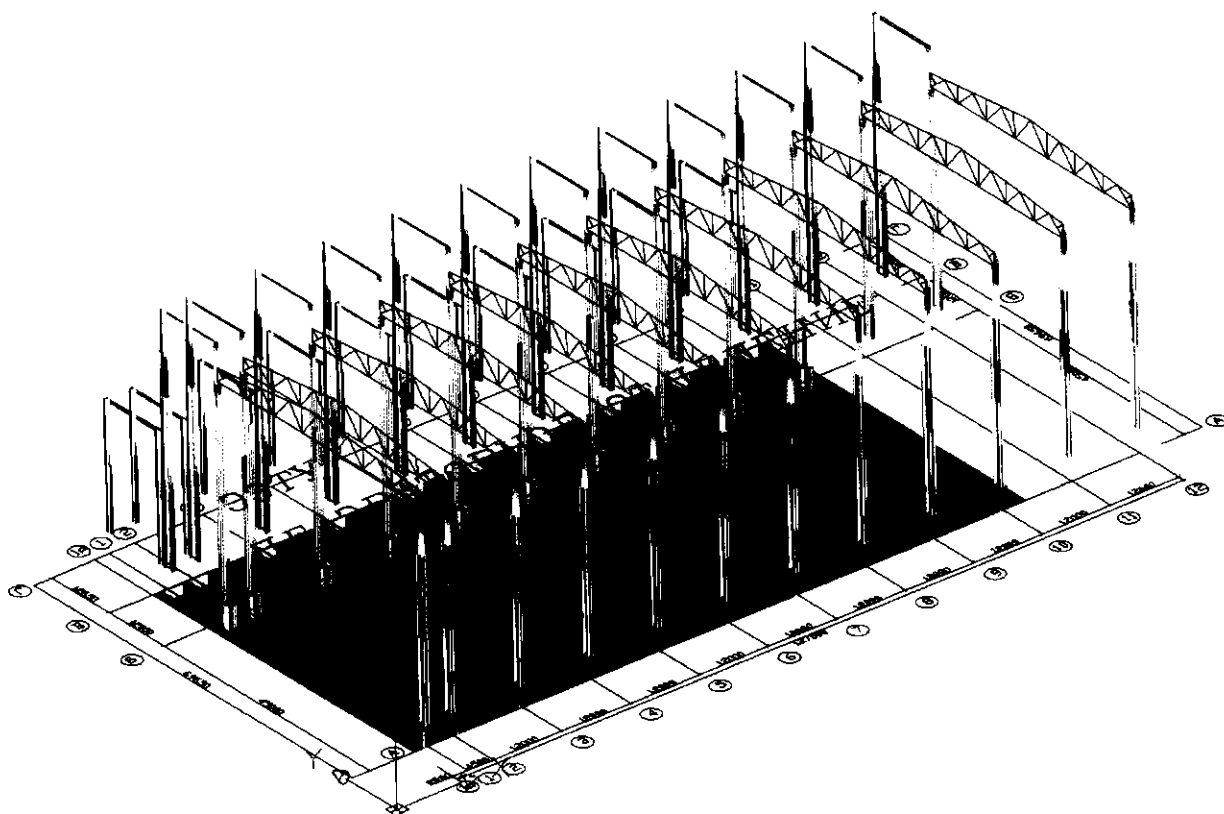


Рисунок 1.2 – Каркас машинного зала, деаэрационного отделения
и этажерки электротехнических устройств

Машзал и деаэрационное отделение имеют металлический каркас. Каркас этажерки электротехнических устройств – сборный железобетонный.

Машинный зал имеет размеры в плане 127×45 м (в осях «1-12» / «А-Б») (рисунок 1.4) и высоту до низа ферм покрытия 35,5 м (рисунок 1.3).

Машинный зал и деаэрационное отделение в осях «1-10» имеют общий подвал на отм. -3,600.

В машинном зале располагается турбоагрегат со вспомогательным оборудованием. Оперативная отметка обслуживания турбоустановки +15,000, отметка конденсационного пола 0,000 (соответствует абсолютной отметке (40,00) (рисунки 1.3, 1.4 и 1.5). Для обслуживания турбоустановки в машзале предусмотрены металлические площадки на отм. +5,100; +11,700; +16,200. Ниже отметки подвала, в пригрузе, расположены трубопроводы циркуляционного водоснабжения конденсаторов турбины и конденсаторов турбопитательных насосов (ТПН).

Поперек машинного зала в осях «1-2» вдоль стены реакторного отделения предусмотрена этажерка для обслуживания технологических трубопроводов. Размер этажерки в плане 45×6 м, высота 24 м. Этажерка металлическая из прокатных профилей и представляет собой многоярусную балочную конструкцию с настилом из рифленого листа с опиранием балок на металлические стойки из двутавров.

Машинный зал имеет двухъярусное обслуживание мостовыми кранами грузоподъемностью 200/32 т пролетом 42 м (отметка головки рельса +29,500) и 15 т пролетом 40 м (отметка головки рельса +23,900) (рисунок 1.3).

В осях «10-11» на отм.0,000 в наружном стеновом ограждении по буквенным осям «А» и «В» предусматриваются ворота для железнодорожного сквозного проезда через здание (рисунок 1.4). Для въезда автотранспорта в наружном стеновом ограждении машзала в осях «2-3» предусмотрены подъемно-складчатые ворота (4,8×5,5 м).

Оперативная отметка машзала на отм. 0,000 связана герметичными входами с реакторным отделением.

Деаэрационное отделение (в осях «1-12» / «Б-В») расположено вдоль машинного зала, имеет размеры в плане 127 х 12 м, отметка низа ригеля кровельного покрытия +42,000 (рисунки 1.3, 1.4, 1.5 и 1.7). В деаэрационном отделении располагается основное насосное оборудование турбоустановки. Основные отметки деаэрационного отделения – 0,000; +15,000; +27,000. На отм. 0,000 находится регенерационная установка БОУ, питательные насосы. На отм. +15,000 расположены: установка кондиционеров, установка фильтров-сеток, установка панелей БОУ, приточная венткамера.

Под отм. +15,000 предусмотрены площадки для обслуживания питательных турбонасосов, над отм. +15,000 – площадки установки паровых турбинных машин.

На отм. +27,000 устанавливаются деаэраторы, расположены мастерские турбинного цеха.

Для обслуживания оборудования в деаэрационном отделении предусматривается один мостовой кран грузоподъемностью 20/5 т (отметка головки рельса +10,700, оси «1-11») и две подвесные кран-балки грузоподъемностью по 10 т (отметка верха +24,300, оси «1-9»; отметка верха +41,900, оси «1-11»).

Этажерка электротехнических устройств (в осях «1-10», рядах «В-Г») предусмотрена пятиэтажной. Отметка низа плит покрытия +20,970. Перекрытия в этажерке электротехнических устройств предусмотрены на отметках +3,600; +8,400; +12,000; +16,800 (рисунки 1.3, 1.4 и 1.5).

Фундаменты под каркас машзала и деаэрационного отделения предусмотрены из монолитного железобетона класса В25 на сульфатостойком портландцементе (из-за наличия сульфатной агрессии в грунтовых водах). Отметка подошвы фундаментов минус 6,400. Основанием для фундаментов служит щебеночная подушка (под фундамент турбоагрегата щебеночно-песчаная подушка) с модулем деформации $E = 49 \text{ МПа}$ (500 кгс/см^2) толщиной 4,1 м.

Для защиты подземной части машзала и деаэрационного отделения от попадания грунтовых вод в подвальные помещения предусмотрена усиленная гидроизоляция днища подвала и подпорных стен со стороны грунта. Гидроизоляция предусмотрена из профилированного полиэтилена марки АР 1,3 по ТУ 7-19-4-77.

Гидроизоляция днища укладывается ребрами вверх на выравнивающий слой из песка толщиной 20 мм по бетонной подготовке толщиной 180 мм из бетона класса В10. Сверху гидроизоляции для защиты ее от механических повреждений предусмотрен защитный слой из бетона В10 толщиной 80 мм по выравнивающему слою из песка толщиной 20 мм. По защитному слою бетона предусматриваются сборные железобетонные плиты днища подвала толщиной 200 мм марки ПФЖ по серии 71147-с. Плиты днища подвала приняты размерами 2700 x 5700 мм и 2700 x 2700 мм.

Гидроизоляция днища соединяется с гидроизоляцией подпорных стен наваркой полос из полиэтиленового листа шириной 100 мм, образуя тем самым замкнутый контур.

Подпорные стены приняты в сборном железобетоне в виде Г-образных панелей толщиной 200 мм из бетона В 25.

Армирование подпорных стен здания принято с использованием каркасов, сеток и отдельных стержней. Арматура классов А-III, А-I по ГОСТ 5781-82.

Гидроизоляция подпорных стен (профилированный полиэтилен марки АР 1,3 по ТУ 7-19-4-77) устанавливается при изготовлении панелей и анкерится ребрами в бетон. Стыковые швы полиэтиленовой гидроизоляции на монтаже перекрываются полосами из полиэтиленового листа шириной 100 мм со сваркой и 100 % контролем качества сварных швов.

С отметки подошвы фундаментов (-6,400) до отметки -4,000 предусмотрен бетонный пригруз из бетона класса В10 для учета воздействия грунтовых вод, в котором заложены циркуляционные водоводы и другие технологические трубопроводы большого диаметра, а также технологические прямки. С отм. -4,000 до отм. -3,600 предусмотрена железобетонная силовая плита из бетона класса В15, в которую заделываются стойки конденсационного пола.

Каркас машинного зала и деаэрационного отделения – металлический.

Каркас в поперечном направлении представляет собой однопролетную одноэтажную раму – для машзала (в цифровых осях «А-Б») и однопролетную многоэтажную раму для деаэрационного отделения (в цифровых осях «Б-В»), обеспечивающую жесткость в поперечном направлении.

Фермы кровли машинного отделения шарнирно опираются на колонны оси «А» и на колонны оси «Б» деаэрационного отделения.

Продольная жесткость каркаса обеспечивается установкой связей по колоннам в осях «А», «Б» и «В», связями покрытия машзала, перекрытиями и кровельным покрытием.

Колонны каркаса машзала и деаэрационного отделения (оси «А», «Б», «В») приняты сплошными составного переменного сечения из прокатных профилей. С отм. 0,000 до отм. +27,500 колонны имеют сечение с габаритными размерами в плане до 1600×630 мм. Толщина листа, из которого изготовлены колонны, составляет 20 мм, до отм. 16,0 м. Выше этой отметки толщина

листа составляет 16 мм. Выше отм.+27,500 колонны имеют сечение с габаритными размерами в плане до 1000×500 мм.

Колонны приняты из стали высокопрочной марки 14Г2АФ-6 и низколегированной повышенной прочности марки 14Г2-6 по ГОСТ 19282-73. Продольные ребра колонн приняты из стали низкоуглеродистой для сварных конструкций марки ВСт3кп2 по ГОСТ 380-71.

Распорки и связи приняты из стали марок ВСт3 псб и ВСт3кп2 по ГОСТ 380-71.

Несущие ригели приняты из прокатных профилей и составного сечения с высотой сечения до 1800 мм. Материал ригелей – сталь марки 14Г2-6 по ГОСТ 19282-73, материал ребер – ВСт3кп2 по ГОСТ 380-71.

Фермы покрытия машзала имеют следующие размеры: пролет 45,0 м, высота на опорах 2,2 м, высота по коньку – 4,5 м; фермы расположены вдоль цифровых осей с шагом 12,0 и связаны между собой по верхним и нижним поясам связями и распорками. Пояса ферм приняты прокатными таврового сечения высотой до 200 мм из стали марки 14Г2-6 по ГОСТ 19282-73. Материал остальных элементов – сталь марки ВСт3псб по ГОСТ 380-71.

Наружное стеновое ограждение машзала и деаэрационного отделения принято из керамзитобетонных стеновых панелей марки «ПСК» из бетона класса В12,5 толщиной 300 мм. Стеновые панели приняты в основном пролетом 12,0 м, высотой 1,8; 1,2 м. Схема фасада машзала, деаэрационного отделения и этажерки электротехнических устройств представлена на рисунке 1.6.

Междуэтажные перекрытия деаэрационного отделения приняты из преднапряженных ребристых плит марки «ПНОС» (класс бетона В40) и плоских плит марки «ППЖ» (класс бетона В15), которые опираются на металлические ригели.

Фундамент турбоагрегата принят сборно-монолитным. Отметка подошвы фундамента -6,400. Нижняя плита фундамента под турбоагрегат толщиной 3,8 м принята из монолитного железобетона класса В25 на сульфатостойком портландцементе. Основанием для фундамента служит щебеночно-песчаная подушка толщиной 4,1 м.

Надземная часть фундамента под турбоагрегат принята рамно-стенчатой конструкции. Под наиболее тяжелые элементы оборудования приняты монолитные стены из бетона класса В30. Под возбуждатель и статор генератора (ЦВД) приняты пространственные рамы, образованные из сборных железобетонных колонн, балок и ригелей с омоноличиванием узлов. Поверх сборных элементов предусматривается железобетонная монолитная плита. Арматура узлов омоноличивания и плиты принята из стали класса А-III марки 35ГС по ГОСТ 5781-82 и А-I марки ВСт3кп2 по ГОСТ 380-71.

Для наблюдения за осадками и контроля деформаций на нижней и верхней плите предусматриваются осадочные марки. Замеры осадок и деформаций нижней плиты предусмотрены после окончания бетонирования плиты от постоянного глубинного репера.

Геометрия описанных выше зданий показана на рисунках 1.3 – 1.7.

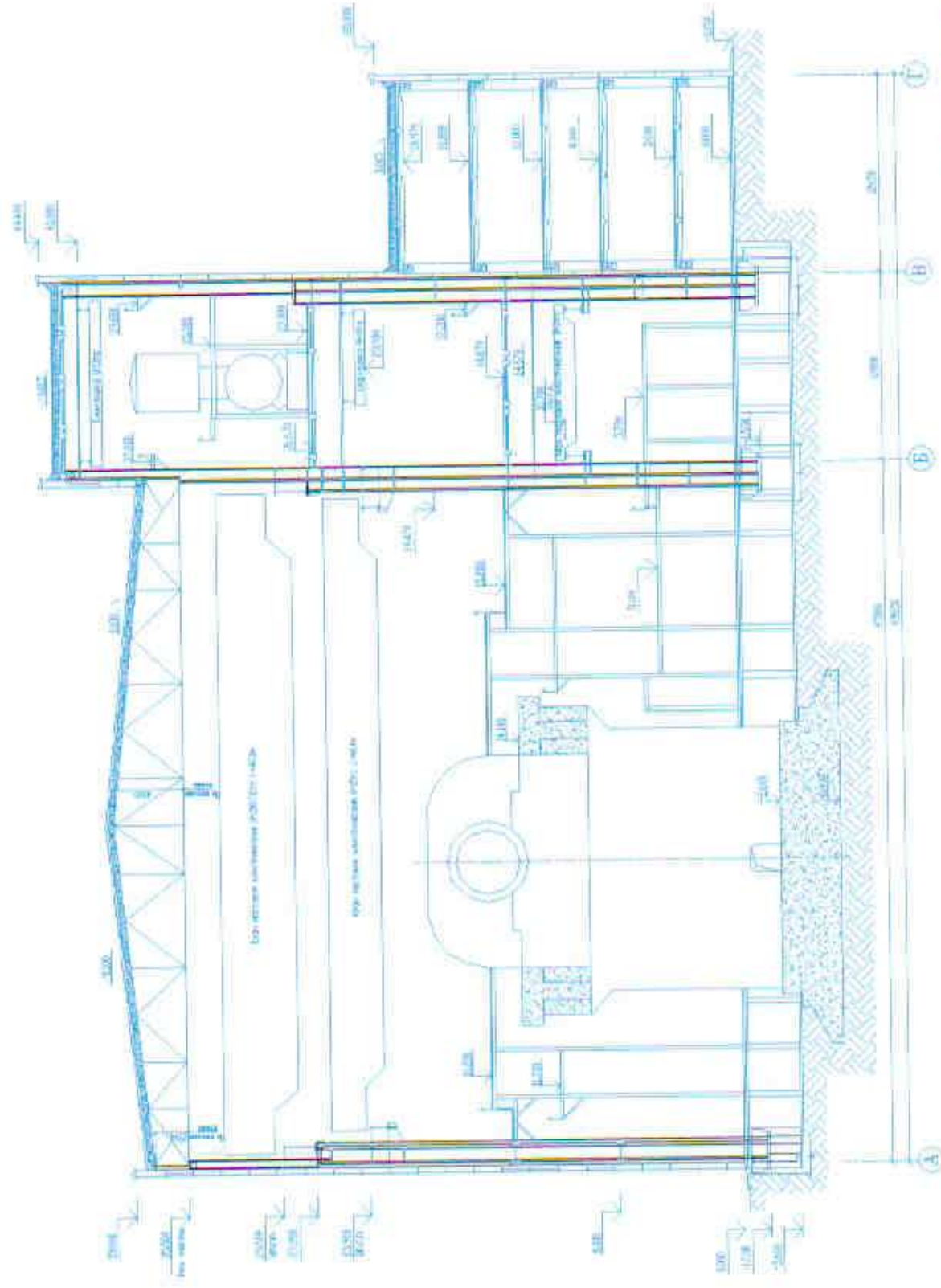


Рисунок 1.3 – Поперечный разрез машинного зала, деаэрационного отделения и этажи электротехнических устройств по оси б-б

План на отметке 0.000

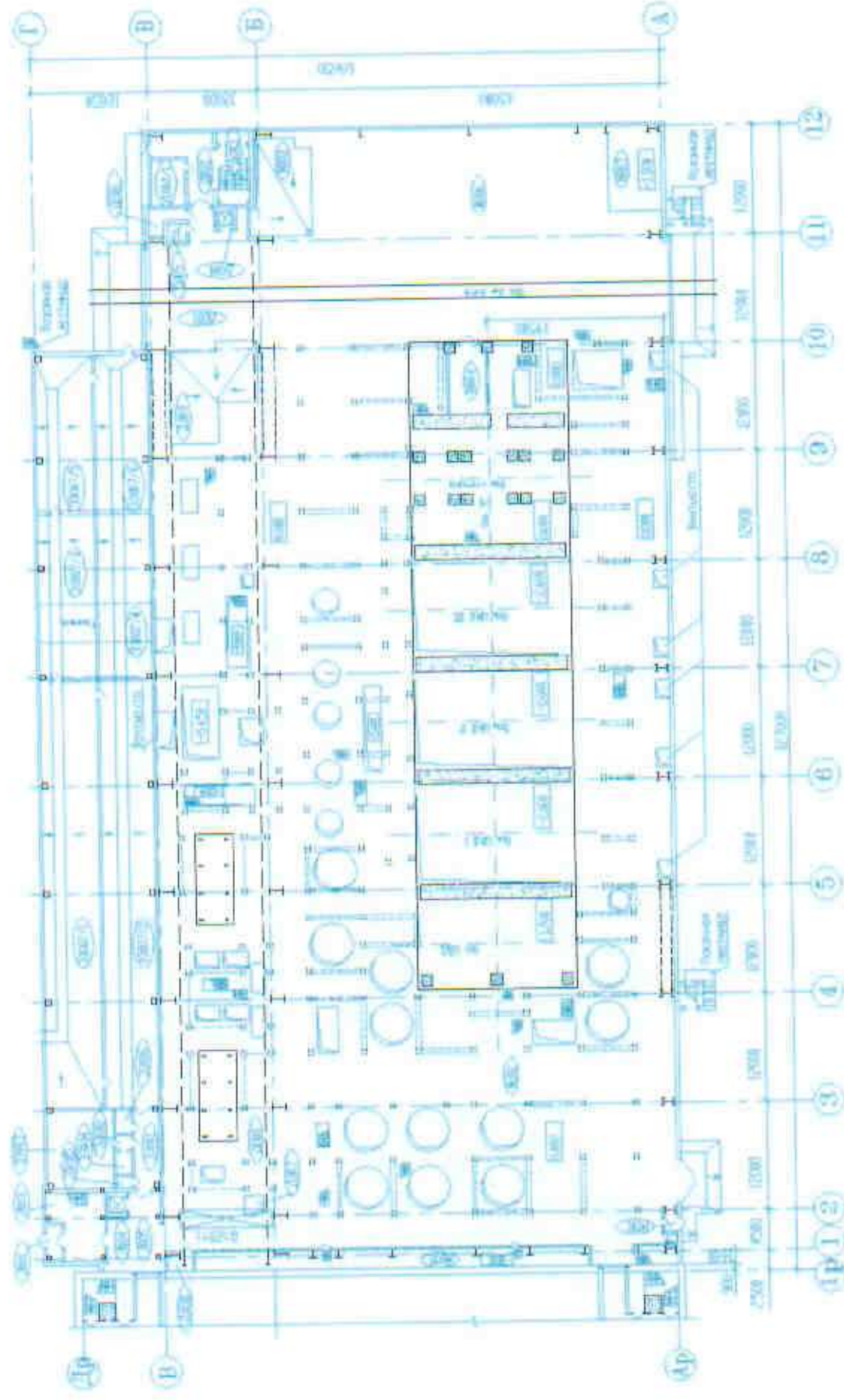


Рисунок 1.4 – План машзала, деаэрационного отделения и эстажерки электротехнических устройств на отметке 0.0 м

План на отметке 15.000, 16.200, 16.800

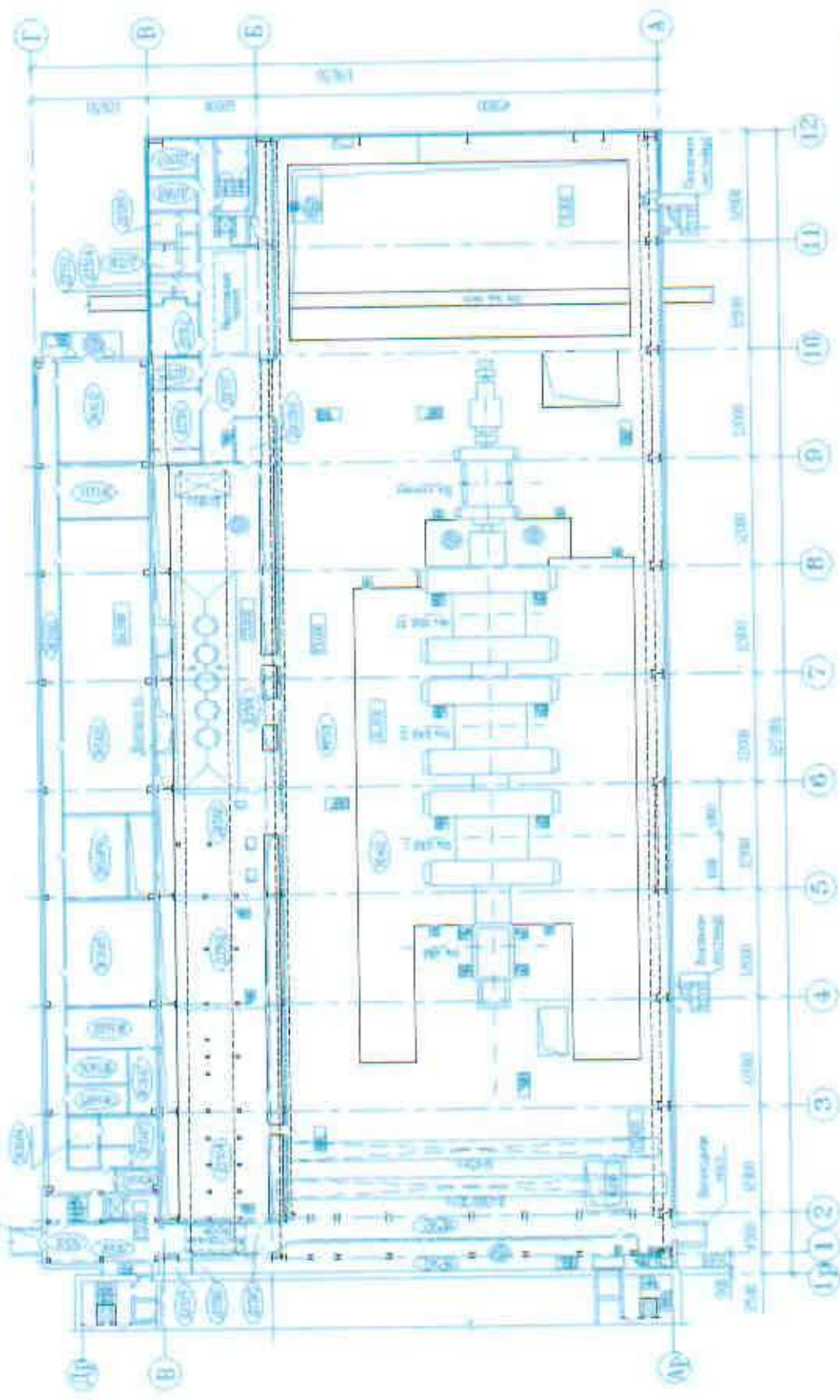


Рисунок 1.5 – План машинзала, деаэрационного отделения и эстажки электротехнических устройств на отметках 15.0, 16.2 и 16.8 м

