

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет
(СибАДИ)»

Кафедра «Промышленное и гражданское строительство»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)
**«НАПРЯЖЕННО ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СВЯЗЕЙ
ДВУХСЛОЙНЫХ ПЛОСКИХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ С
УПРУГИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ»**

по направлению 08.06.01 – Техника и технологии строительства

научная направленность: «Строительные конструкции, здания и сооружения»

Аспирант

Смаилов Руслан Михайлович

Допустить к защите научного доклада:

Заведующий кафедрой «Промышленное
и гражданское строительство»

Научный руководитель

Нормоконтроль

к.т.н., доцент М.А. Ращупкина

д.т.н., профессор С.А. Макеев

старший преподаватель Н.Н. Разливкина

Омск – 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования:

На сегодняшний день в России реализуется программа технического перевооружения предприятий. В связи с этим в производство внедряются новые технологии и новые технологические линии.

Для их размещения требуются новые производственные площади. В связи с этим производится массовая реконструкция старых производственных площадей. Однако, не все технологические линии можно разместить в существующих и реконструируемых помещениях. В связи с этим требуется ввод новых площадей. Поэтому жизненно необходимым является строительство новых, дешевых, быстровозводимых конструкций.

Одними из таких конструкций являются бескаркасные цилиндрические своды, которые изготавливают из профилированного настила арочной формы. За счет своей формы они позволяют перекрывать большие пролеты до 10 м и более. Конструкции получаются легкими, прочными и долговечными. Но есть и свой минус. Это высокая теплопроводность металла. В результате чего зимой температура в здании будет такая же, как и на улице.

Чтобы обеспечить внутри таких зданий комфортные условия требуется теплоизоляция, которую необходимо защищать от внешних воздействий. Одним из наиболее эффективных способов является размещение теплоизоляции между двумя слоями бескаркасного цилиндрического свода: несущим - нижним и верхним - ограждающим.

На сегодняшний день учет совместной работы слоев бескаркасных цилиндрических сводов с эффективным утеплителем не производится, так как в основной массе применяется минераловатные утеплители, которые не имеют конструктивных связей с настилами. Связь верхнего и нижнего настилов осуществляется только при помощи тонкостенных холодногнутых пластинчатых элементов различных конфигураций.

Анализ показал, что при замене минераловатного утеплителя на пористый, который благодаря адгезии прилипает к настилам, элементы свода начинают работать совместно.

Учет совместной работы настилов с эффективным утеплителем позволяет выявить запасы по прочности и жесткости, а, следовательно, уменьшить расход стали на конструкцию, снизить ее собственный вес, что приводит ее удешевлению.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросам совершенствования гнутых профилей и выполняемых из них зданий занимались Д.Б. Киселев, К.П. Пятикрестовский, А.И. Колесов, Э.Л. Айрумян, П.Г. Еремеев, И.А. Румянцева, М.Ю. Арменский, С.А. Макеев, Л.В. Красотина, М.А. Колесникова и другие. Они занимались вопросами конструирования, совершенствования методик расчета, напряженно-деформированного состояния гнутых профилей.

Основной целью этих исследований является массовое внедрение в строительство бескаркасных цилиндрических сводов как наиболее эффективных.

Цель исследования:

Совершенствование конструкции бескаркасных цилиндрических сводов за счет применения эффективного утеплителя с адгезионными связями с настилами свода, совершенствование методики расчета.

Задачи исследования:

1. Разработка эффективной конструкции бескаркасного цилиндрического свода с эффективным утеплителем имеющим адгезионные связи с настилами свода;
2. Исследование работы бескаркасного цилиндрического свода с эффективным утеплителем имеющим адгезионные связи с настилами свода;
3. Разработка расчётных моделей и алгоритмов для определения напряжений и деформаций бескаркасного цилиндрического свода с эффективным утеплителем имеющим адгезионные связи с настилами свода;
4. Экспериментальная проверка полученных данных.

Объект исследования:

Конструкция бескаркасного цилиндрического свода с эффективным утеплителем, имеющим адгезионные связи с настилами свода.

Предмет исследования:

Работа элементов бескаркасного цилиндрического свода с учетом совместной работы эффективного утеплителя.

Научная новизна заключается:

- методика определения высоты связевых элементов в конструкции двухслойного бескаркасного цилиндрического свода с упругим наполнителем, необходимых из условия обеспечения теплотехнических характеристик;
- методика определения параметров эквивалентного соединительного стержня, заменяющего полистиролбетонный заполнитель в конструкции двухслойного бескаркасного цилиндрического свода с упругим наполнителем;
- методика определения геометрических характеристик эквивалентного поперечного сечения двухслойных панелей с упругим наполнителем по критерию изгибной жесткости;
- методика расчета бескаркасного цилиндрического свода с эффективным утеплителем, имеющим адгезионные связи с настилами свода.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Учет совместной работы настилов с эффективным утеплителем позволяет:

- выявить запасы по прочности и жесткости;
- уменьшить металлоемкость конструкции;
- снизить затраты на строительство.