ФАСАД А-Г

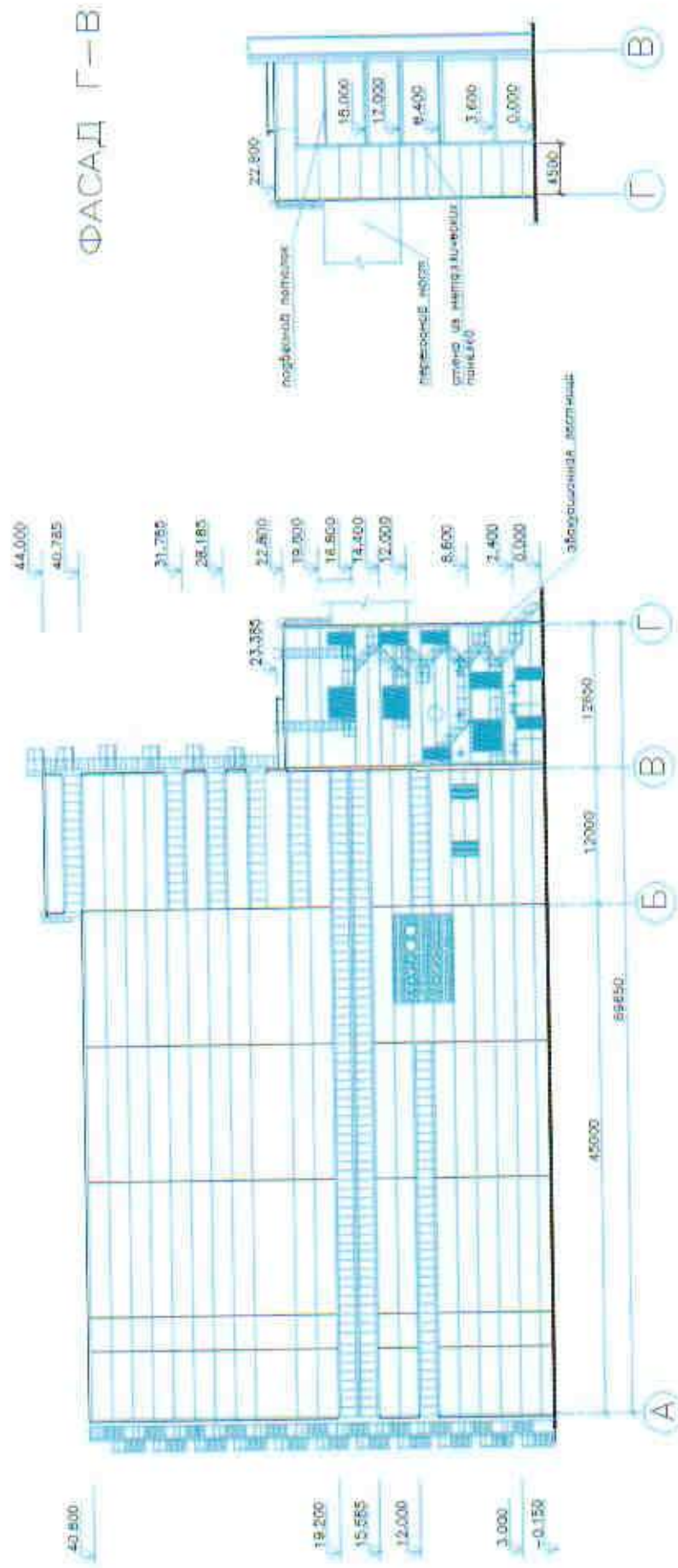


Рисунок 1.6 – Схема фасада машзала, деэракторного отделения и этажерки электротехнических устройств

Продольный разрез (Деаэрационное отделение)

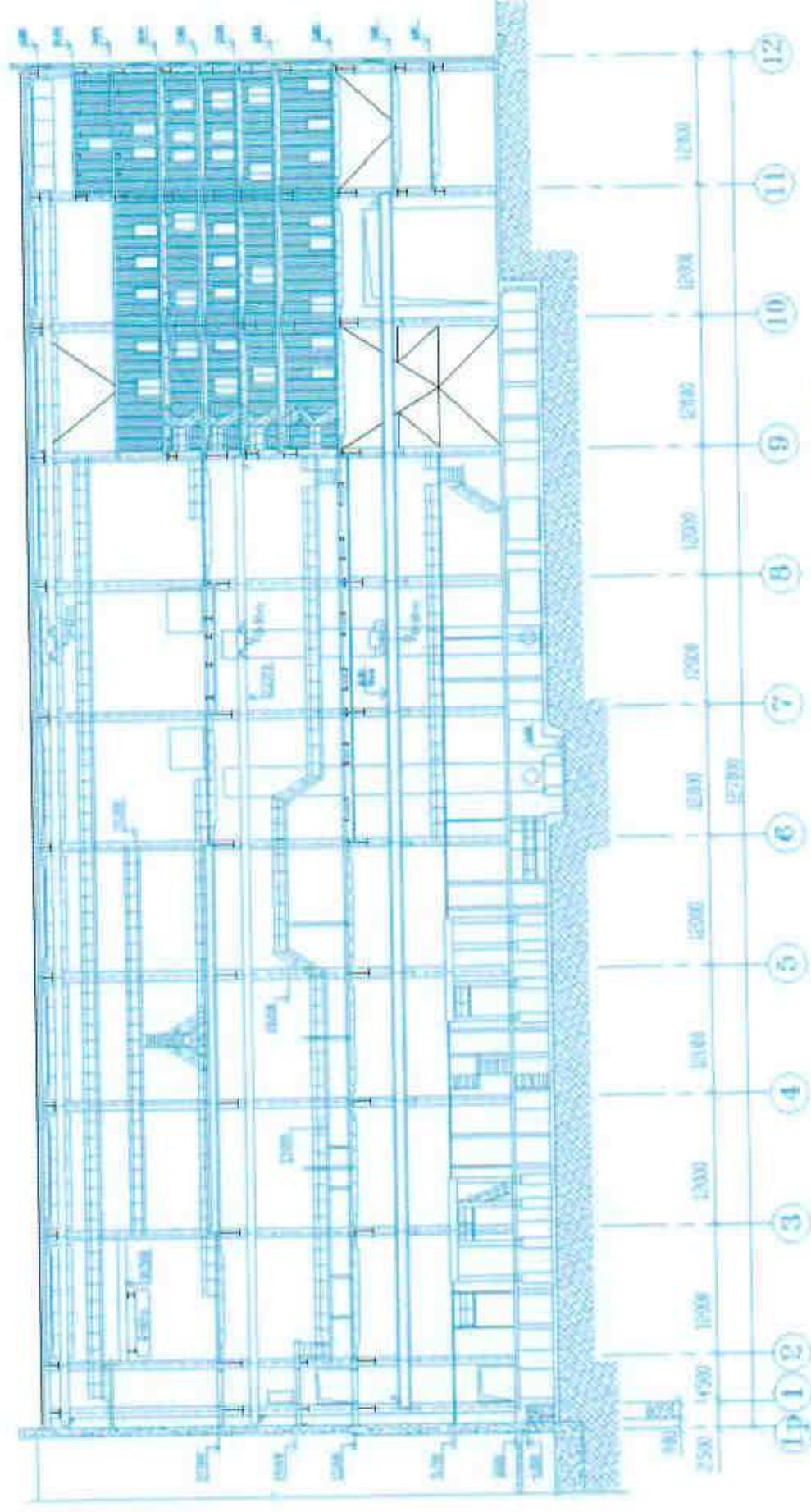


Рисунок 1.7 – Геометрии и основные размеры деаэрационного отделения

2 Расчет напряженно-деформированного состояния каркаса зданий машзала, ДО и ЭЭТУ от неравномерных осадок фундаментов колонн

Целью данного этапа работы расчет напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных зон каркаса машинного зала турбинного отделения, деаэрационного отделения (ДО) и этажерки электротехнических устройств (ЭЭТУ), образующихся в результате неравномерных осадок фундаментов колонн.

Наиболее интенсивные осадки наблюдались в первые годы строительства и эксплуатации. В настоящее время скорость осадок снизилась до нормативных значений и их накопление практически отсутствует. В 1992 году проведена реконструкция и укрепление каркаса машинного зала и ДО в связи с необходимостью восстановления поврежденных в результате интенсивных неравномерных осадок несущих колонн конструктивных элементов. В данной работе состояние каркаса на этот (1992) год принимается за исходное, от которого отсчитываются осадки, накопленные к настоящему времени.

Для определения наиболее нагруженных зон каркасов машзала, деаэрационного отделения и ЭЭТУ, возникающего вследствие неравномерной осадки фундаментов колонн проводилась оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) их несущих элементов. Расчет НДС проводился методом конечных элементов.

В соответствии с чертежной документацией по геометрии рассматриваемой конструкции, а также данных [1] разработана пространственная балочная конечноэлементная модель каркаса зданий – рисунок 2.1.

Конечные элементы, соответствующие конструктивным элементам с различными характеристиками поперечных сечений и/или свойствами материалов, имеют различные номера материалов и отмечены на рисунке 2.1 различными цветами. Нижние точки колонн, расположены на отметке 0.0 м. Каждая из колонн имеет три участка с различными характеристиками сечений: 1 – до отметки 16.0 м, 2 – до отметки 27 м, 3 – выше отметки 27м. Характеристики сечений колонн в осях А, Б и В различны, поэтому колоннам, расположенным на оси А, соответствуют номера материалов 1 – 3, колоннам, расположенным на оси Б, соответствуют номера материалов 4 – 6, колоннам, расположенным на оси В соответствуют номера материалов 7 – 9. Продольные балки

каркаса машзала имеют номера материалов 12,13,14, фермы перекрытий - номера материалов 10, 11, 15, 33. Поперечные балки перекрытий деаэрационной и ЭЭТУ имеют номера материалов 16,17,18,19 в зависимости от высоты расположения. Материал 20 – соответствует продольным балкам каркаса ЭЭТУ. Материалы с номерами 21 – 31 – моделируют стеновое и кровельное покрытие и на рисунке 2.1 не показаны.

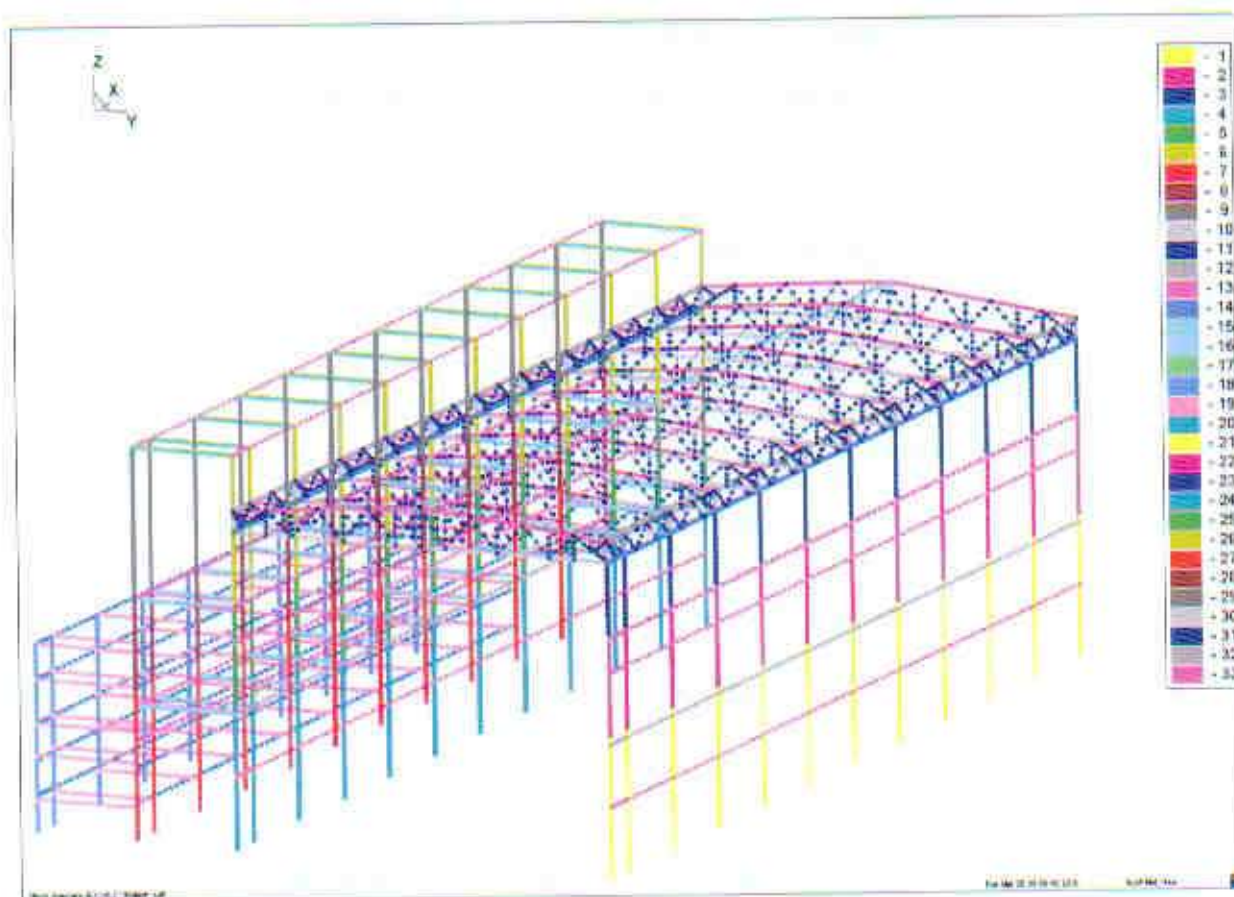


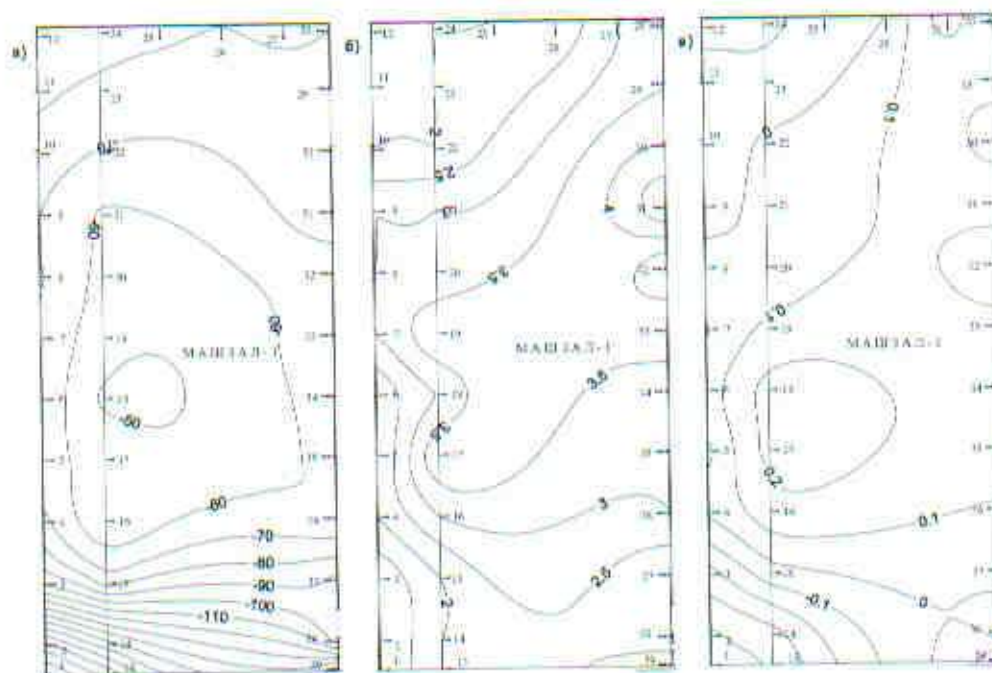
Рисунок 2.1 – Стержневая конечноэлементная модель каркаса машзала, деаэрационного отделения и ЭЭТУ

Жесткостные характеристики сечений конечных элементов, моделирующих колонны, продольные балки и фермы перекрытий (моменты инерции, площади и др.) задавались исходя из геометрических параметров поперечных сечений соответствующих элементов конструкций [1]. При проведении расчетов характеристик поперечных сечений

Наблюдение за осадками машинного зала и деаэрационного отделения

В таблице 2.2 по данным работы [2] приведены суммарные и текущие вертикальные смещения колонны машинного зала и деаэрационного отделения энергоблока № 1 по 39 стенным осадочным маркам, использовавшиеся в расчетах НДС несущего каркаса. В работе [2] сделан вывод, что за четырехлетний период эксплуатации с сентября 2005 года по сентябрь 2009 года каркас зданий существенных изменений в своей геометрии не претерпел. Анализ результатов измерений осадок колонн машинного зала и деаэрационного отделения, приведенных в таблице 2.2 показывает, что за указанный период осадки имели знакопеременный характер, в пределах точности измерений и приращение осадок составило не более 2 мм за этот период. Неравномерности осадок практически не наблюдается.

Для иллюстрации величин осадки, а также иллюстрации ее неравномерности, ниже (рисунок 2.2, рисунок 2.3) даны графики изолиний суммарных текущих вертикальных смещений и их скоростей и орфографическая проекция поверхности.



а) суммарное; б) текущее; в) скорость.

Рисунок 2.2 – График изолиний вертикальных смещений осадочных марок машинного зала и деаэрационного отделения энергоблока №1

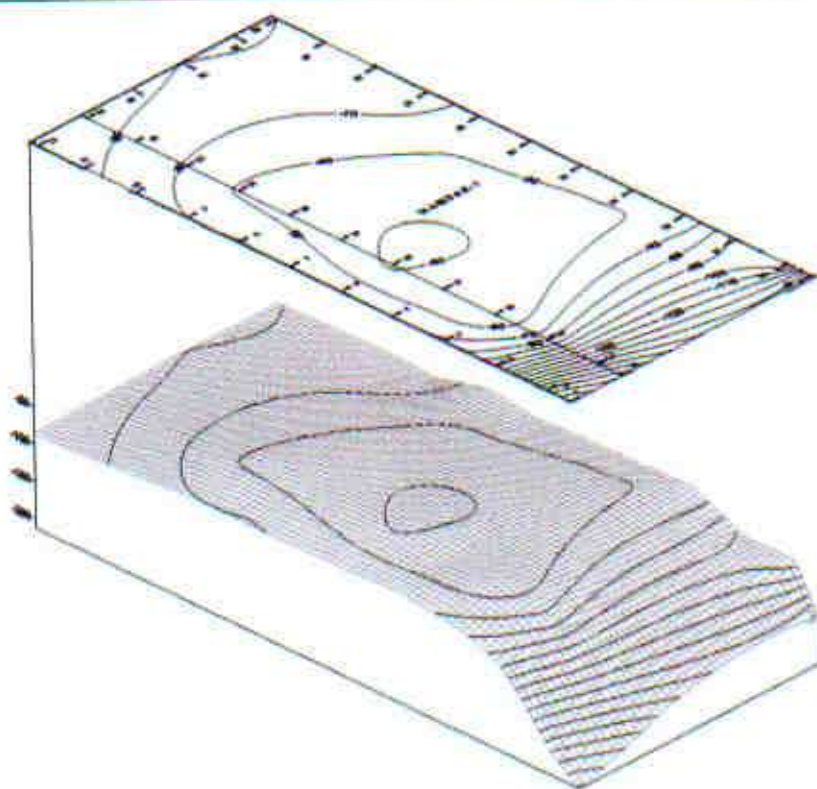


Рисунок 2.3 – Ортографическая проекция поверхности суммарных вертикальных смещений осадочных марок машинного зала и деаэрационного отделения энергоблока № 1 Балаковской АЭС

В таблице 2.3 представлены результаты измерений суммарных осадок колонн машинного зала и деаэрационного отделения № 1 Балаковской АЭС, полученные в 2011 г. В расчетах напряженно-деформированного состояния элементов несущего каркаса машинного зала учитывалось изменение осадок колонн, произошедшее за рассматриваемый период времени (с 1991 по 2011 г.г.), и приведенное в таблице 2.3. Для 12-ой, 29-ой и 37-ой колонны, для которых данные измерений отсутствуют, приняты средние значения осадок двух ближайших колонн.

Таблица 2.3 – Приращения суммарные осадок колонн машинного зала и деаэрационного отделения № 1 Балаковской АЭС за период 1991 г. – 2011 г.

Номера меток	Осадки 2011 г. мм	Осадки 1991 г. мм	Изменение осадок, 1991 – 2011 г., мм
1	-213,0	-206,0	-7
2	-184,0	-179,0	-5
3	-98,0	-97,0	-1
4	-74,0	-73,0	-1
5	-65,0	-65,0	0
6	-69,0	-69,0	0
7	-70,0	-71,0	+1
8	-72,0	-73,0	+1
9	-70,0	-72,0	+2
10	-79,0	-77,0	-2
11	-82,0	-83,0	+1
12	-81,0	-	0
13	-189,0	-181,0	-8
14	-156,0	-153,0	-3
15	-76,0	-77,0	+1
16	-54,0	-56,0	+2
17	-62,0	-61,0	-1
18	-50,0	-52,0	+2
19	-56,0	-58,0	+2
20	-60,0	-61,0	+1
21	-60,0	-62,0	+2
22	-69,0	-58,0	-11
23	-78,0	-80,0	+2
24	-82,0	-83,0	+1
25	-81,0	-83,0	+2
26	-79,0	-82,0	+3
27	-82,0	-81,0	-1
28	-80,0	-81,0	+1
29	-	-	+2
30	-77,0	-79,0	+2
31	-82,0	-81,0	-1
32	-62,0	-64,0	+2
33	-71,0	-71,0	0
34	-67,0	-66,0	-1
35	-65,0	-65,0	0
36	-62,0	-61,0	+1
37	-95,0	-	-1
38	-93,0	-90,0	-3
39	-158,0	-154,0	-4

На рисунке 2.4 показана нумерация оснований колонн, для которых задавались приращения осадок из таблицы 2.3.

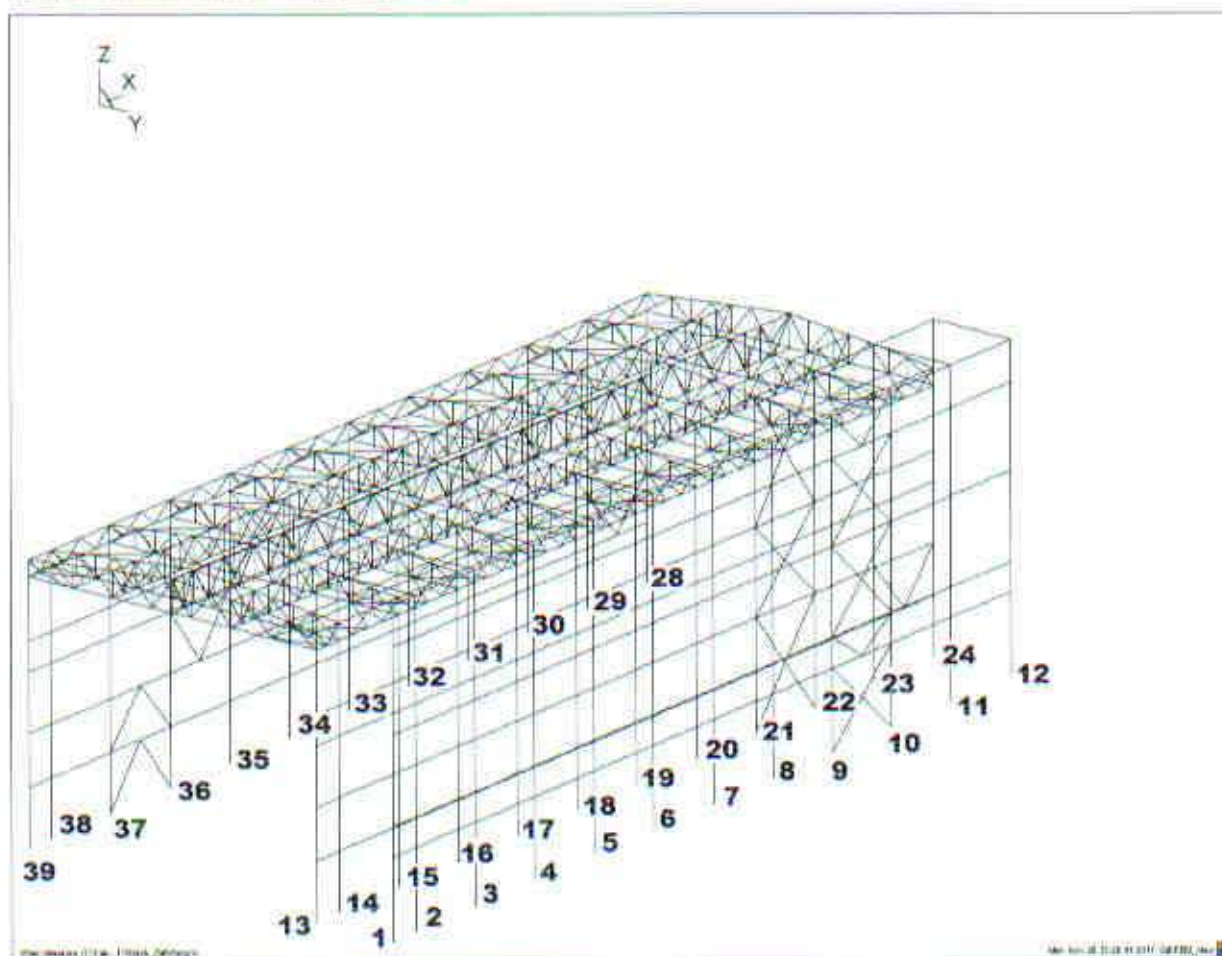


Рисунок 2.4 – Конечнoэлементная стержневая модель машинного зала и нумерация оснований колонн, для которых задавались осадки из таблицы 2.3

Наблюдение за осадками этажерки электротехнических устройств

Наблюдения начаты в мае 1990 года по 24 стенным осадочным маркам. В процессе эксплуатации марки уничтожались и восстанавливались. На настоящий момент уничтожены марки 1, 2, остальные осадочные марки наблюдались.

По величинам текущих вертикальных смещений был построен график средних суммарных вертикальных смещений этажерки электротехнических устройств (рисунок 2.5).

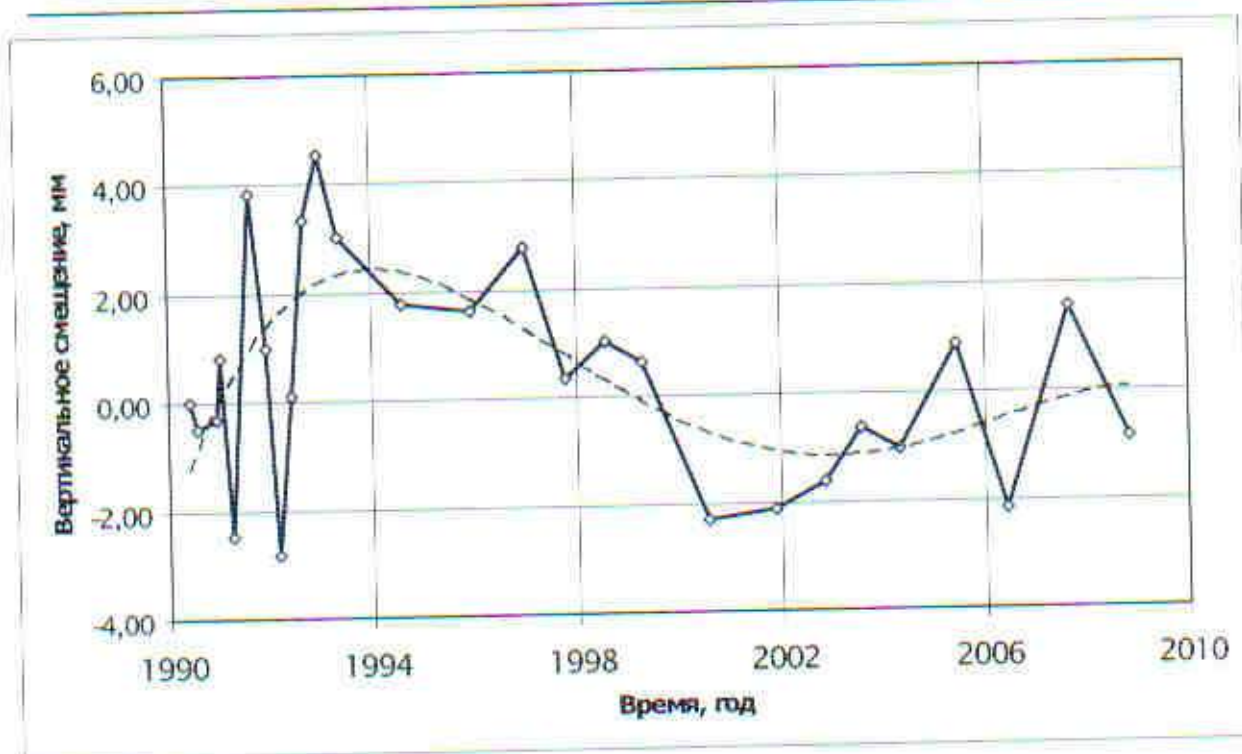


Рисунок 2.5 – График средних суммарных вертикальных смещений этажерки электротехнических устройств энергоблока №1 Балаковской АЭС

В таблицах 2.4 и 2.5 даны суммарные и текущие вертикальные смещения на этажерки электротехнических устройств и характеристики деформаций осадочных марок.

Таблица 2.4 – Ведомость суммарных и текущих вертикальных смещений и скоростей осадочных марок этажерки электротехнических устройств

Номер марки	Отметки по циклам измерений, мм			Вертикальное смещение, мм		Скорость, ноя.2001 окт.2008, мм/год
	Начальный цикл 14.05.1990	Цикл 26 22.08.2007	Цикл 27 14.10.2008	суммарное	текущее	
3	38051,00	38046,00	38044,00	-7,00	-2,00	-0,28
4	38011,00	38006,00	38004,00	-7,00	-2,00	-0,19
5	38303,00	38298,00	38297,00	-6,00	-1,00	0,01
6	38246,00	38242,00	38240,00	-6,00	-2,00	0,07
7	38026,00	38023,00	38021,00	-5,00	-2,00	-0,11
8	38256,00	38254,00	38252,00	-4,00	-2,00	0,07
9	38129,00	38128,00	38126,00	-3,00	-2,00	0,07
10	38487,00	38489,00	Закр.обор	2,00	-	0,32
11	38559,00	38562,00	38559,00	0,00	-3,00	0,31
12	38533,00	38536,00	38534,00	1,00	-2,00	0,30
13	38492,00	38496,00	38493,00	1,00	-3,00	0,40
14	38516,00	38520,00	38517,00	1,00	-3,00	0,42
15	38518,00	38520,00	38518,00	0,00	-2,00	0,22
16	38514,00	38517,00	38515,00	1,00	-2,00	0,32
17	38539,00	38543,00	38541,00	2,00	-2,00	0,50
18	38284,00	38286,00	Закр.обор	2,00	-	0,57
19	38528,00	38531,00	38528,00	0,00	-3,00	0,41
20	38250,00	38253,00	38250,00	0,00	-3,00	0,25
21	37987,00	37989,00	37986,00	-1,00	-3,00	0,39
22	38598,00	38602,00	38599,00	1,00	-3,00	0,43
23	38304,00	38307,00	38304,00	0,00	-3,00	0,35
24	38582,00	38584,00	38581,00	-1,00	-3,00	0,24

Таблица 2.5 – Характеристики деформаций осадочных марок этажерки электротехнических устройств

Параметр	Вертикальное смещение, мм			Скорость, мм/год		
	суммарное	марка	текущее	марка	по всем циклам	марка
максимальный	-7,00	3	-3,00	11	0,57	18
минимальный	2,00	17	-1,00	5	-0,28	3
средний	-1,32	-	-2,40	-	0,22	-

Характеристика деформаций сооружения. Средняя осадка сооружения носит неустойчивый во времени характер. Вертикальные смещения осадочных марок неравномерны по распространению.

На рисунке 2.6 показано деформированное состояние несущего металлического каркаса машзала, деаэрационного отделения и ЭЭТУ, полученное при задании вертикальных смещений нижних торцов колонн, в соответствии с данными о приращениях осадок (таблица 2.3). Масштаб перемещений узлов конечно-элементной модели равен 200. На рисунке представлены изометрическая и фронтальные проекции модели машзала и деаэрационного отделения, к координатам узлов которой добавлены значения смещений, умноженные на 200. В правой части рисунка содержится таблица со значениями шкалы вертикальных смещений узлов модели. Максимальное значение смещения составляет - 0.011 м, что соответствует максимальному значению приращений осадок колонн в таблице 2.3 – метка №22.

На рисунках 2.7 – 2.9 представлены графики компонентов вертикальных смещений по длине продольных балок (материал №13), расположенных в рядах А – на отметке 8,0 м, Б – на отметке 8,0 м, В – на отметке 11,0 м. На каждом из вышеназванных графиков представлена ломанная линия с острыми углами, соответствующая приращениям осадок колонн (нижние торцы колонн в модели), и график со сглаженными вершинами, соответствующий смещениям продольной балки, расположенной выше опоры.

На рисунках 2.10 – 2.12 представлены графики компонентов вертикальных смещений по длине продольных балок (материал №13), расположенных в ряду А – на отметках 15, 23, 27, 35,5 м, в ряду Б – на отметках 15, 23, 27, 44 м, в ряду В – на отметках 23, 27, 39, 44 м. Графики вдоль каждой из линий колонн накладываются один на другой, в основном повторяют заданные значения осадок оснований колонн, однако, чем выше расположена горизонтальная балка, тем более гладкой становится кривая ее прогибов, и, тем меньший уровень напряжений можно ожидать в выше расположенных балках, чем в нижних балках.

На рисунке 2.13 представлен график компонентов вертикальных смещений по длине коньковой балки, соединяющей верхние точки поперечных ферм кровли, установленных между рядами колонн А и Б. Приведенный график показывает, что вертикальные смещения коньковой балки оказываются существенно ниже, чем максимальные осадки опор и соответствуют средним значениям осадок.

По полученным перемещениям были рассчитаны напряжения в конструктивных элементах каркаса и определены зоны с максимальными значениями напряжений.

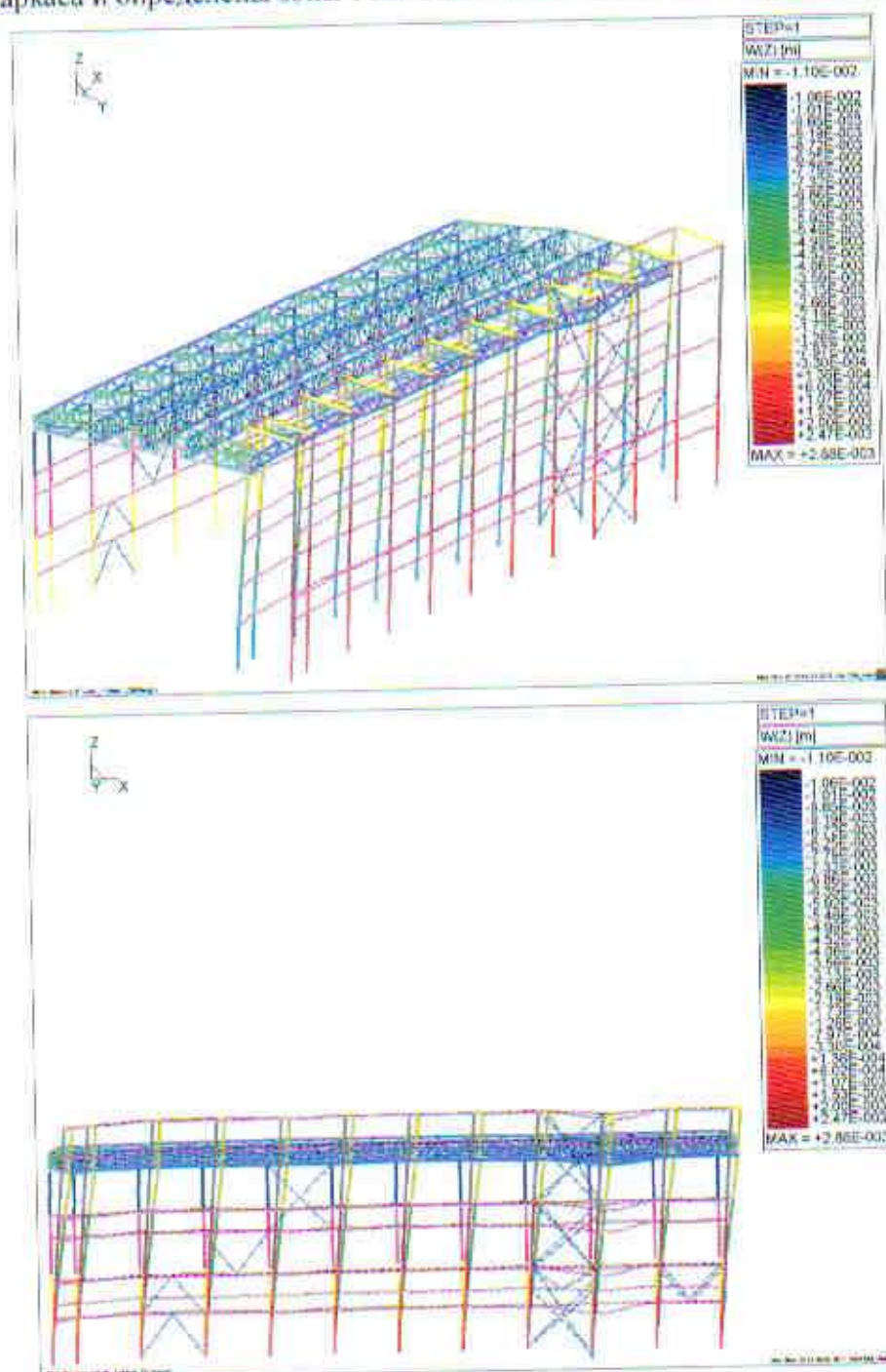


Рисунок 2.6 – Деформированное состояние машзала, деаэрационного отделения от
неравномерной осадки оснований колонн каркаса (масштаб перемещений 200)

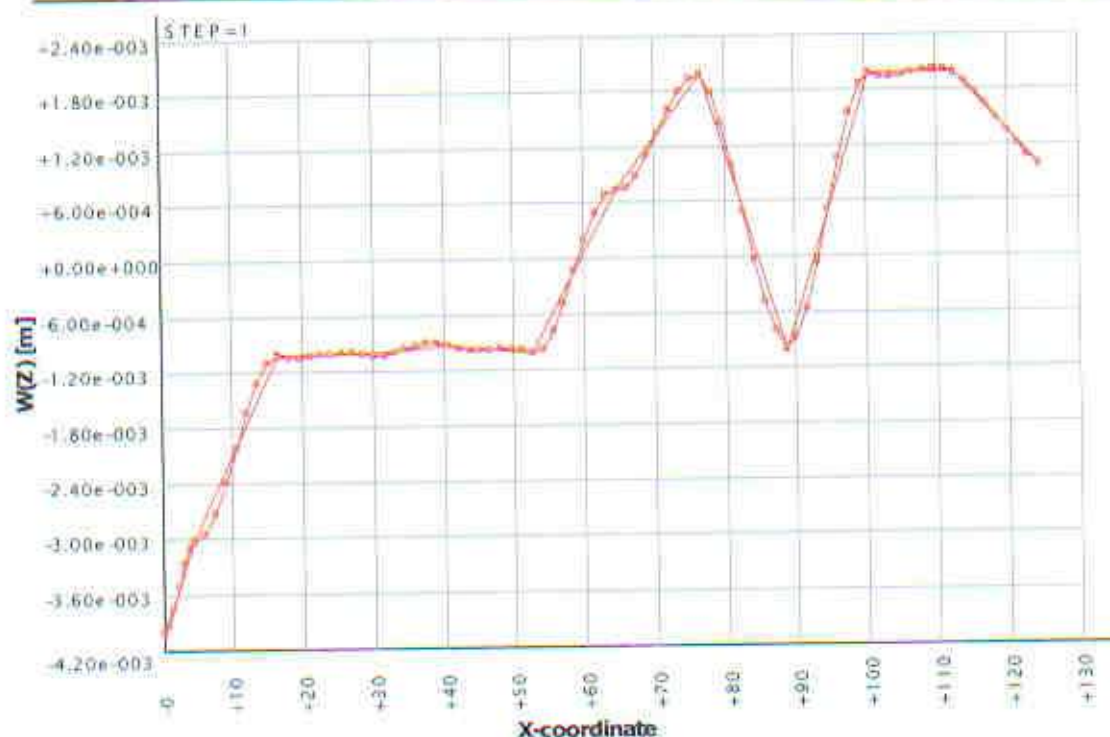


Рисунок 2.7 – График вертикальных смещений продольной горизонтальной балки в ряду А
на отметке $Z = 8$ м.

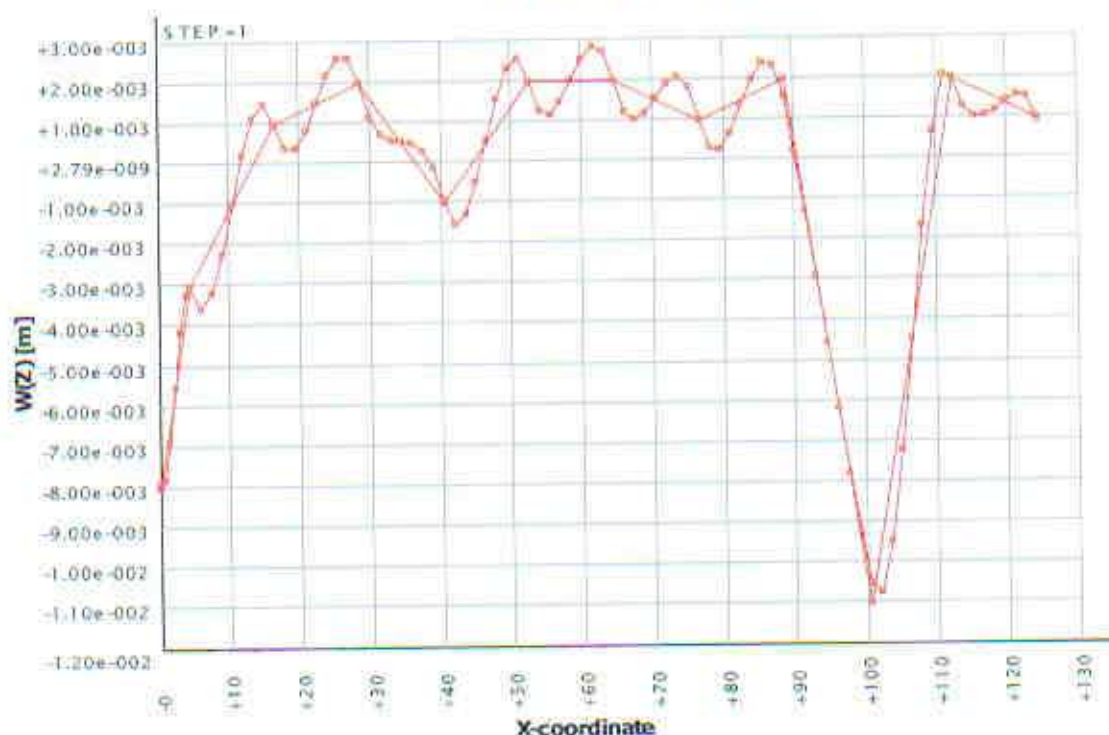


Рисунок 2.8 – График вертикальных смещений продольной горизонтальной балки в ряду Б
на отметке $Z = 8$ м.

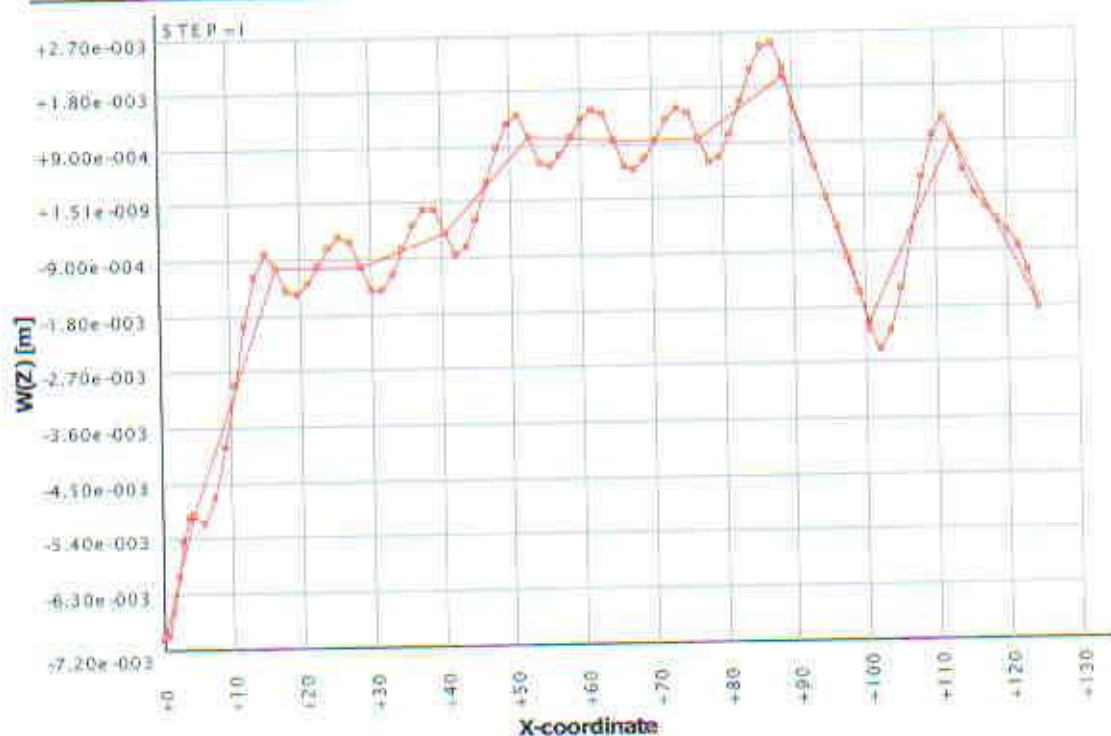


Рисунок 2.9 – График вертикальных смещений продольной горизонтальной балки в ряду В на отметке Z=11 м

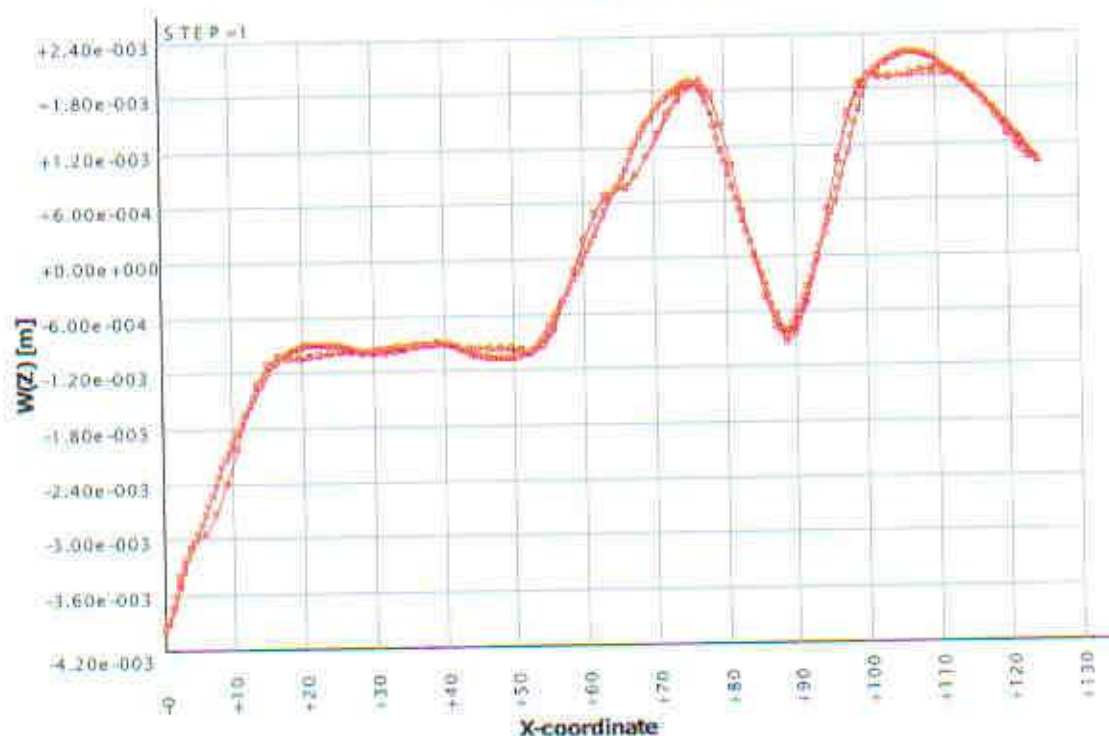


Рисунок 2.10 – График вертикальных смещений продольной горизонтальной балки в ряду А на отметках Z=15, 23, 27, 35,5 м

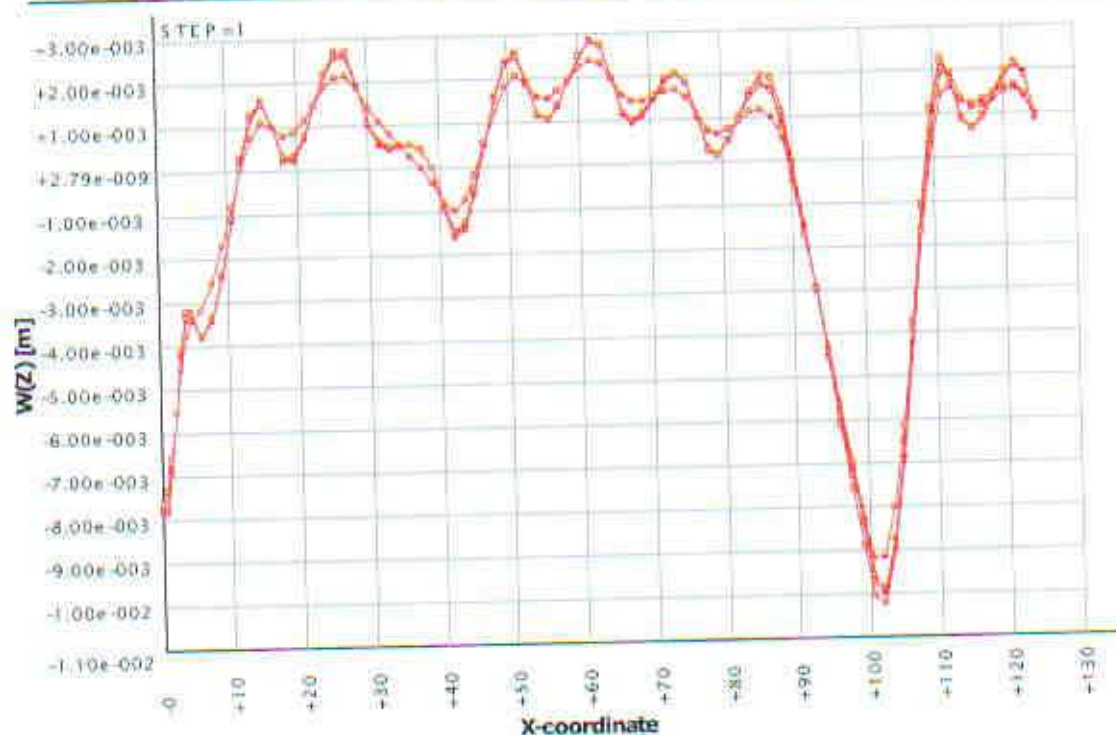


Рисунок 2.11 – График вертикальных смещений продольной горизонтальной балки в ряду
Б на отметках Z=15, 23, 27, 44 м

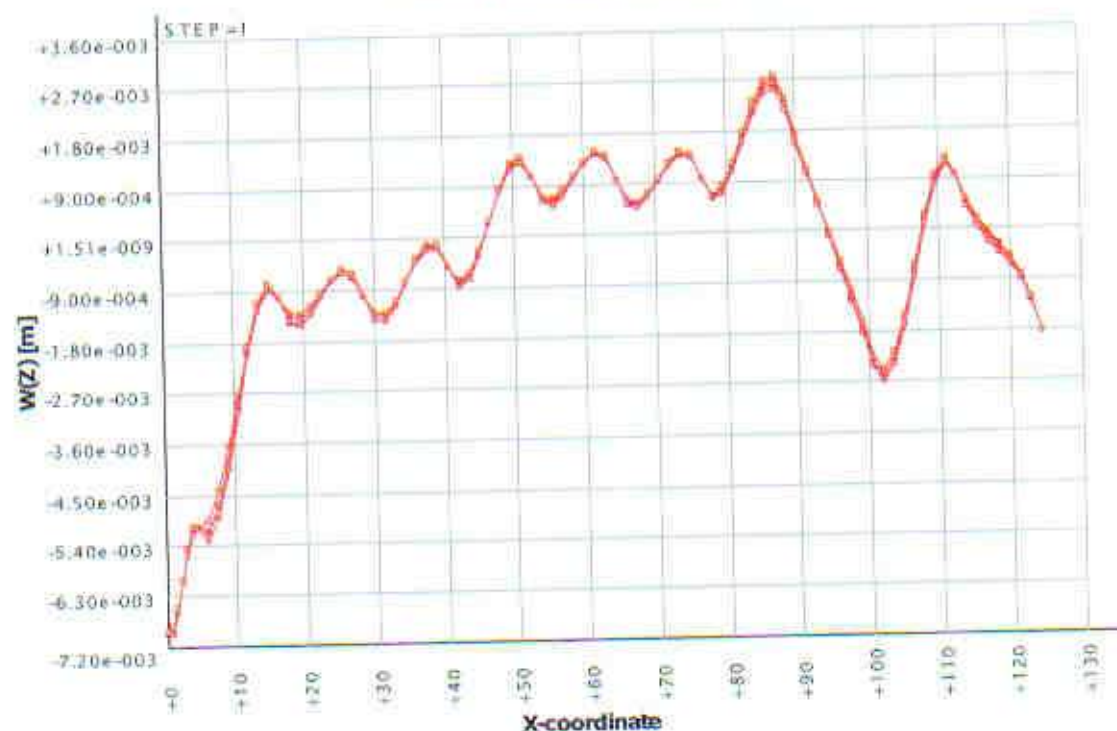


Рисунок 2.12 – График вертикальных смещений продольной горизонтальной балки в ряду
В на отметках Z= на отметках Z=15, 27, 39, 44 м

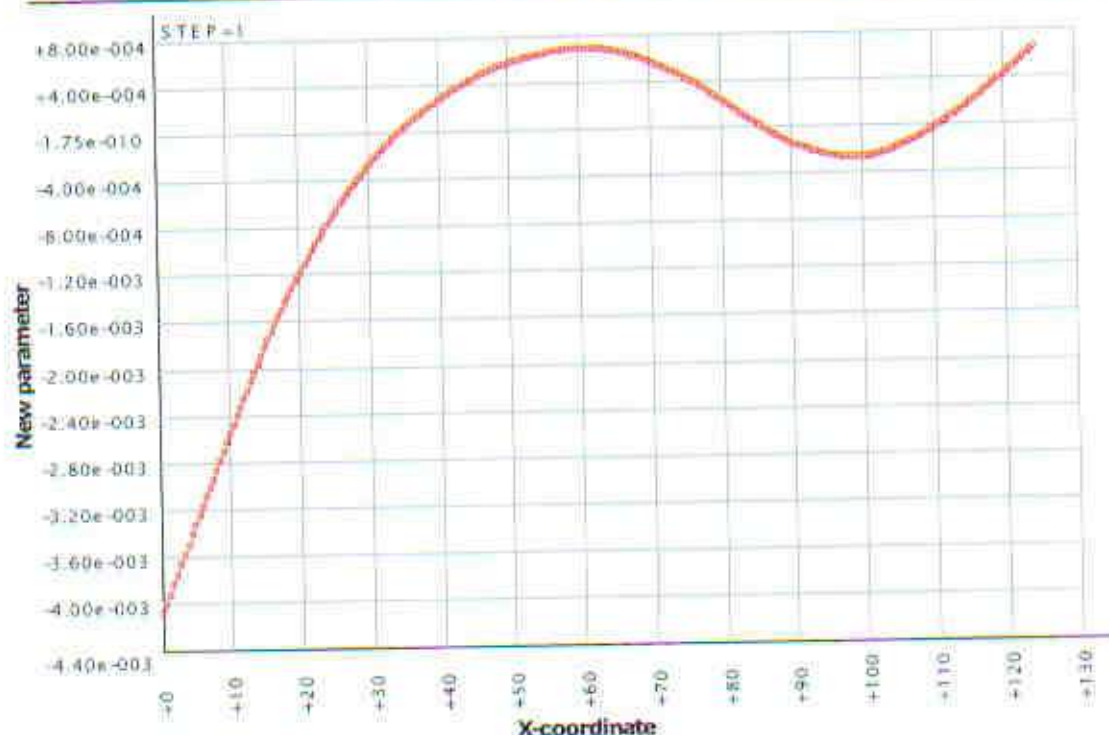


Рисунок 2.13 – График вертикальных смещений продольной горизонтальной коньковой балки, соединяющей верхние точки (конек) поперечных ферм кровли, установленных между рядами колонн А и Б

На рисунке 2.14 – 2.17 представлены графики компонентов напряжений (S1 – напряжения растяжения-сжатия, S2, S3 – полные напряжения – растяжение-сжатие + изгиб) в продольных балках в ряду А на отметках 8, 15, 24 и 27 м. соответственно.

Аналогичная информация приведена на рисунках 2.18 – 2.22 для продольных балок в ряду Б на отметках 8, 15, 23, 27 и 44 м, на рисунках 2.23 - 2.27 - для продольных балок в ряду В на отметке 11, 15, 27, 39, 44 м. Значения напряжений выведены в МПа.

Следует отметить, что наиболее нагруженными зонами продольных балок являются зоны в рядах А, Б, В, вблизи торца короткого крайнего пролета, в котором приращение осадки колонн имеет значение -0.007 м - -0.008 м. Наибольшие уровни напряжений в этой зоне имеют место в ряду Б составляют ± 62 МПа. Следует иметь в виду, что напряжения в продольных балках зависят не только от абсолютных вертикальных смещений отдельных колонн, но и от их относительного смещения. То есть, если будут заданы одинаковые вертикальные смещения колонн в ряду, это не приведет к появлению напряжений в продольных балках. На графиках напряжений в продольных балках ряда Б можно также

видеть всплеск напряжений в зоне $X = 100 - 110$ м, что объясняется приращением осадки основания колонн в этой зоне равным 0,011 м. Уровень напряжений не столь высок, как в крайних секциях, из-за наличия в пролетах раскосов, существенно разгружающих основные несущие балки.

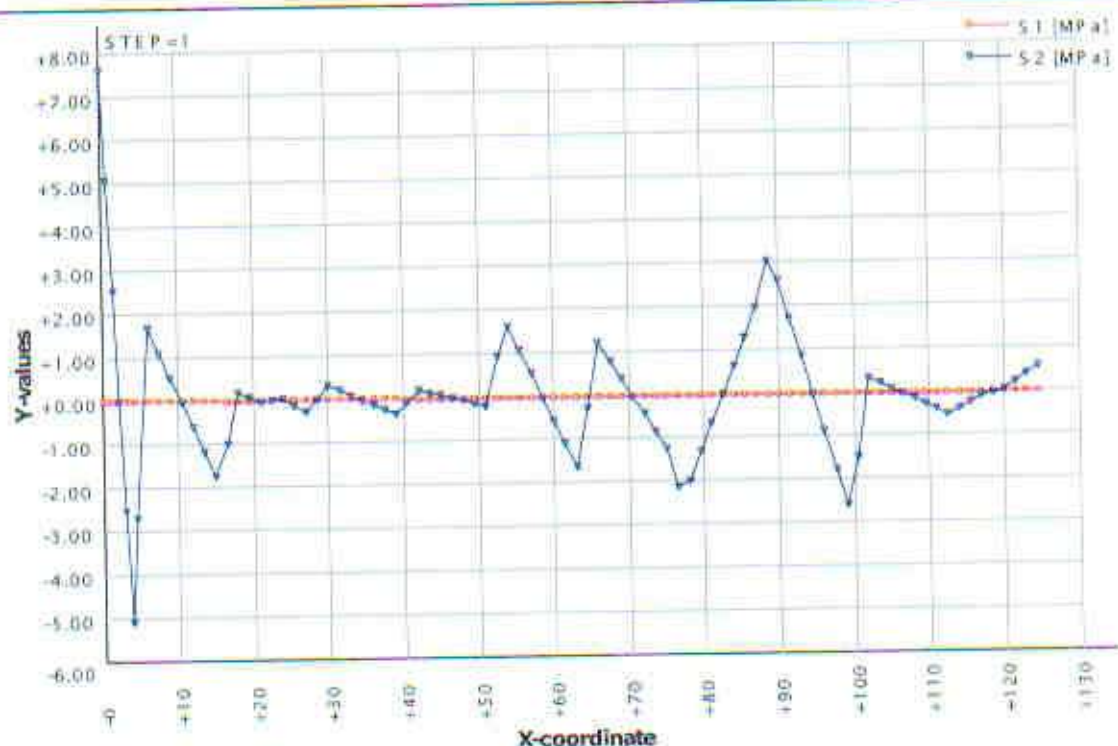


Рисунок 2.14 – Графики компонентов напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду А на отметке $Z=8$ м

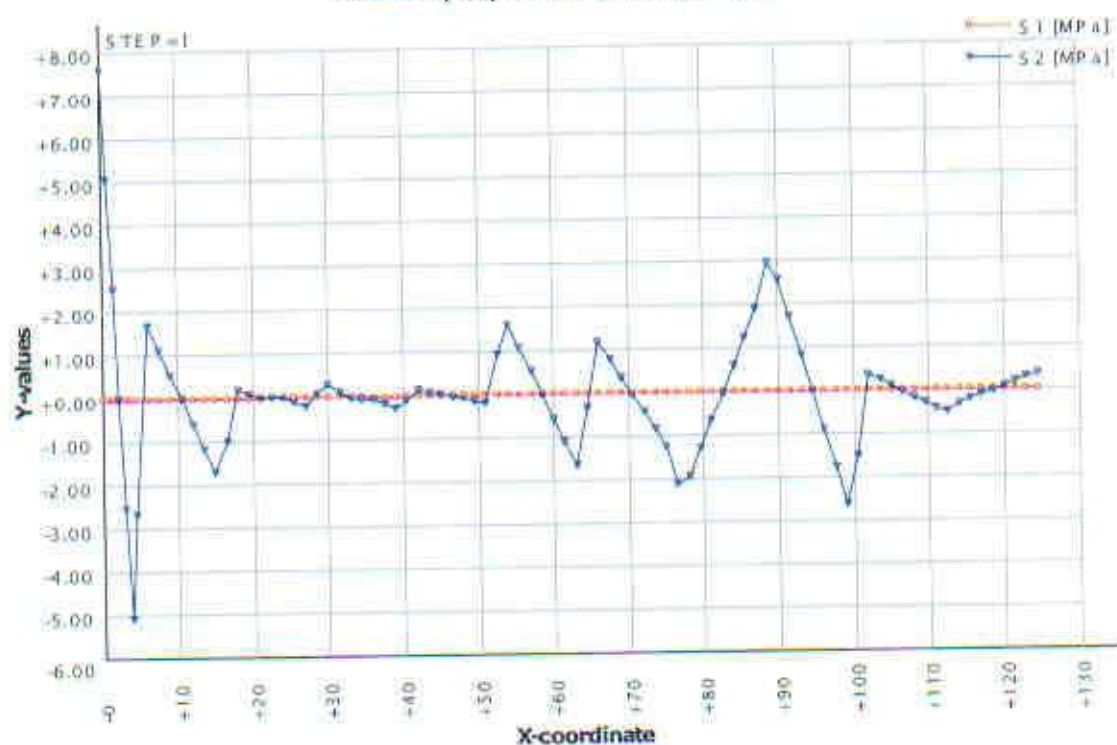


Рисунок 2.15 – Графики компонентов напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду А на отметке $Z=15$ м

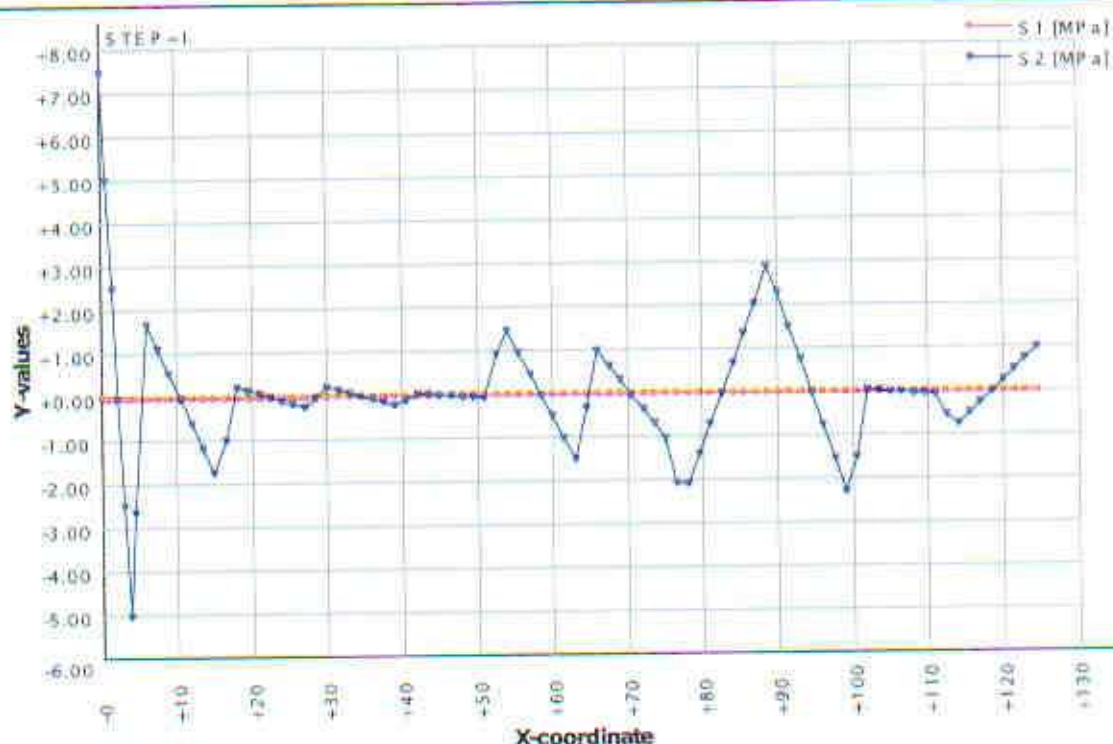


Рисунок 2.16 – Графики компонент напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду А на отметке $Z=23$ м

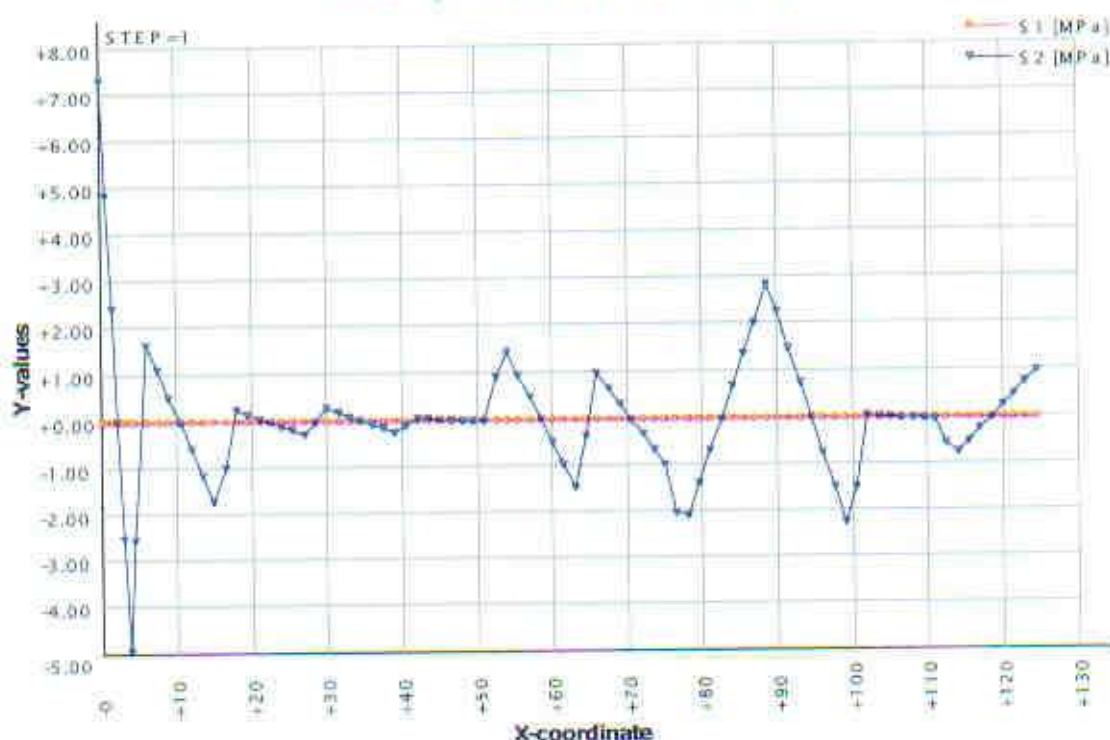


Рисунок 2.17 – Графики компонент напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду А на отметке $Z=27$ м

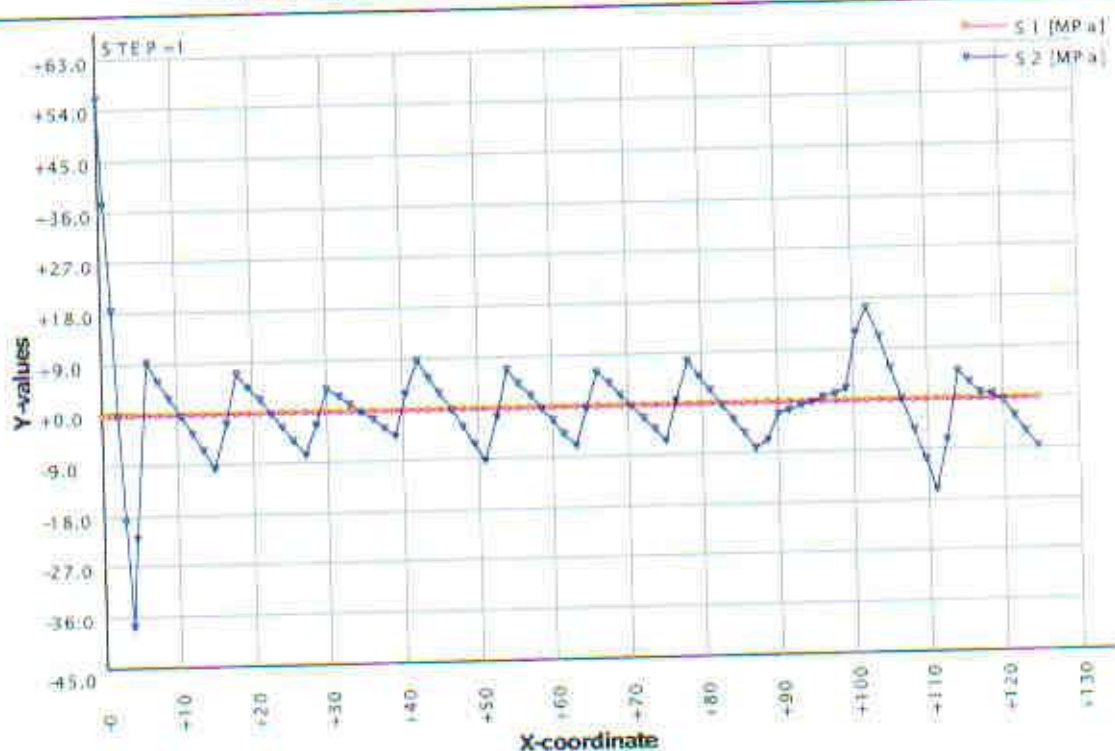


Рисунок 2.18 – Графики компонентов напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду Б на отметке Z = 8 м

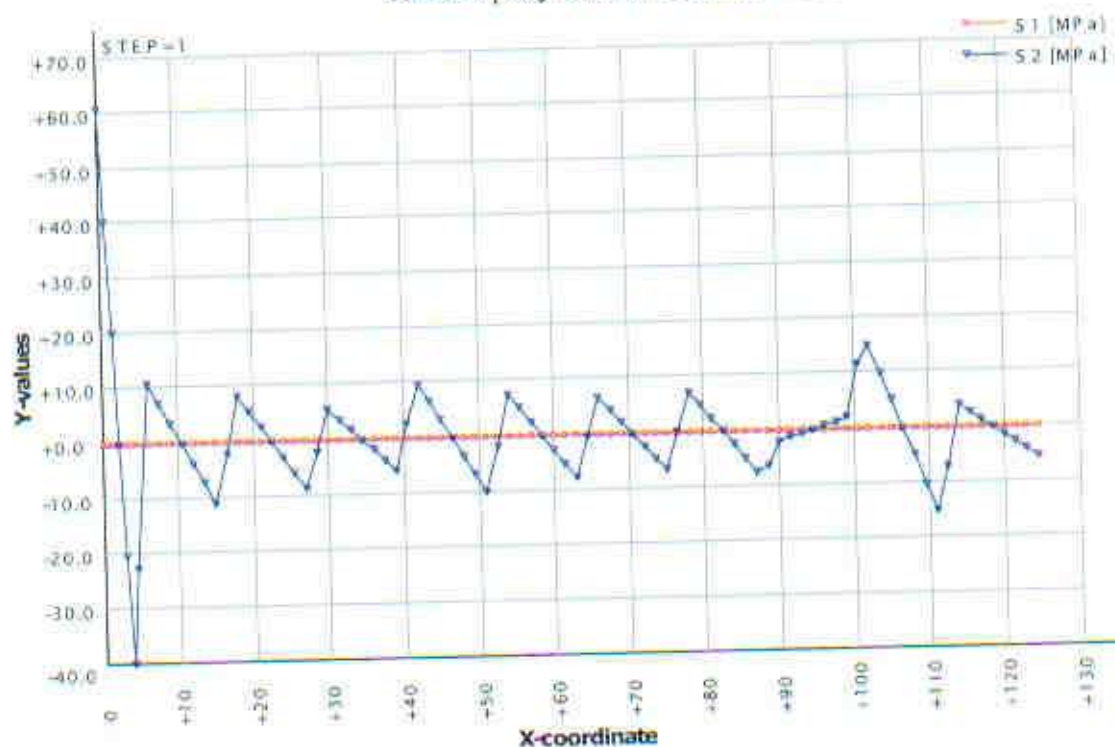


Рисунок 2.19 – Графики компонентов напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду Б на отметке Z=15 м

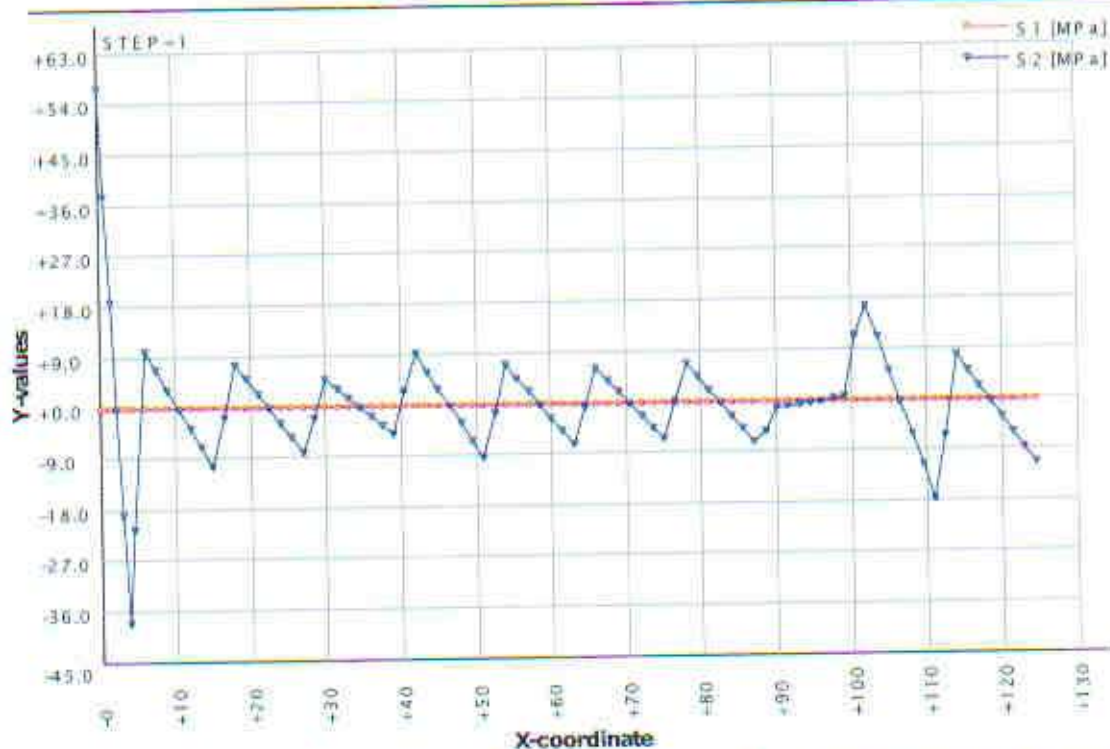


Рисунок 2.20 – Графики компонент напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду Б на отметке Z=23 м

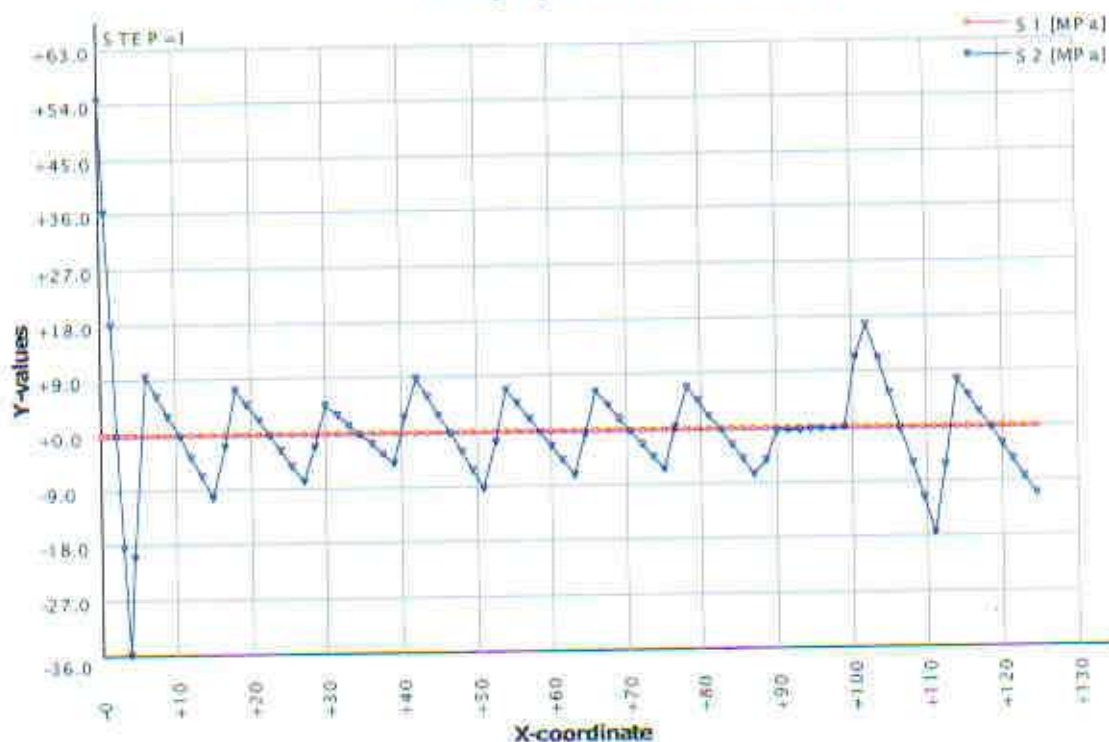


Рисунок 2.21 – Графики компонент напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду Б на отметке Z=27 м

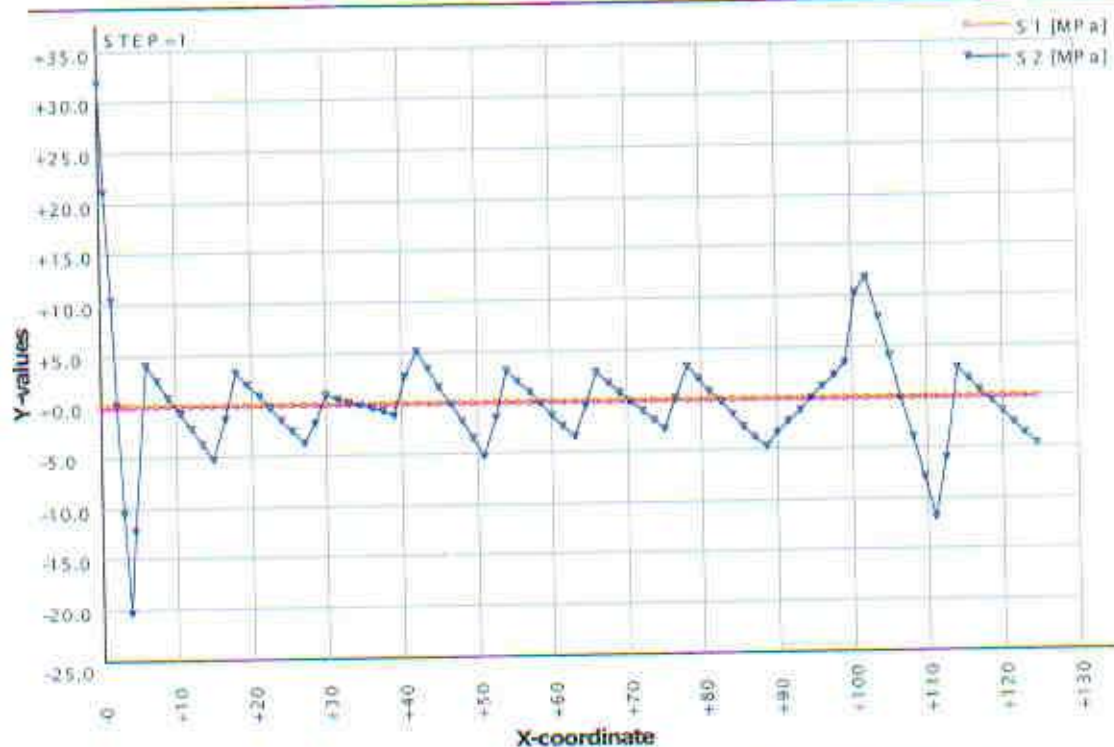


Рисунок 2.22 – Графики компонент напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду Б на отметке $Z=44$ м

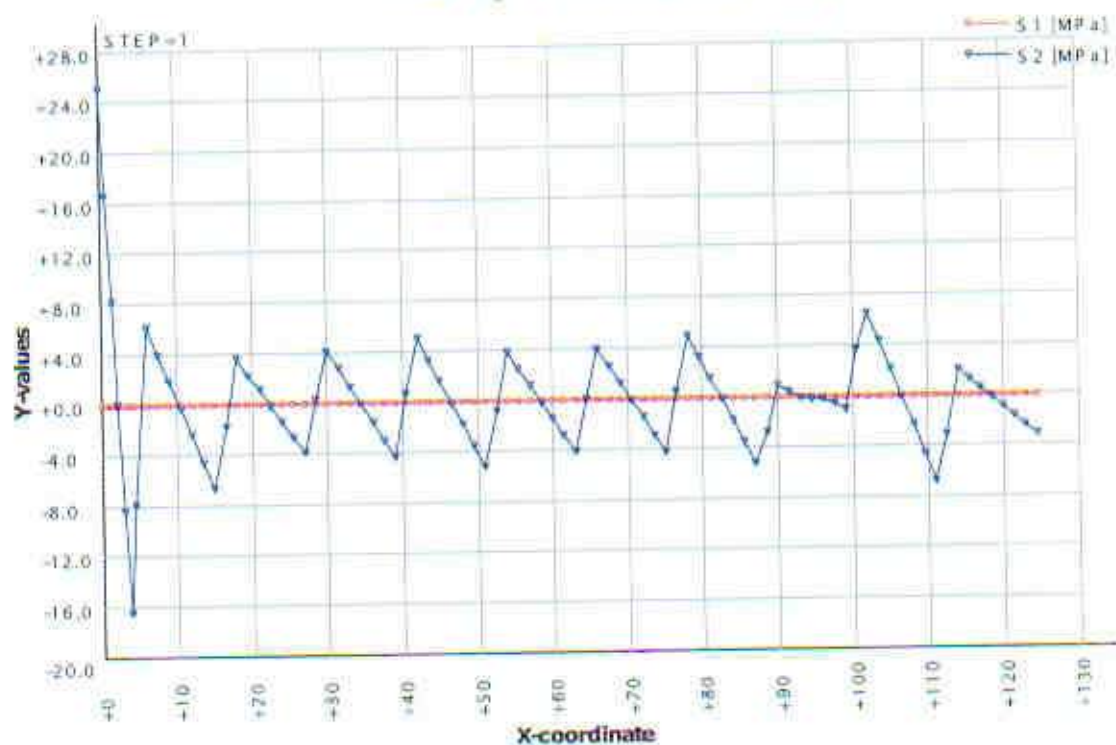


Рисунок 2.23 – Графики компонент напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду В на отметке $Z=11$ м

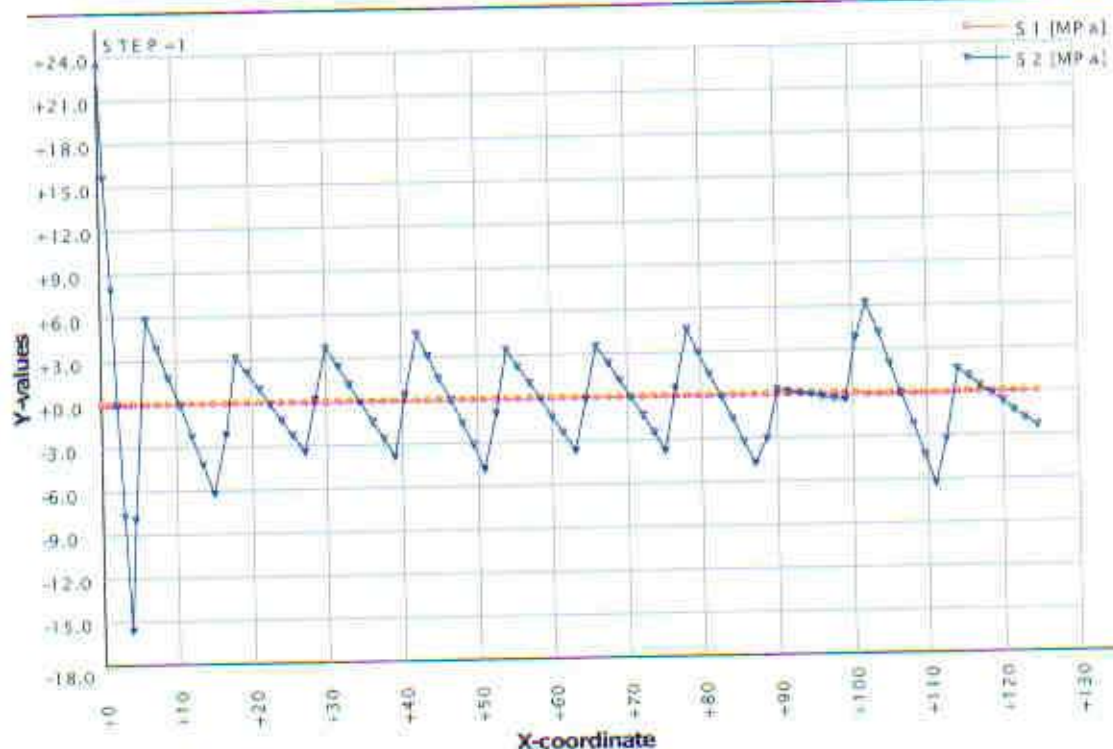


Рисунок 2.24 – Графики компонент напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду В на отметке $Z=15$ м

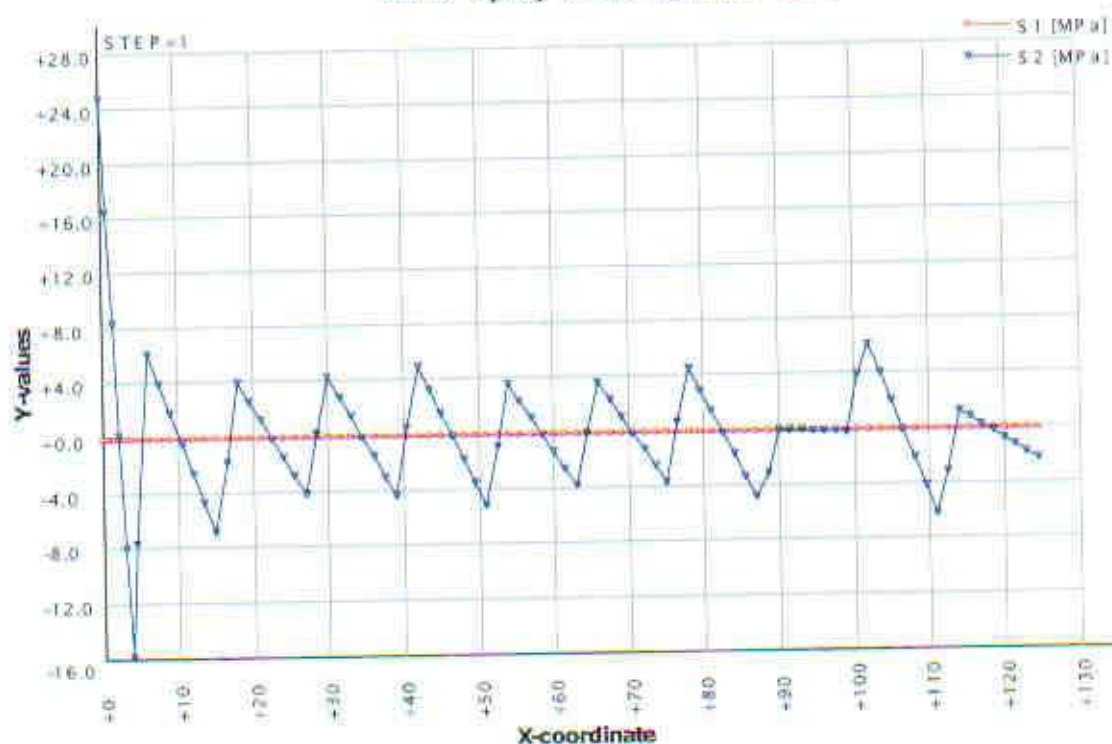


Рисунок 2.25 – Графики компонент напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду В на отметке 27 м

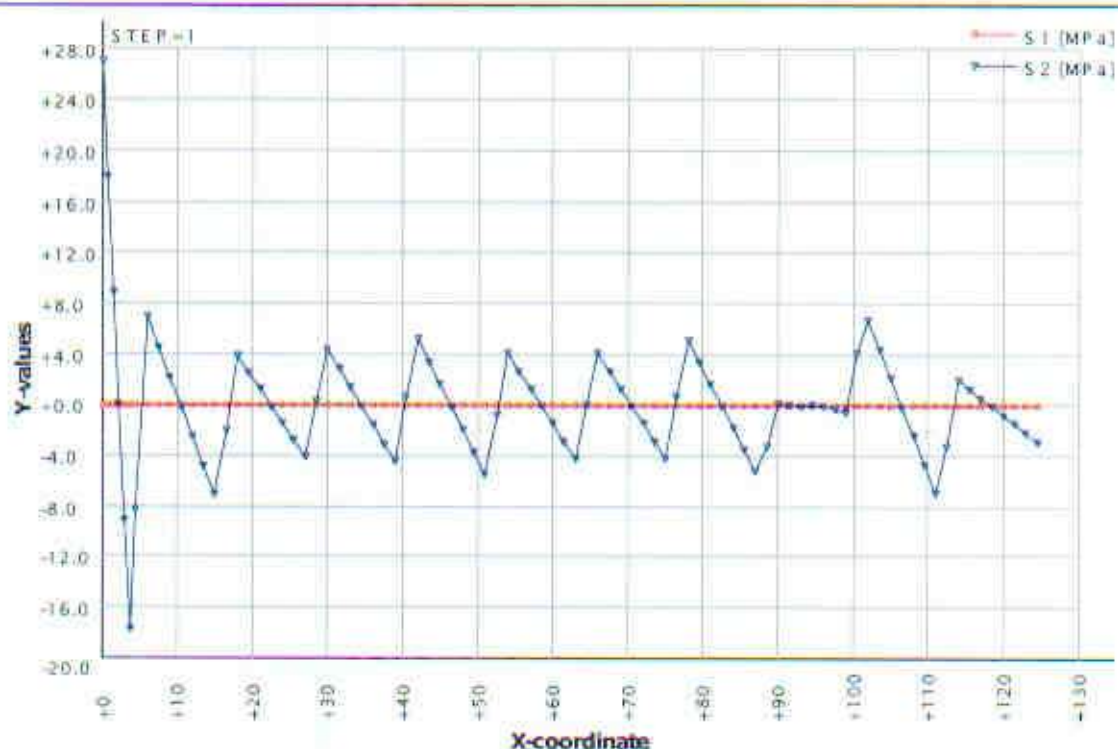


Рисунок 2.26 – Графики компонентов напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду В на отметке 39 м

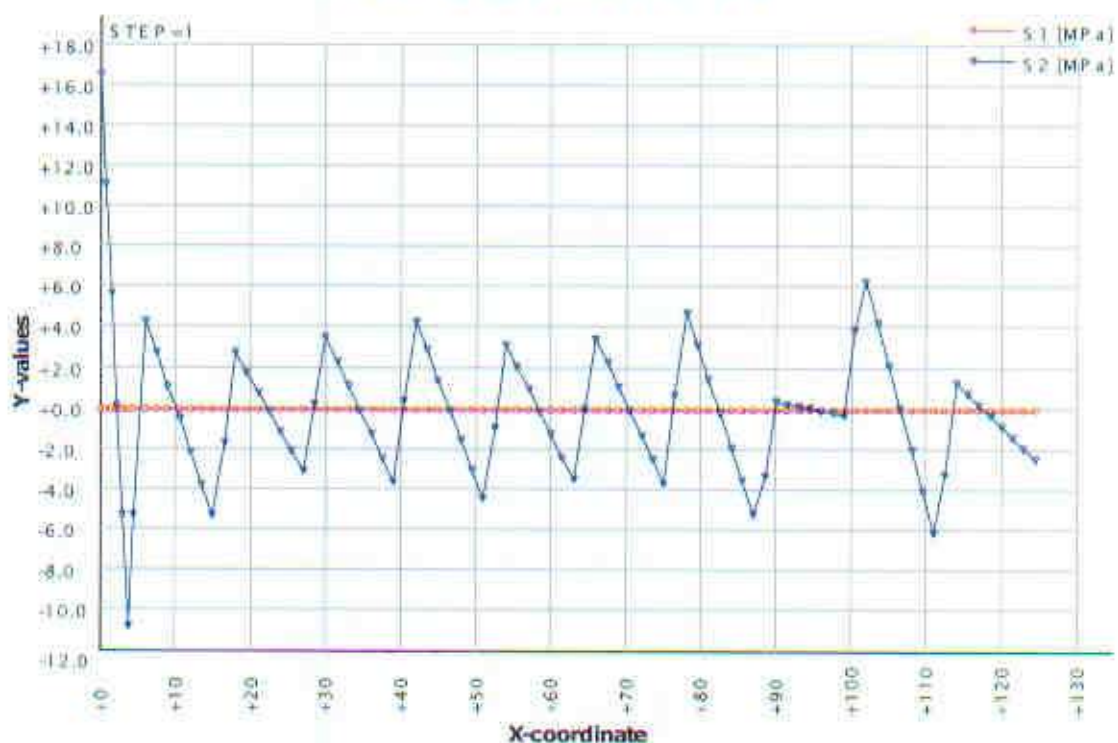


Рисунок 2.27 – Графики компонентов напряжений [МПа] в продольной горизонтальной балке в ряду В на отметке 44 м

На рисунках 2.28 – 2.38 приведены графики распределения напряжений в вертикальных колоннах каркаса зданий машзала и деаэрационной. Для каждого ряда колонн А, Б, и В графики построены для трех первых колонн из ряда, находящихся в зонах наибольших приращений осадки основания колонн (№1,2,3 – ряд А, №13, 14, 15 – ряд Б, №37, 38, 39 – ряд В – нумерация принята согласно рисунку 2.4), а для ряда Б также в 2-х колоннах (№21 и №22 на рисунке 2.4), в которых также наблюдается значительный уровень приращения осадок.

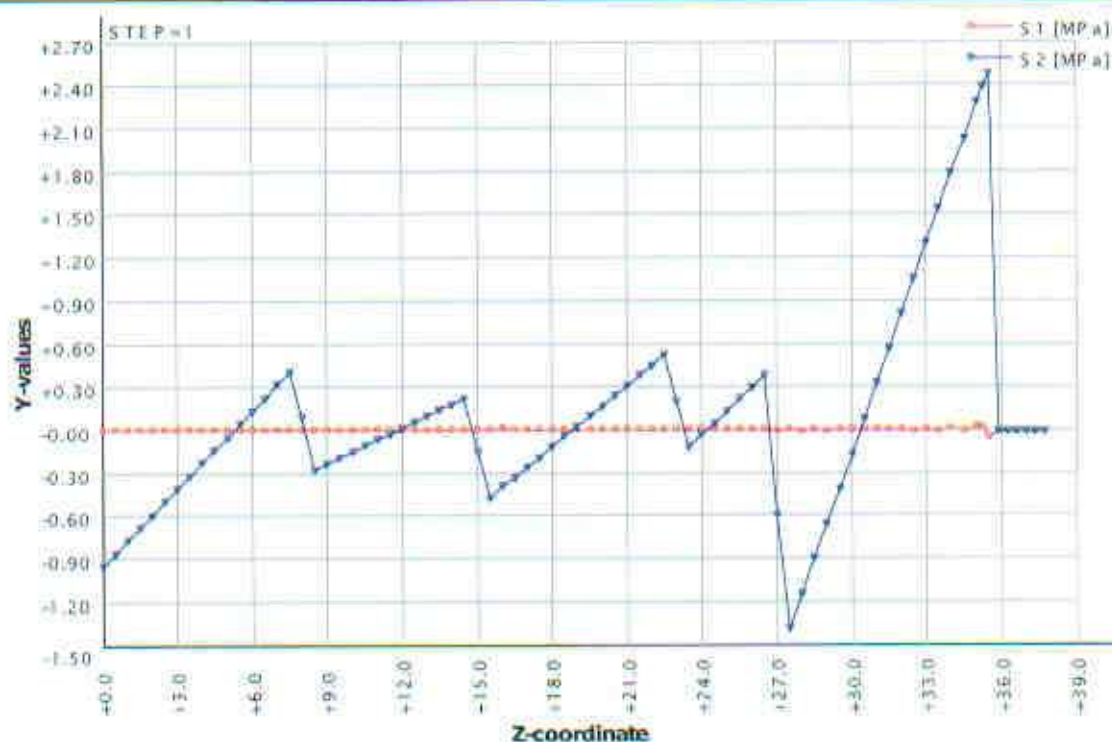


Рисунок 2.28 – Графики распределения компонентов напряжений [МПа] по высоте колонны №1 в ряду А

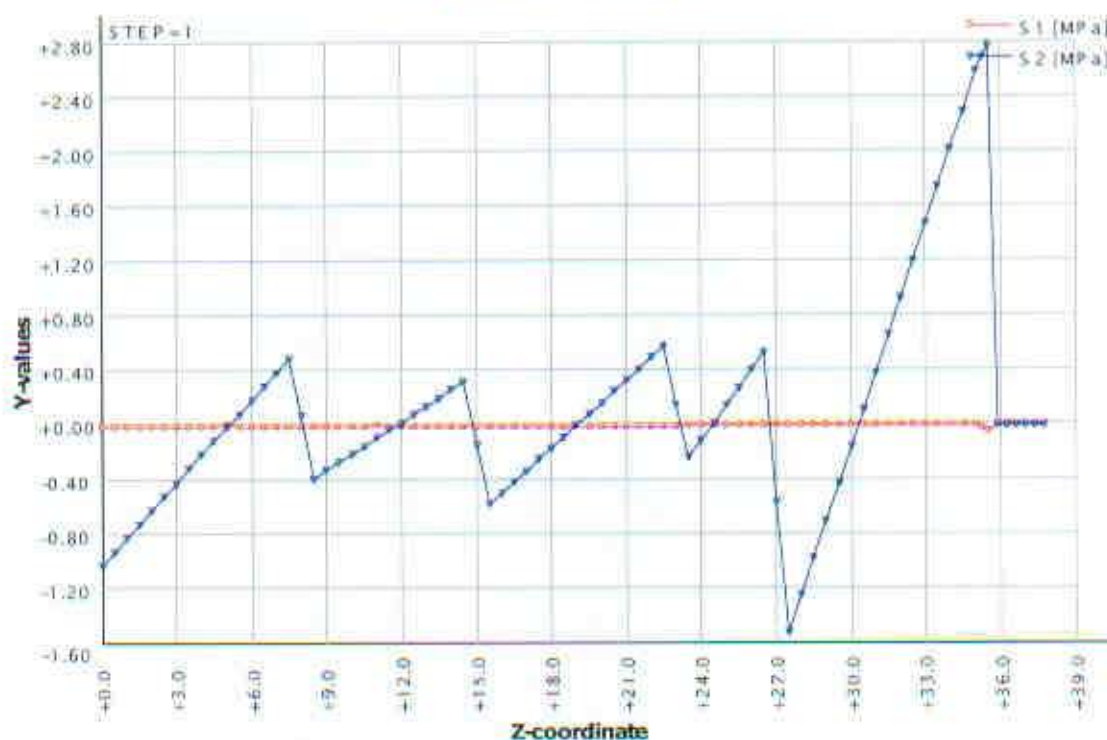


Рисунок 2.29 – Графики распределения компонентов напряжений [МПа] по высоте колонны №2 в ряду А

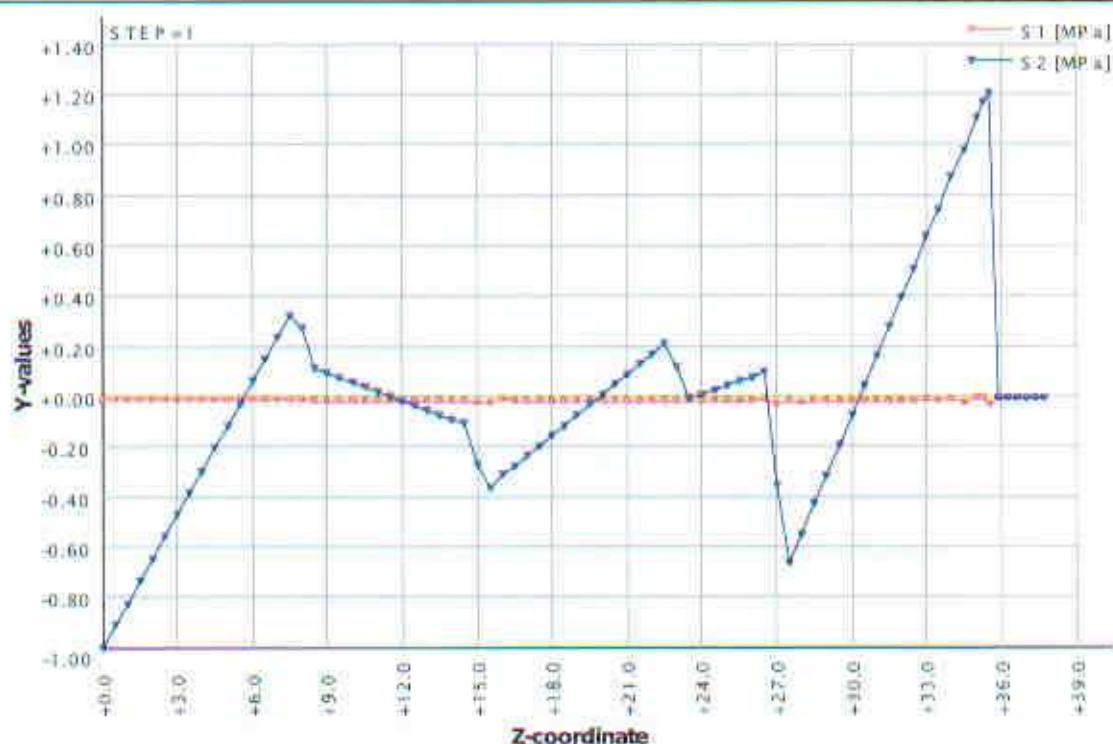


Рисунок 2.30 – Графики распределения компонентов напряжений [МПа] по высоте колонны № 3 в ряду А

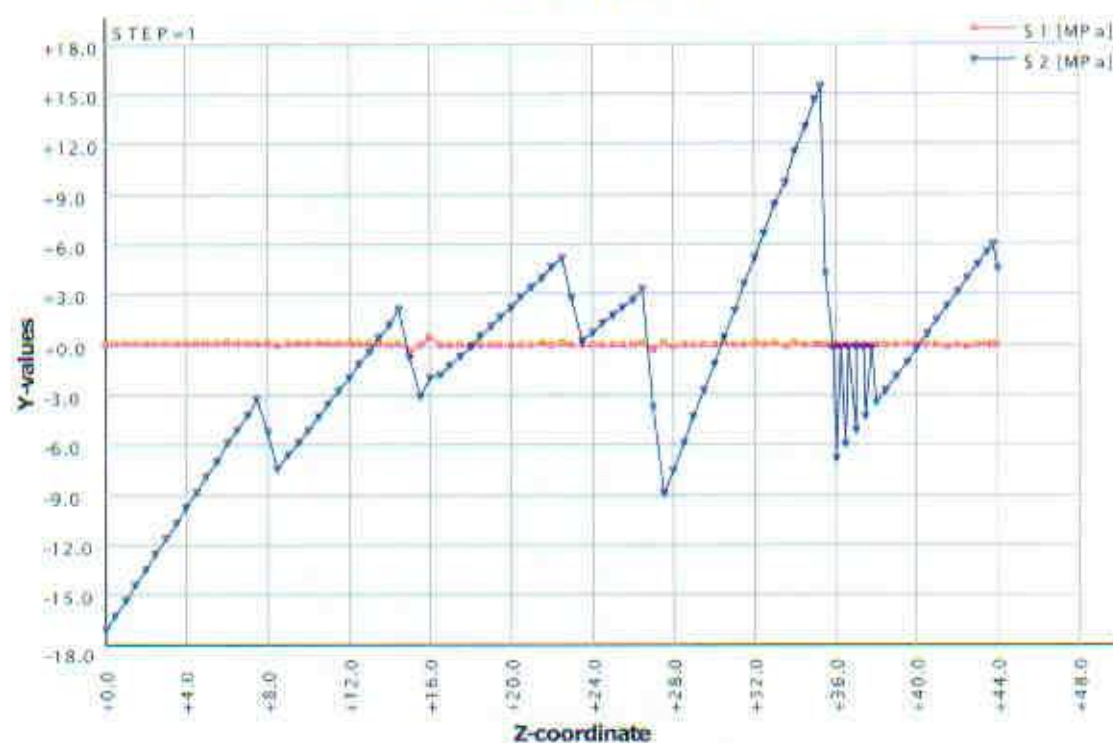


Рисунок 2.31 – Графики распределения компонентов напряжений [МПа] по высоте колонны № 13 в ряду Б

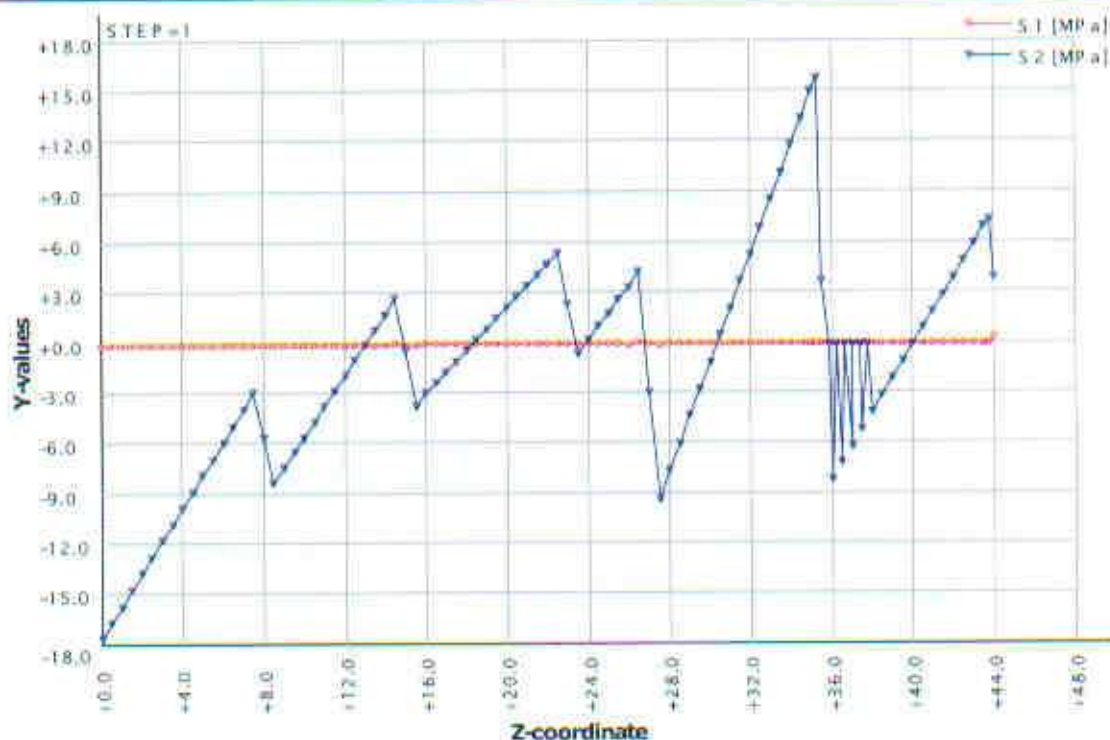


Рисунок 2.32– Графики распределения компонентов напряжений [МПа] по высоте колонны № 14 в ряду Б

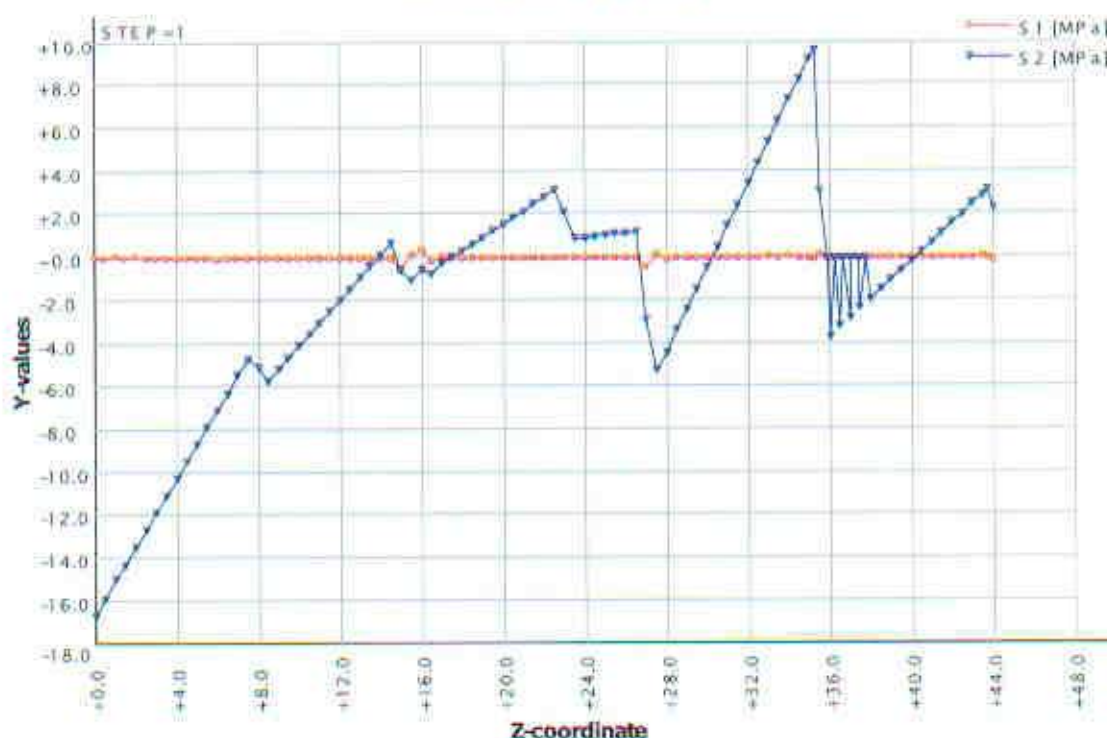


Рисунок 2.33 – Графики распределения компонентов напряжений [МПа] по высоте колонны № 15 в ряду Б

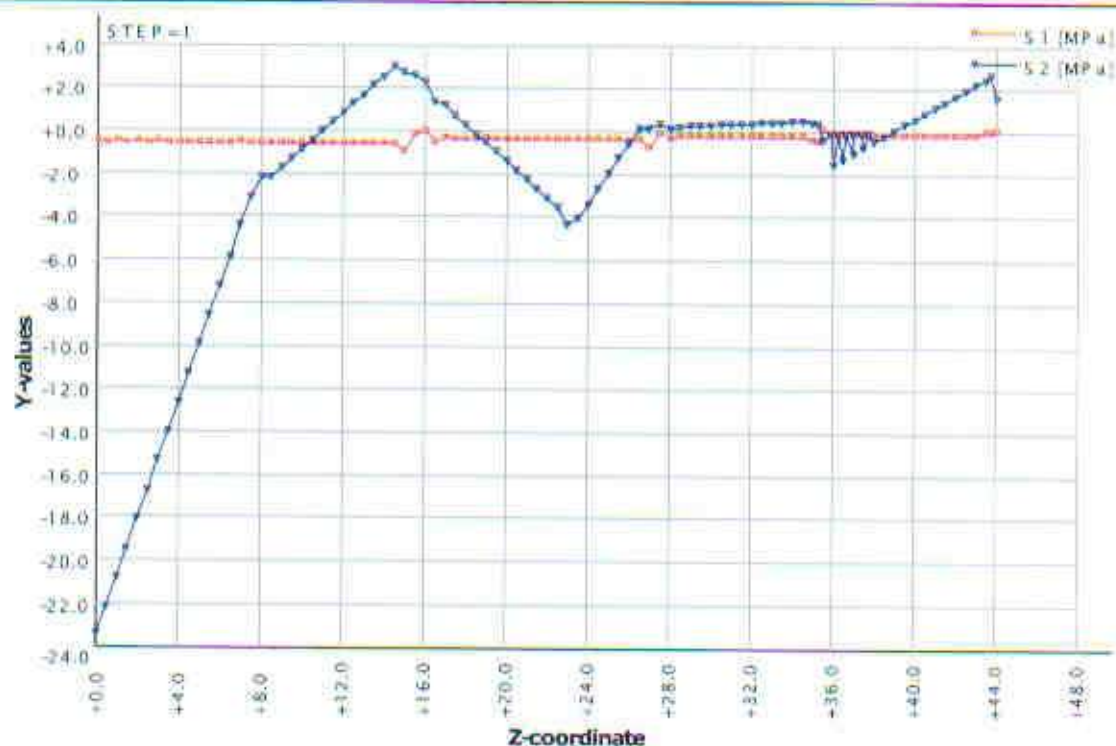


Рисунок 2.34 – Графики распределения компонентов напряжений [МПа] по высоте колонны № 21 в ряду Б

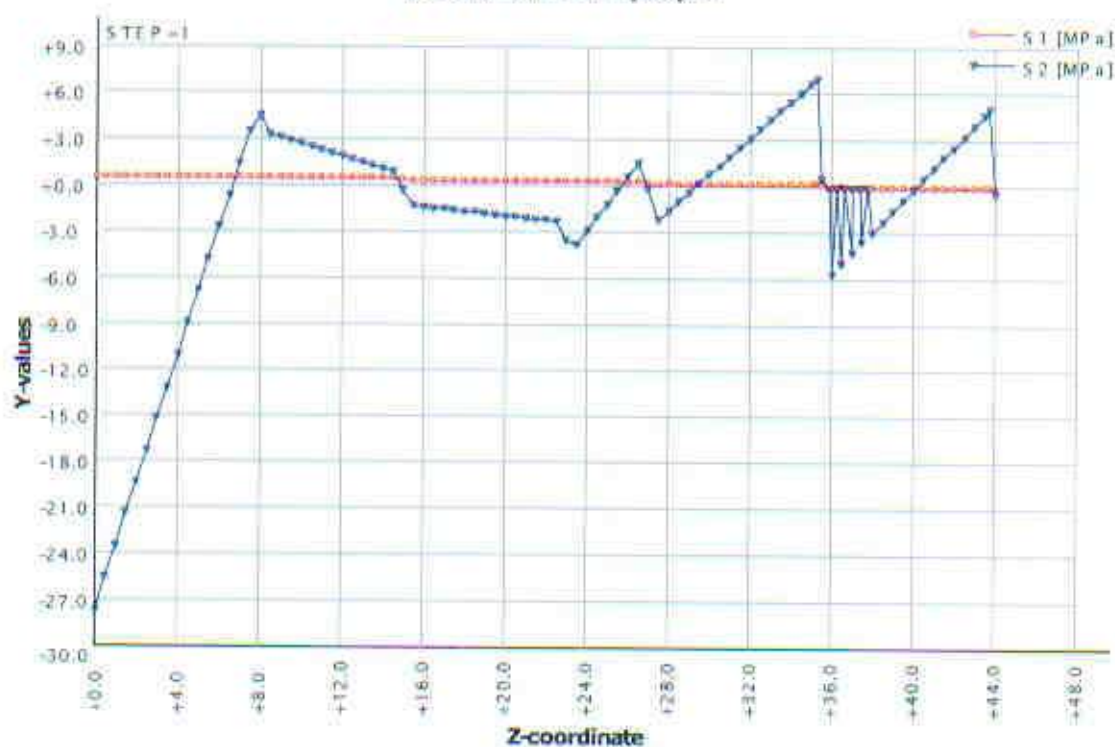


Рисунок 2.35 – Графики распределения компонентов напряжений [МПа] по высоте колонны № 22 в ряду Б

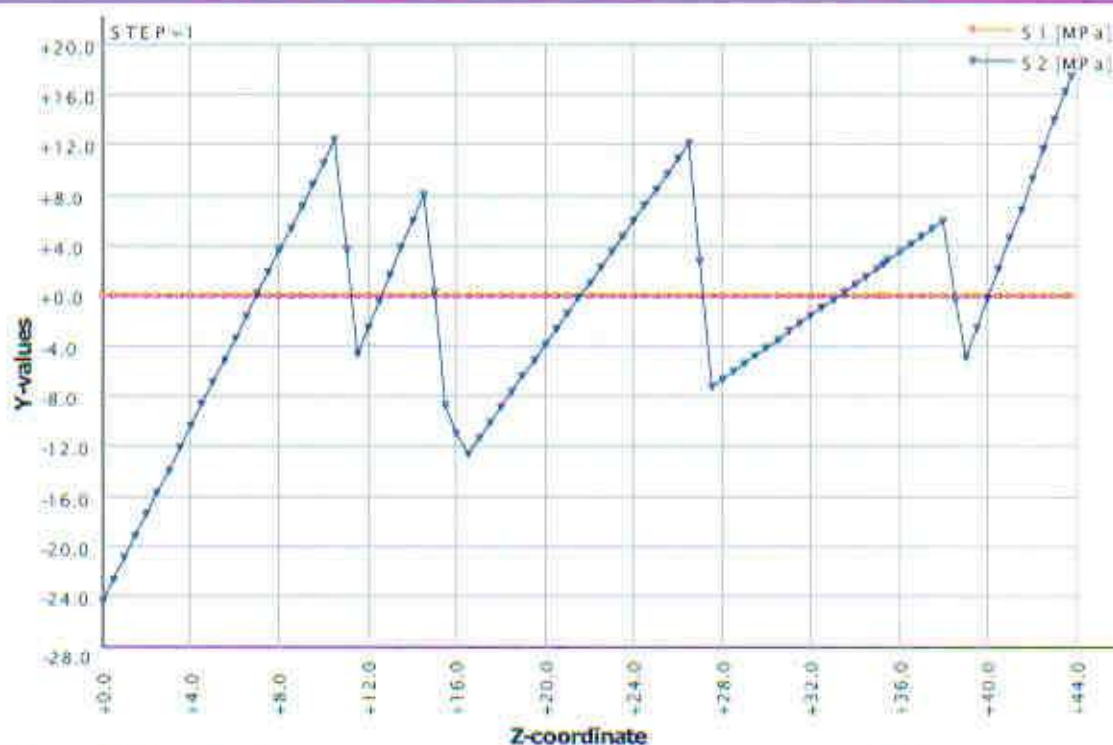


Рисунок 2.36 – Графики распределения компонент напряжений [МПа] по высоте колонны № 39 в ряду В

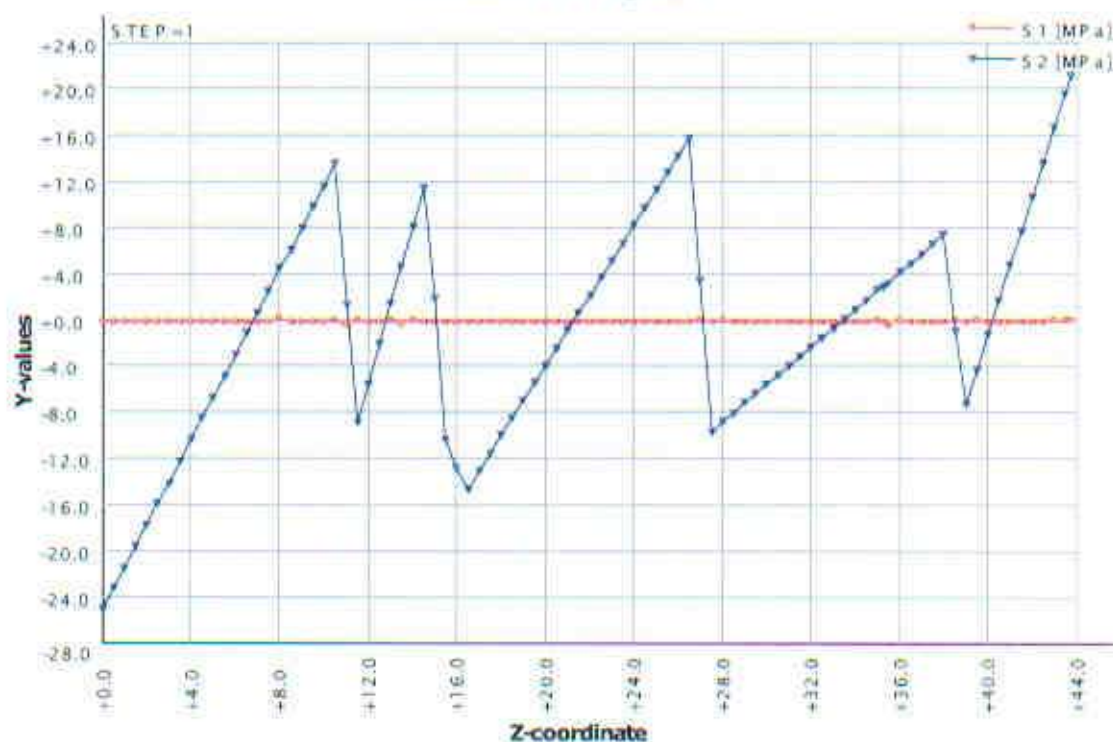


Рисунок 2.37 – Графики распределения компонент напряжений [МПа] по высоте колонны № 38 в ряду В

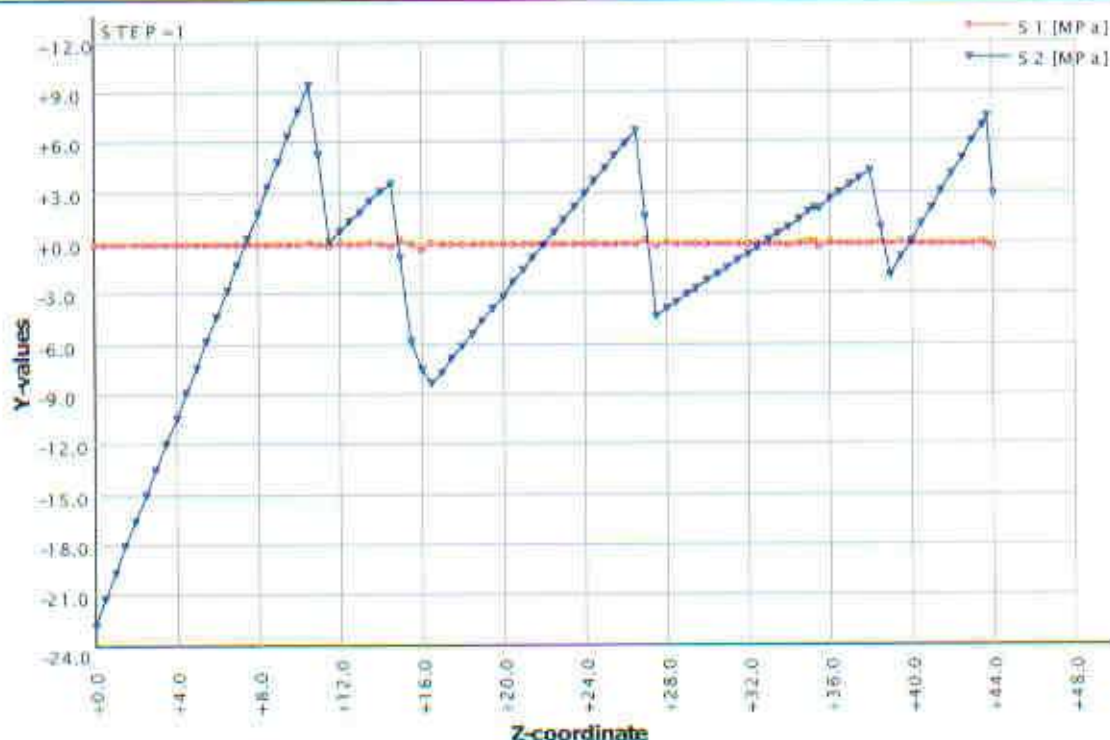


Рисунок 2.38 – Графики распределения компонентов напряжений [МПа] по высоте колонны № 37 в ряду В

Анализ полученных результатов показывает, что напряжения в опорных колоннах, образующиеся от неравномерной осадки фундаментов колонн не превышают допускаемых значений. Максимальные значения суммарных напряжений (растяжение-сжатие + изгиб), вызванных неравномерным приращением осадок оснований опорных колонн в период 1991 – 2011 г., составляют не более 28 МПа.

Для оценки НДС несущих балок (ферм) кровли на рисунке 2.39 показаны графики распределений компонентов напряжений в горизонтальных продольных балках (верхней - а и нижней - б) центральной продольной фермы, поддерживающей конек кровли.

На рисунке 2.40 показаны графики распределений компонентов напряжений в горизонтальных продольных балках (верхней - а и нижней - б) продольной фермы, расположенной над рядом колонн А.

На рисунке 2.41 показаны графики распределений компонентов напряжений в горизонтальных продольных балках (верхней - а и нижней - б) продольной фермы, расположенной над рядом колонн Б.

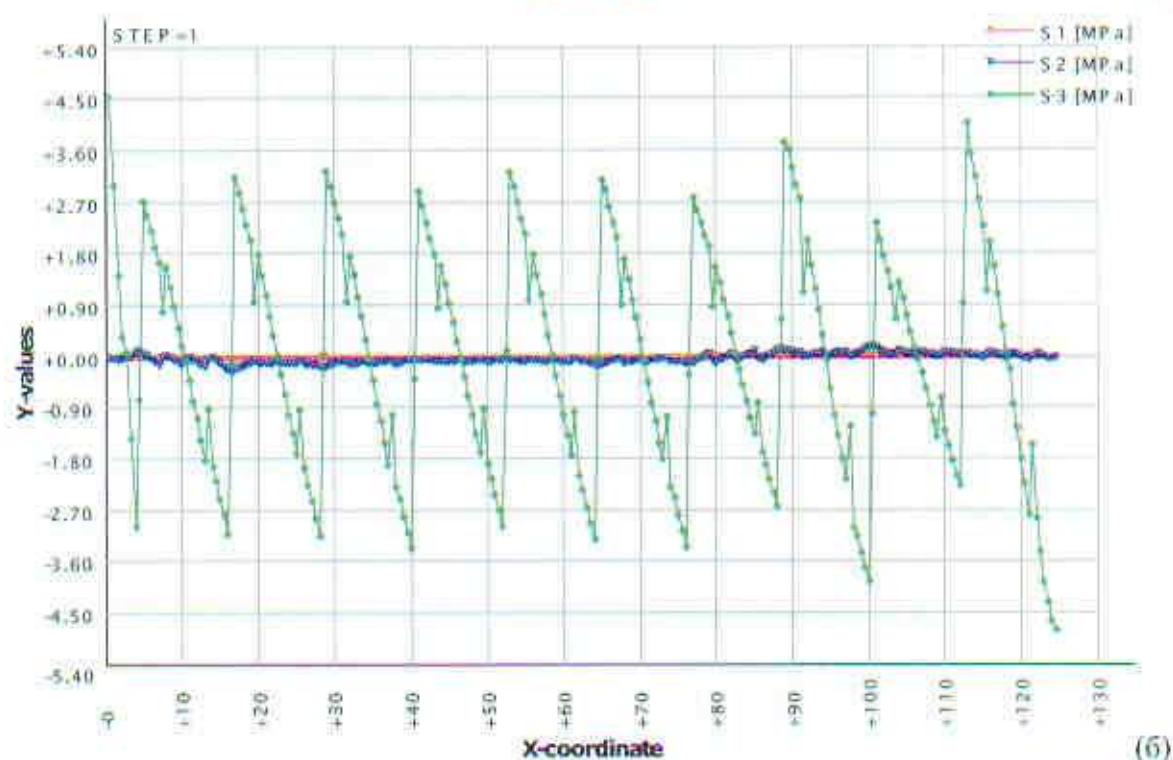
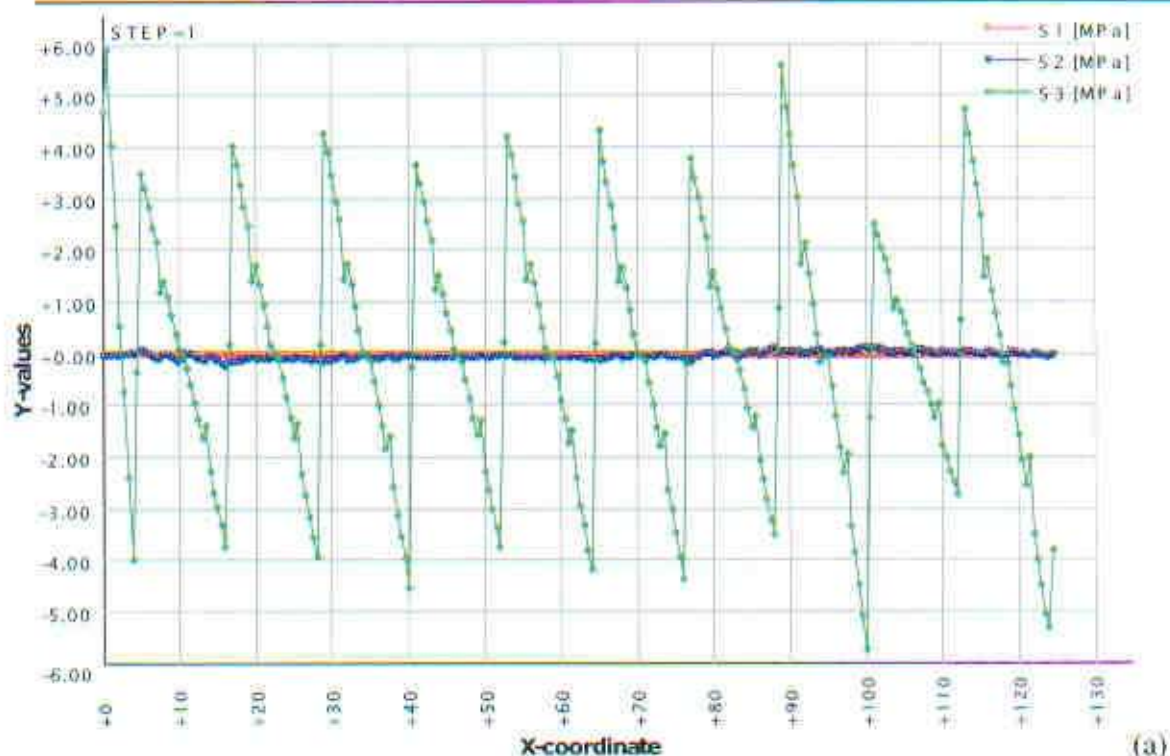


Рисунок 2.39 – Распределение компонентов напряжений в горизонтальных продольных балках (верхней - а и нижней - б) центральной продольной фермы, поддерживающей конек кровли

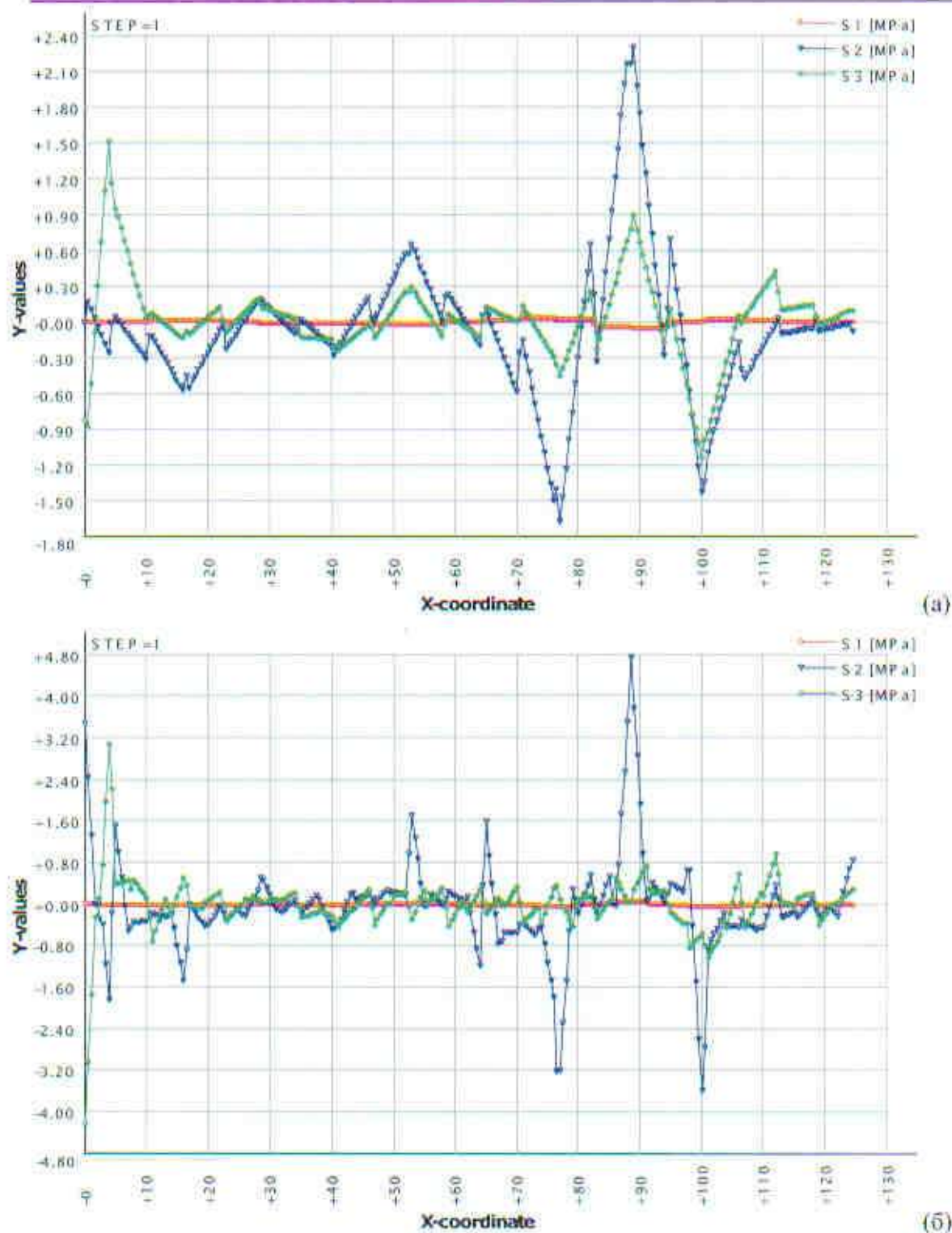


Рисунок 2.40 – Распределение компонентов напряжений в горизонтальных продольных балках (верхней - а и нижней - б) продольной фермы, расположенной над рядом колонн А

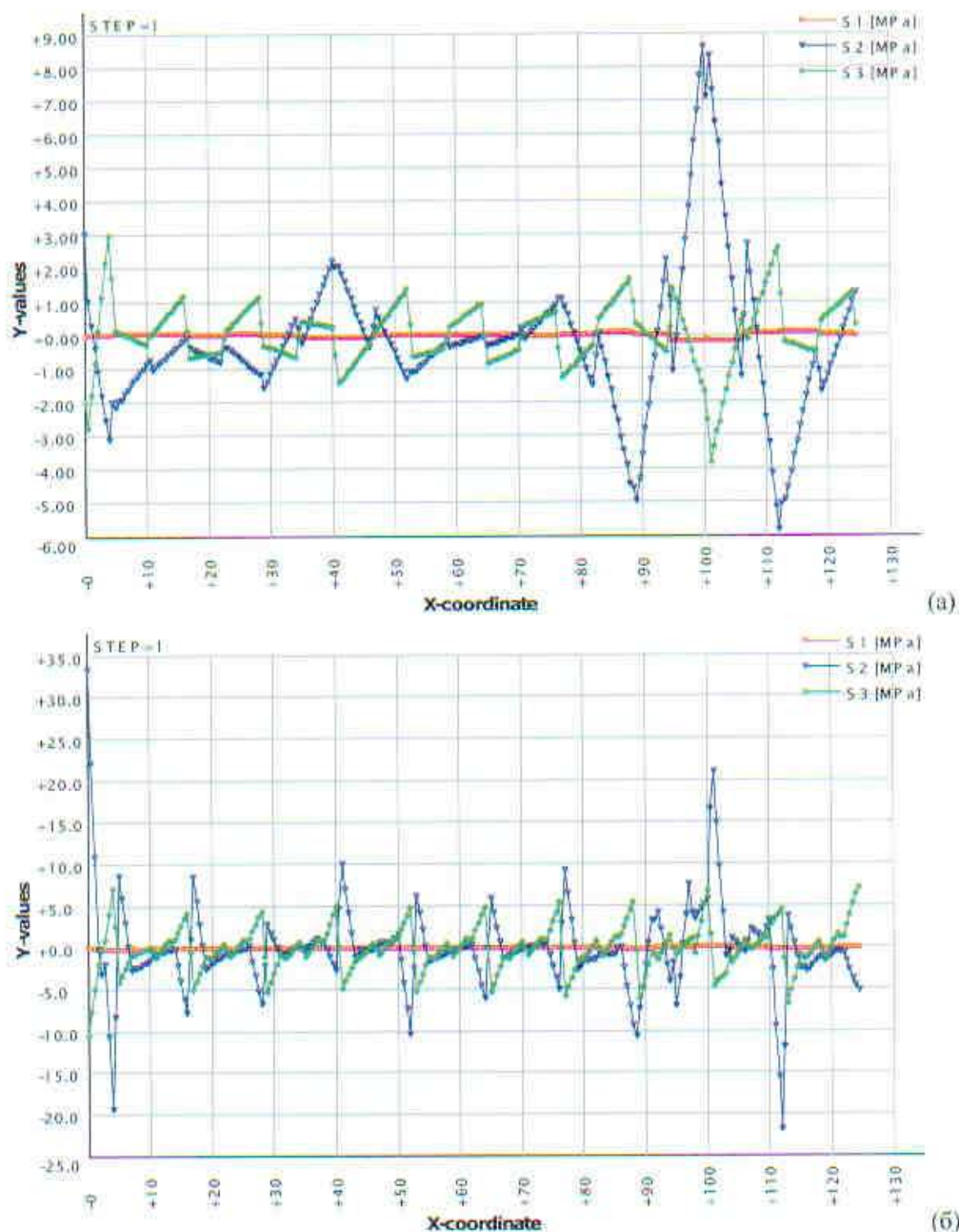


Рисунок 2.41 – Распределение компонентов напряжений в горизонтальных продольных балках (верхней - а и нижней - б) продольной фермы, расположенной над рядом колонн Б

Приведенные данные показывают, что наибольший уровень изгибных напряжений (~ 34 МПа) в фермах кровли вызванных неравномерной осадкой основания несущих колонн машинного зала имеет место в нижней продольной балке продольной фермы кровли, расположенной над рядом колонн Б.

3 Проверочный расчет на прочность несущих элементов каркасов зданий машзала, ДО и ЭЭТУ

Колонны ряда А на отметках от 0 до 27 м.

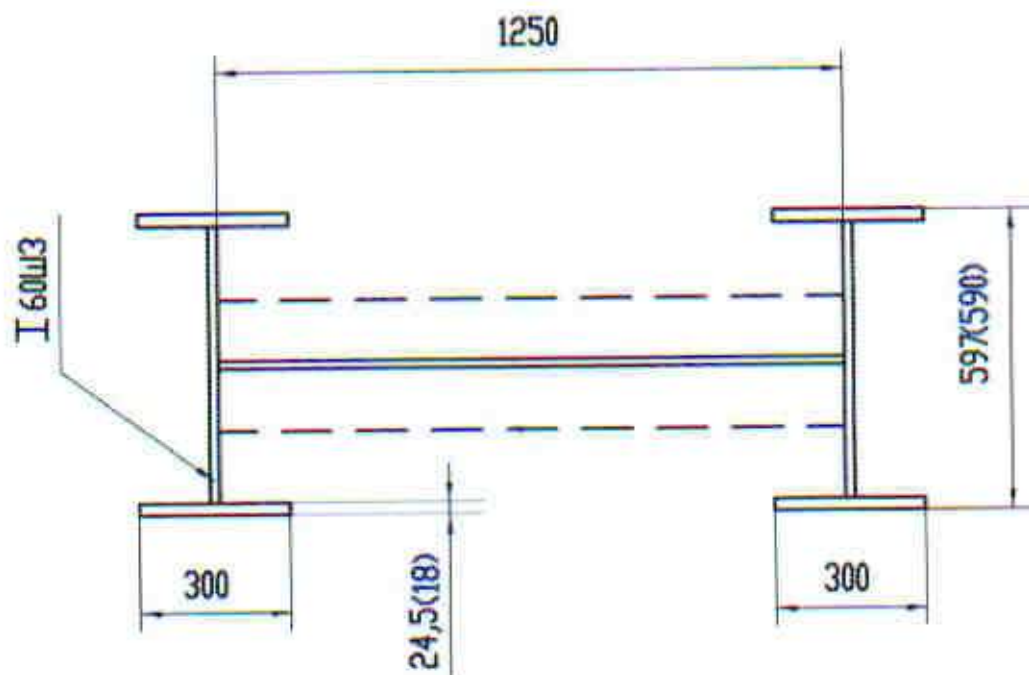


Рисунок 3.1 – Геометрия сечения колонны ряда А на отметках 0 – 27 м (в скобках - реальные размеры).

Характеристики сечения:

Двутавр 60Ш3 (с учетом отклонений размеров)

$$F = 30 \times 1,8 \times 2 + (59 - 1,8 \times 2 = 55,4) \times 1,8 = 208 \text{ см}^2;$$

$$I_x = 55,4^3 \times 1,8 / 12 + 2 \times (30 \times 1,8^3 / 12 + 30 \times 1,8 \times 27,7^2) = 108401 \text{ см}^4;$$

$$I_y = 55,4 \times 1,8^3 / 12 + 2 \times 30^3 \times 1,8 / 12 = 8127 \text{ см}^4;$$

$$W_x = 3674 \text{ см}^3;$$

$$W_y = 542 \text{ см}^3;$$

$$A^{\text{общ}} = 1,6 \times 125 + 2 \times 208 = 616 \text{ см}^2,$$

$$I_x^{\text{общ}} = 1,6 \times 125^3 + 2(8127 + 208 \times 63,4^2) = 4813391 \text{ см}^4,$$

$$W_x^{\text{общ}} = 4813391 / 78,4 = 61395 \text{ см}^3,$$

$$I_y^{\text{общ}} = 2 \times 8127 + 1,6^3 \times 125 = 16766 \text{ см}^4,$$

$$W_y^{\text{общ}} = 551 \text{ см}^3,$$

$$i_x = (I/A)^{1/2} = (4813391/616)^{1/2} = 88,4 \text{ см},$$

$$i_y = 5,22 \text{ см}.$$

Расчет на прочность:

Нагрузки по чертежам: $M_x = 394 \text{ тсм}$, $N = 756 \text{ тс}$,

Сталь 14Г2-6 $R_y = 3150 \text{ кгс/см}^2$

Вычислим дополнительный момент от искривления оси из плоскости рамы при эксцентриситете, равном $e_x = e_y = 5 \text{ см}$.

$$M_x^{\text{доп}} = N \cdot e = 756 \times 0,05 = 37,8 \text{ тсм}$$

$M_y^{\text{доп}}$ в расчет не принимается, т.к. дополнительные усилия воспринимаются распорками и вертикальными связями по колоннам, а участки колонны между точками закрепления близки к прямолинейным.

Тогда прочность стойки оцениваем по соотношению [4]:

$$\sigma = \frac{N}{A^{\text{общ}}} + \frac{M_x + M_x^{\text{доп}}}{W_x} < R_y \gamma_c, \text{ где} \quad (3.1)$$

$\gamma_c = 1,0$ – коэффициент условий работы.

Подставляем числовые значения:

$$\sigma = 756\,000/616 + (39\,400\,000 + 378\,000)/61395 = 1931 \text{ кгс/см}^2$$

$$1931 \text{ кгс/см}^2 < 3150 \text{ кгс/см}^2 \times 1,0.$$

С учетом максимального значения напряжений (620 кгс/см^2) в балках и колоннах каркаса, определенного в разделе 2 условие прочности также выполняется:

$$1931 + 620 = 2551 \text{ кгс/см}^2 < 3150 \text{ кгс/см}^2 \times 1,0.$$

Вывод: Прочность сечения обеспечена.

Расчет на устойчивость (в плоскости изгиба момента).

Колонна А представляет собой двухступенчатую стойку, схема которой показана на рис. 3.2.

Сечение верхней части – двутавр 70Ш4 с характеристиками:

- площадь сечения $A = 329 \text{ см}^2$,
- момент инерции $I = 275138 \text{ см}^4$.

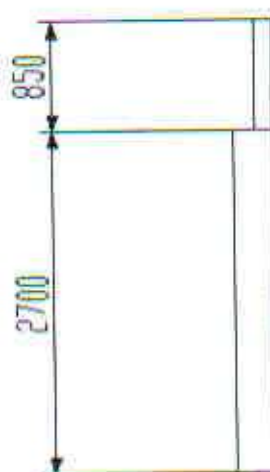


Рисунок 3.2 – Схема колонны ряда А (размеры в см)

Расчет на устойчивость внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов постоянного сечения (СНИП 2-23-81) в плоскости действия момента, совпадающей с плоскостью симметрии, следует выполнять по формуле

$$\frac{N}{\varphi_x A} \leq R_y \gamma_c, \quad (3.2)$$

Коэффициент φ_x определяется для сплошностенчатых стержней в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}$ и приведенного относительного эксцентриситета m_{eff} , определяемого по формуле:

$$m_{ef} = \eta m,$$

где $\eta = 1,2$ – коэффициент влияния формы сечения, определяемый по табл.;

$$m = \frac{eA}{W_c} = \frac{60 \cdot 616}{61395} = 0,6 \text{ – относительный эксцентриситет,}$$

(здесь e – эксцентриситет;

$$e = e_1 + e_2 + e_3 = 52 + 5 + 3 = 60 \text{ см}$$

$$e_1 = M/N = 39400000/756000 = 52 \text{ см}$$

$$e_2 = 5 \text{ см – кривизна оси колонны (принято)}$$

$$e_3 = 3 \text{ см – случайные эксцентриситеты}$$

W_c – момент сопротивления сечения для наиболее сжатого волокна);

$$\text{Таким образом, } m_{ef} = 1,2 \cdot 0,6 = 0,72.$$

Условная гибкость определяется по соотношению: $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{R_s}{E}}$,

где гибкость $\lambda = l_{ef}/i$.

Расчетные длины l_{ef} колонн (стоек) постоянного сечения или отдельных участков ступенчатых колонн определяются по формуле [4]:

$$l_{ef} = \mu \cdot l$$

где l – длина колонны, отдельного участка ее или высота этажа;

μ – коэффициент расчетной длины.

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{\mu_{12}^2 + \mu_{11}^2 (\beta - 1)}{\beta}} = (1,93 + 0,81(2,87 - 1)/2,87)^{1/2} = 1,57.$$

Коэффициент

$$\beta = \frac{F_1 + F_2}{F_2} = (616 + 329)/329 = 2,87$$

Коэффициенты

$$\mu_1 = 1,93,$$

$$\mu_2 = 0,81$$

находятся по таблицам в зависимости от соотношений:

$$I_2/I_1 = 275138/4813391 = 0,057,$$

$$l_2/l_1 = 850/2700 = 0,31.$$

Тогда

$$l_{ef} = \mu_1 * l = 1,57 * 2700 = 4232 \text{ см},$$

гибкость

$$\lambda = l_{ef}/i = 4232/88,4 = 48.$$

$$\text{Условная гибкость } \bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 48 * (3150/2100000)^{1/2} = 1,86$$

Тогда по таблицам СНиП коэффициент $\varphi_c = 0,58$.

Проверяем условие 3.2.

$$\frac{756000}{0,58 * 616} = 2116 \leq R_y \gamma_c = 3150.$$

Вывод: Устойчивость, в плоскости действия момента, обеспечена

Колонны ряда Б на отметках от 0 до 27 м.

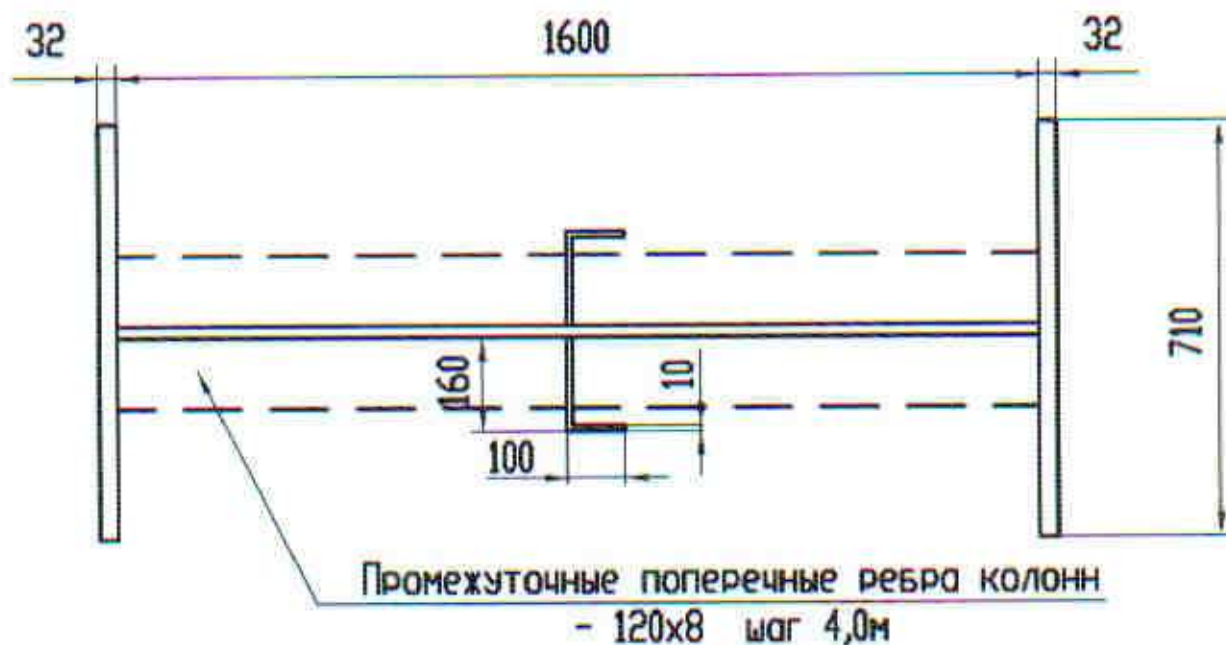


Рисунок 3.3 – Геометрия сечения колонн ряда Б на отметках 0 – 27 м (размеры соответствуют проектным).

Характеристики сечения:

$$A_{\text{общ}} = 2 \cdot 160 + 2 \cdot 71 \cdot 3,2 = 774 \text{ см}^2$$

$$I_x^{\text{общ}} = 2 \cdot 160^3 + 2(3,2 \cdot 71 \cdot 81,6^2) = 11217650 \text{ см}^4$$

$$W_x^{\text{общ}} = 11217650 / 81,6 = 137471 \text{ см}^3$$

$$I_y^{\text{общ}} = 2 \cdot 3,2 \cdot 71^3 = 2290630 \text{ см}^4$$

$$W_y^{\text{общ}} = 2290630 / 35,5 = 64525 \text{ см}^3$$

$$i_x = (I_x / A)^{1/2} = (11217650 / 774)^{1/2} = 120 \text{ см}$$

$$i_y = (64525 / 774)^{1/2} = 9,1 \text{ см}$$

Расчет на прочность:

Нагрузки по чертежам: $M_x=579$ тсм, $N=1624$ тс,

Сталь 14Г2АФ-6 $R_y=3770$ кгс/см²

Вычислим дополнительный момент от искривления оси из плоскости рамы при эксцентриситете, равном $e_x=e_y=5$ см.

$$M_x^{доп} = N * e = 1624 * 0,05 = 81,2 \text{ тсм}$$

$M_y^{доп}$ в расчет не принимается, т.к. дополнительные усилия воспринимаются распорками и вертикальными связями по колоннам, а участки колонны между точками закрепления близки к прямолинейным.

Тогда прочность стойки оцениваем по соотношению [4]:

$$\sigma = \frac{N}{A^{ном}} + \frac{M_x + M_x^{доп}}{W_x} < R_y \gamma_c, \text{ где} \quad (3.3)$$

$\gamma_c = 1,0$ – коэффициент условий работы.

Подставляем числовые значения:

$$\sigma = 1624000/774 + (57900000 + 8120000) / 137471 = 2578 \text{ кгс/см}^2$$

$$2578 \text{ кгс/см}^2 < 3770 \text{ кгс/см}^2 * 1,0$$

С учетом максимального значения напряжений (620 кгс/см²) в балках и колоннах каркаса, определенного в разделе 2 условие прочности также выполняется:

$$2578 + 620 = 3198 \text{ кгс/см}^2 < 3770 \text{ кгс/см}^2 * 1,0.$$

Вывод: Прочность сечения обеспечена.

Расчет на устойчивость (в плоскости изгиб. момента).

Колонна Б представляет собой двухступенчатую стойку, схема которой показана на рис. 3.4.

Сечение верхней части – составное сечение с характеристиками:

- площадь сечения $A = 704$ см²,
- момент инерции $I = 1494712$ см⁴.

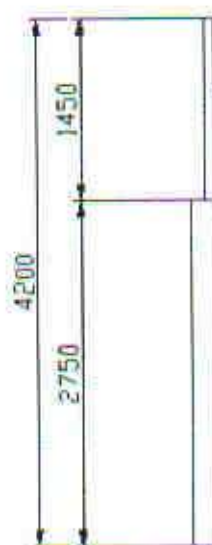


Рисунок 3.4 – Схема колонны ряда Б (размеры в см)

Расчет на устойчивость внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов постоянного сечения (СНИП 2-23-81) в плоскости действия момента, совпадающей с плоскостью симметрии, следует выполнять по формуле

$$\frac{N}{\varphi_y A} \leq R_y \gamma_c, \quad (3.4)$$

Коэффициент φ_y определяется для сплошнотенчатых стержней в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}$ и приведенного относительного эксцентриситета m_{ef} , определяемого по формуле:

$$m_{ef} = \eta m,$$

где $\eta = 1,25$ – коэффициент влияния формы сечения, определяемый по табл.;

$$m = \frac{eA}{W_c} = \frac{44 \cdot 704}{137471} = 0,23 \text{ – относительный эксцентриситет,}$$

(здесь e – эксцентриситет;

$$e = e_1 + e_2 + e_3 = 36 + 5 + 3 = 44 \text{ см}$$

$$e_1 = M/N = 57900000 / 1624000 = 36 \text{ см}$$

$$e_2 = 5 \text{ см} \text{ — кривизна оси колонны (принято)}$$

$$e_3 = 3 \text{ см} \text{ — случайные эксцентриситеты}$$

W_c — момент сопротивления сечения для наиболее сжатого волокна);

$$\text{Таким образом, } m_{ef} = 1,25 \cdot 0,23 = 0,28.$$

Условная гибкость определяется по соотношению: $\lambda = \lambda \sqrt{\frac{R_y}{E}}$,

где гибкость $\lambda = l_{ef} / i$.

Расчетные длины l_{ef} колонн (стоек) постоянного сечения или отдельных участков ступенчатых колонн определяются по формуле [4]:

$$l_{ef} = \mu \cdot l$$

где l — длина колонны, отдельного участка ее или высота этажа;

μ — коэффициент расчетной длины.

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{\mu_{12}^2 + \mu_{11}^2 (\beta - 1)}{\beta}} = (1,95^2 + 1,0^2 (2,1 - 1) / 2,1)^{1/2} = 2,08.$$

Коэффициент

$$\beta = \frac{F_1 + F_2}{F_2} = (774 + 704) / 704 = 2,1$$

Коэффициенты

$$\mu_{11} = 1,0,$$

$$\mu_{12} = 1,95$$

находятся по таблицам в зависимости от соотношений:

$$I_2 / I_1 = 1494712 / 11217650 = 0,133,$$

$$l_2 / l_1 = 1450 / 2750 = 0,53.$$

Тогда

$$l_{ef} = \mu_1 * l = 2,08 * 2750 = 5720 \text{ см}$$

гибкость

$$\lambda = l_{ef} / i = 5720 / 120 = 48$$

$$\text{Условная гибкость } \lambda = \lambda \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 48 * (3770 / 2100000)^{1/2} = 2,03$$

Тогда по таблицам СНиП коэффициент $\varphi_y = 0,72$.

Проверяем условие 3.4.

$$1624000 / (0,72) * 774 = 2914 \leq R_y \gamma_c = 3770.$$

Вывод: Устойчивость, в плоскости действия момента, обеспечена

Колонны ряда В на отметках от 0 до 27 м.



Рисунок 3.5 – Геометрия сечения колонн ряда В на отметках 0 – 27 м (размеры соответствуют проектным).

Характеристики сечения:

$$A_{\text{общ}} = 2 \cdot 160 + 2 \cdot 63 \cdot 2,5 = 635 \text{ см}^2$$

$$I_x_{\text{общ}} = 2 \cdot 160^3 + 2(2,5 \cdot 63 \cdot 81,3^2) = 10274052 \text{ см}^4$$

$$W_x_{\text{общ}} = 10274052 / 81,3 = 126372 \text{ см}^3$$

$$I_y_{\text{общ}} = 2 \cdot 2,5 \cdot 63^3 = 1250235 \text{ см}^4$$

$$W_y_{\text{общ}} = 1250235 / 31,5 = 39690 \text{ см}^3$$

$$i_x = (I/A)^{1/2} = (10274052 / 635)^{1/2} = 127 \text{ см}$$

$$i_y = (39690 / 635)^{1/2} = 8 \text{ см}$$

Расчет на прочность:

Нагрузки по чертежам: $M_x=522$ тсм, $N=1039$ тс,

Сталь 14Г2АФ-6 $R_y=3770$ кгс/см²

Вычислим дополнительный момент от искривления оси из плоскости рамы при эксцентриситете, равно $e_x=e_y=5$ см.

$$M_x^{\text{доп}} = N * e = 1039 * 0,05 = 51,9 \text{ тсм}$$

$M_y^{\text{доп}}$ в расчет не принимается, т.к. дополнительные усилия воспринимаются распорками и вертикальными связями по колоннам, а участки колонны между точками закрепления близки к прямолинейным.

Тогда прочность стойки оцениваем по соотношению [4]:

$$\sigma = \frac{N}{A^{\text{норм}}} + \frac{M_x + M_x^{\text{доп}}}{W_x} < R_y \gamma_c, \text{ где} \quad (3.5)$$

$\gamma = 1,0$ – коэффициент условий работы.

Подставляем числовые значения:

$$\sigma = 1039000/635 + (52200000 + 5190000) / 39690 = 3082 \text{ кгс/ см}^2$$

$$3082 \text{ кгс/ см}^2 < 3770 \text{ кгс/ см}^2 * 1,0$$

С учетом максимального значения напряжений (620 кгс/ см²) в балках и колоннах каркаса, определенного в разделе 2 условие прочности также выполняется:

$$3082 + 620 = 3702 \text{ кгс/ см}^2 < 3770 \text{ кгс/ см}^2 * 1,0.$$

Вывод: Прочность сечения обеспечена.

Расчет на устойчивость (в плоскости изгиб. момента).

Колонна В представляет собой двухступенчатую стойку, схема которой показана на рис. 3.6.

Сечение верхней части – составное сечение с характеристиками:

- площадь сечения $A = 704$ см²,
- момент инерции $I = 1494712$ см⁴.

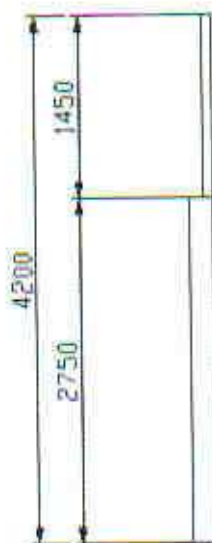


Рисунок 3.6 – Схема колонны ряда В (размеры в см)

Расчет на устойчивость внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов постоянного сечения (СНИП 2-23-81) в плоскости действия момента, совпадающей с плоскостью симметрии, следует выполнять по формуле

$$\frac{N}{\varphi_c A} \leq R_c \gamma_c, \quad (3.6)$$

Коэффициент φ_c определяется для сплошностенчатых стержней в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}$ и приведенного относительного эксцентриситета m_{ef} определяемого по формуле:

$$m_{ef} = \eta m,$$

где $\eta = 1,25$ – коэффициент влияния формы сечения, определяемый по табл.;

$$m = \frac{eA}{W_c} = \frac{58 \cdot 704}{126372} = 0,32 \text{ – относительный эксцентриситет,}$$

(здесь e – эксцентриситет;

$$e=e_1+e_2+e_3=50+5+3=58 \text{ см}$$

$$e_1=M/N=52200000/1039000=50 \text{ см}$$

$$e_2=5 \text{ см} \text{ – кривизна оси колонны (принято)}$$

$$e_3=3 \text{ см} \text{ – случайные эксцентриситеты}$$

W_c – момент сопротивления сечения для наиболее сжатого волокна);

Таким образом, $m_{ef} = 1,25 \cdot 0,32 = 0,4$.

Условная гибкость определяется по соотношению: $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{R_y}{E}}$,

где гибкость $\lambda = l_{ef}/i$.

Расчетные длины l_{ef} колонн (стоек) постоянного сечения или отдельных участков ступенчатых колонн определяются по формуле [4]:

$$l_{ef} = \mu \cdot l$$

где l – длина колонны, отдельного участка ее или высота этажа;

μ – коэффициент расчетной длины.

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{\mu_{12}^2 + \mu_{11}^2 (\beta - 1)}{\beta}} = (1,85^2 + 1,0^2 (2,1 - 1) / 2,1)^{1/2} = 1,99.$$

Коэффициент

$$\beta = \frac{F_1 + F_2}{F_2} = 635 + 704 / 635 = 2,1$$

Коэффициенты

$$\mu_{11} = 1,0,$$

$$\mu_{12} = 1,85$$

находятся по таблицам в зависимости от соотношений:

$$I_2/I_1 = 1494712/10274052 = 0,145,$$

$$I_2/I_1 = 1450/2750 = 0,53.$$

Тогда

$$l_{ef} = \mu_1 * l = 1,99 * 2750 = 5473 \text{ см.}$$

гибкость

$$\lambda = l_{ef} / i = 5473 / 127 = 43$$

$$\text{Условная гибкость } \bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{R_s}{E}} = 43 * (3770 / 2100000)^{1/2} = 1,82$$

Тогда по таблицам СНиП [4] коэффициент $\varphi_c = 0,69$.

Проверяем условие 3.6.

$$1039\,000 / (0,69 * 635) = 2371 \leq R_s \gamma_c = 3770.$$

Вывод: Устойчивость, в плоскости действия момента, обеспечена

В работах [5], [6] с учетом требований [3] проведены поверочные расчеты несущих конструкций для типовых проектов зданий машинного зала и деаэрационного отделения и этажерки электротехнических устройств. Расчет производился на основное (вес собственный, оборудование, ветровые, снеговые и др.) и особое сочетание нагрузок (с учетом сейсмической нагрузки уровня 6 баллов по шкале MSK-64). Проверка прочности и устойчивости выполнена в [6] для основных элементов каркаса главного корпуса: колонн, ригелей, связей по колоннам, ферм покрытия.

Проверка прочности колонн каркаса произведена по соотношению фактических и допускаемых напряжений по наиболее опасным сочетаниям нагрузок.

$$\sigma / R < 1 \quad \tau / R_s < 1,$$

где σ – нормальные напряжения в сечении, МПа;

τ – касательные напряжения в сечении, МПа.

Допускаемые напряжения принимались в зависимости от геометрических характеристик сечения колонн и марки металла и соответствовали принятым характеристикам материалов в настоящем отчете.

Результаты расчетов работы [6] приведены ниже в табличной форме. Они достаточно хорошо соответствуют результатам оценок прочности, полученным в данном отчете для отдельных сечений.

Таблица 3.1 – Значения σ / R и τ / R_s для колонн по оси «А»

Сечение	σ / R	τ / R_s
с отм. 0 до отм. +16,000	0,37	0,05
с отм. + 16,000 до отм. +27,250	0,44	0,07
с отм. + 27,250 до отм. +35,500	0,53	0,02

Таблица 3.2 – Значения σ / R и τ / R_s для колонн по оси «Б»

Сечение	σ / R	τ / R_s
с отм. 0 до отм. +16,000	0,57	0,1
с отм. + 16,000 до отм. +27,250	0,55	0,13
с отм. + 27,250 до отм. +35,500	0,3	0,1
с отм. + 35,500 до отм. +42,500	0,26	0,07

Таблица 3.3 – Значения σ / R и τ / R_s для колонн по оси «В»

Сечение	σ / R	τ / R_s
с отм. 0 до отм. +16,000	0,55	0,14
с отм. + 16,000 до отм. +28,000	0,54	0,14
с отм. + 28,000 до отм. +35,500	0,3	0,05
с отм. + 35,500 до отм. +40,500	0,36	0,12
с отм. + 40,500 до отм. +42,500	0,27	0,06

Для сечений колонн, где получены наибольшие соотношения фактических и допускаемых напряжений, в [6] проверка проведена устойчивости колонн. Устойчивость проверялась как в плоскости действия момента (плоскость поперечной рамы), так и в перпендикулярном направлении. Условие сохранения устойчивости $[\lambda] > \lambda$, где $[\lambda]$ – предельное значение гибкости, λ – фактическое значение гибкости. Результаты оценки устойчивости колонн по данным [6] приведены ниже в таблицах 3.4+3.6.

Таблица 3.4 – Значения $[\lambda]$ и λ для колонн по оси «А»

Сечение	$[\lambda]$	λ
с отм. 0 до отм. +16,000	145	48
с отм. + 16,000 до отм. +27,250	135	41
с отм. + 27,250 до отм. +35,500	134	70

Таблица 3.5 – Значения $[\lambda]$ и λ для колонн по оси «Б»

Сечение	$[\lambda]$	λ
с отм. 0 до отм. +14,670	141	37
с отм. + 14,670 до отм. +27,250	145	30

Таблица 3.6 – Значения $[\lambda]$ и λ для колонн по оси «В»

Сечение	$[\lambda]$	λ
с отм. 0 до отм. +14,670	143	30
с отм. + 26,670 до отм. +42,500	150	44

Из результатов расчета раздела 3 настоящего расчета, а также из таблиц 3 - 8 следует, что для всех сечений колонн условия прочности и устойчивости выполняются.

Ригели каркаса деаэрационного отделения рассчитывались [6] исходя из условия прочности сечений по нормальным и касательным напряжениям.

Условия обеспечения прочности по нормальным напряжениям:

$$\sigma = M / W_{n,min} + N / A_n < R_y \cdot \gamma_c, \text{ где}$$

N, M – абсолютные значения соответственно продольной силы и момента, действующего в плоскости поперечной рамы;

$A_n, W_{n,min}$ – соответственно площадь сечения нетто и момент сопротивления нетто;

R_y – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию и изгибу по пределу текучести;

γ_c – коэффициент условий работы.

Условия обеспечения прочности по касательным напряжениям:

$$\tau = (M \cdot S) / (I \cdot t) < R_s \cdot \gamma_c, \text{ где}$$

Q – величина поперечной силы;

S – статический момент сдвигаемой части;

I – момент инерции сечения нетто;

t – толщина стенки;

R_s – расчетное сопротивление стали сдвигу;

γ_c – коэффициент условий работы.

Выполнен расчет прочности ригелей деаэрационного отделения.

Наиболее нагруженными являются ригели по осям «3» и «4».

Ригели на отметке +27,700.

Расчетные сопротивления с учетом коэффициента условий работы:

- по нормальным напряжениям $R_y \cdot \gamma_c = 370$ МПа;

по касательным напряжениям $R_s \cdot \gamma_c = 215$ МПа.

Фактические напряжения:

- нормальные 208 МПа < 370 МПа;

касательные 104 МПа < 215.

Фактические напряжения в ригелях не превышают расчетных сопротивлений, следовательно, условия прочности выполнены.

Проведена так же проверка прочности ферм покрытия машзала. Элементы ферм воспринимают осевые усилия и рассчитывались как элементы, подверженные центральному растяжению и сжатию.

Проверка прочности выполнялась исходя из условия:

$$\sigma = N / (\varphi \cdot A_n) < R_y \cdot \gamma_c$$

В соответствии с анализом нагрузок на поперечные рамы наибольшие нагрузки передаются на фермы покрытия по осям «3» и «4».

Расчетные сопротивления стали растяжению (R_p) и сжатию (R_c) с учетом коэффициента условий работы:

$$R_p = 225 \text{ МПа};$$

$$R_c = 189 \text{ МПа}.$$

Фактические максимальные напряжения в элементах фермы:

- растягивающие 124 МПа < 225 МПа;

- сжимающие 52 МПа < 189 МПа,

следовательно, прочность элементов фермы обеспечена.

Выполнена проверка прочности и устойчивости вертикальных связей по колоннам.

Максимальные напряжения в элементах связей 196 МПа не превышают значения расчетного сопротивления с учетом коэффициента условий работы 227 МПа, т.е. прочность сечений связей обеспечена.

Таким образом, по результатам оценки прочности и устойчивости наиболее нагруженных элементов каркаса машзала, деаэрационного отделения и ЭЭТУ энергоблока №1 Балаковской АЭС, а также результатов расчета НДС, приведенных в работе [6] для аналогичных конструкций, можно сделать вывод о том, что размеры сечений несущих элементов каркаса машинного зала и деаэрационного отделения энергоблока № 1 Балаковской АЭС достаточны для обеспечения прочности и устойчивости сооружения при нагрузках и воздействиях, определенных в соответствии с требованиями норм.

Выводы

1. Выполнен поверочный расчет каркаса машинного зала, деаэрационного отделения энергоблока №1 Балаковской АЭС с учетом неравномерных осадок фундаментов несущих колонн и эксплуатационных нагрузок, образовавшихся с момента проведения реконструкции здания в 1992 году.
2. Анализ исходных данных по геометрии сечений несущих элементов и механическим свойствам материалов показал, что они соответствуют проектным и нормативным значениям. Дegrадации механических свойств не выявлено.
3. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния каркасов зданий от неравномерных приращений осадок колонн показали, что наиболее нагруженными зонами продольных балок являются пролеты в рядах А, Б, В, в которых осадка колонн имеет наибольшее значение – вблизи торца машинного зала с коротким продольным пролетом. Наибольшие уровни напряжений имеют место в ряду б, где величина приращения осадки крайней колонны составляет $-0,008$ м., а также в зоне колонны 22 (по схеме на рисунке 2.4), приращение осадки которой составило $-0,011$ м. Максимальный уровень напряжений в несущих колоннах и балках машинного зала и деаэрационного отделения составляет 62 МПа. Наибольший уровень изгибных напряжений (~ 34 МПа) в фермах кровли вызванных неравномерной осадкой основания несущих колонн машинного зала имеет место в нижней продольной балке продольной фермы кровли, расположенной над рядом колонн Б.
4. Проведен анализ прочности и устойчивости наиболее нагруженных конструктивных элементов каркаса от основного сочетания нагрузок (вес собственный, оборудование, ветровые, снеговые) с учетом напряженно-деформированного состояния от неравномерных просадок колонн. Также проведено сравнение с результатами оценок прочности и устойчивости аналогичных строительных конструкций. Показано, что размеры сечений несущих элементов каркаса машинного зала и деаэрационного отделения энергоблока №1 Балаковской АЭС достаточны для обеспечения прочности и устойчивости сооружения в соответствии с нормативными требованиями. При последующей эксплуатации зданий машинного зала, деаэрационного отделения и ЭЭТУ энергоблока №1 Балаковской АЭС необходимым условием является регулярное обследование наиболее нагруженных зон каркаса, а именно узлов соединения

первых трех несущих колонн из рядов А, Б, В с продольными балками и ригелями
на отметках 8, 15, 27 м по высоте.

Список использованных источников

1. Технический отчёт «Сбор и анализ исходных данных о техническом состоянии строительных конструкций зданий машинного зала, деаэрационного отделения, этажерки электротехнических устройств энергоблока №1 Балаковской АЭС», ООО «НСУЦ «ЦМР», 2009г.
2. Отчёт «О геодезических работах по определению геометрии каркаса машинного зала и деаэрационного отделения блока 1 Балаковской АЭС в сентябре 2009 года», НПФ ГЕО, 2009 г.
3. СНиП 2.01.07-85 Нагрузки и воздействия (с изменениями 1988 г., 1993 г.).
4. СНиП II-23-81 Стальные конструкции (с изменениями 1984 г., 1985 г., 1986 г., 1988 г., 1989 г.).
5. Отчет А-66946, НИАЭП, 2000 г.
6. Отчет А-68921, НИАЭП, 2000 г.
7. НП-001-97 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (ОПБ-88/97), ГАН России, 1997.
8. НП-017-2000. «Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции».
9. РД ЭО 0447-03 «Методика оценки состояния и остаточного ресурса железобетонных конструкций АЭС, важных для безопасности».
10. РД ЭО-0007-2005. «Типовая инструкция по эксплуатации производственных зданий и сооружений атомных станций».
11. СТО 1.1.1.01.007.0281-2010 «Управление ресурсными характеристиками элементов энергоблоков атомных станций».
12. ПнН АЭ-5.6 «Нормы строительного проектирования атомных станций с реакторами различного типа».
13. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции (с изменениями 1988 г., 1991 г.).
14. Техническое заключение «Определение технического состояния строительных конструкций зданий машинного зала, деаэрационного отделения, этажерки электротехнических устройств энергоблока № 1 Балаковской АЭС», Атомэнергопроект, 2001 г.
15. Техническое заключение «Определение технического состояния строительных конструкций зданий машинного зала, деаэрационного отделения, этажерки электротехнических устройств

энергоблока № 1 Балаковской АЭС», Агпром, 2005 г.

16. Отчёт «О выполнении комплексного обследования энергоблока № 1 Балаковской АЭС для уточнения остаточного ресурса элементов блока после 21 года промышленной эксплуатации и его последующего контроля в период эксплуатации блока с увеличенными до 18 месяцев топливной кампанией и до 6-8 лет межремонтного периода отдельных видов оборудования», Балаковская АЭС, 2008 г.
17. Отчет «О наблюдениях за осадками и деформациями зданий и сооружений в 2008 году», Атомэнергопроект, 2009 г.
18. Техническая справка «Анализ напряженно-деформированного состояния здания машинного зала, деаэрационной и ЭТУ», ООО «НСУЦ «ЦМиР», 2010г.
19. «Примеры расчета металлических конструкций», 2-е изд. Мандриков А.П., М. Стройиздат, 1991 г.
20. «Метод конечных элементов в технике» Зенкевич О. - М., Мир, 1975.