Методология и методы исследования:

В работе использованы основные положения теории упругости и существующие методы строительной механики, а также методы численного моделирования работы конструкций бескаркасных цилиндрических сводов, реализованных в общедоступной математической среде MS Excel и современного лицензированного конечно-элементного вычислительного комплекса "ПК Лира".

Положения, выносимые на защиту:

1. Новое конструктивное решение бескаркасного цилиндрического свода с эффективным утеплителем, имеющим адгезионные связи с настилами свода;
2. Способ расчета бескаркасного цилиндрического свода с

эффективным утеплителем, имеющим адгезионные связи с настилами свода.

3. Теоретические и экспериментальные данные исследований работы бескаркасного цилиндрического свода с эффективным утеплителем, имеющим адгезионные связи с настилами свода.

Степень достоверности исследования:

Основывается на использовании современных конечно-элементных методов расчета сертифицированных программных средств. Достоверность численных расчетов подтверждается результатами экспериментальных исследований.

Апробация результатов работы:

Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на: VII Международную научно-практическую конференцию студентов, аспирантов и молодых учёных «Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных», приуроченной к 110-летию со дня рождения Т.В. Алексеевой Омск: 2023 г.

Публикации по работе. По материалам исследований опубликована 1 статья в вестнике СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АКАДЕМИИ ВОЕННЫХ НАУК № 65. Журнал Вестник АВН включен в перечень ВАК.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Представлена краткая характеристика работы.

В первой главе выполнен анализ научных трудов посвященных исследованию работы бескаркасных цилиндрических сводов. Выявлены основные достоинства и недостатки бескаркасных цилиндрических сводов.

Выполнен обзор научных работ посвященных исследованию тонкостенных холодногнутых профилей применяемых в качестве связевых элементов в конструкции бескаркасных цилиндрических сводов.

Выполнен обзор материалов, которые могут применяться в качестве эффективного утеплителя в конструкциях бескаркасных цилиндрических сводов.

Выполнен обзор трудов, где рассматриваются способы повышения сцепления эффективного утеплителя с настилами сводов.

За все время эксплуатации бескаркасные цилиндрические своды зарекомендовали себя как универсальные здания, поскольку они могут применяться как в промышленном, так и гражданском строительстве.

Наиболее перспективным конструктивным решением бескаркасного цилиндрического свода является двухслойный свод, который состоит из двух арочных слоев, соединенных между собой связевыми элементами различных конфигураций. Для обеспечения теплоизоляционных характеристик пространство между слоями заполняется эффективным утеплителем.

Связевые элементы относятся к тонкостенным холодногнутым профилям, и на сегодняшний день основным инструментом исследования их работы является численное моделирование в программных комплексах, основанных на методе конечных элементов (МКЭ).

В основном исследование работы профилей идет по двум направлениям: учет бимоента в работе холодногнутых тонкостенных профилей и изучение явления

потери устойчивости (местной и общей). Исследований работы тонкостенных холодногнутых элементов в упругой среде нет.

Применение волокнистых и пенистых утеплителей в плитах в бескаркасных цилиндрических сводах для формирования оптимальной упругой среды невозможно за счет отсутствия конструктивных связей с металлическими элементами.

Пенистые утеплители в закрытом пространстве расширяются и полимеризуются неравномерно, что делает их применение в бескаркасных цилиндрических сводах невозможным;

Полистиролбетоны являются оптимальными материалами для формирования упругой среды, в которой работают связевые элементы в составе двухслойных бескаркасных цилиндрических сводов, но требуются обеспечение его совместной работы с листами профилированного настила.

На сегодняшний день наиболее перспективным вариантом обеспечения совместной работы является применение профнастилов со специальными зигзагообразными рифами. Однако технология изготовления бескаркасных цилиндрических сводов не позволяет применять такие настилы. Аналогичные выводы можно сделать и о стад-болтах. В конструкциях бескаркасных цилиндрических сводов попросту отсутствуют места для их установки.

Наиболее перспективными способами обеспечения совместной работы полистиролбетонного утеплителя с арочными профилированными настилами, формирующими верхний и нижний слои бескаркасного цилиндрического свода является применение анкеров из полосовой и проволочной арматуры. Поскольку их монтаж возможен до процесса нагнетания полистиролбетона между слоями.

Во второй главе приведена математическая модель напряженно-деформированного состояния плоского кругового стержня, которая лежит в основе способа расчета бескаркасного цилиндрического свода с эффективным утеплителем, имеющим адгезионные связи с настилами свода.

Возможен достаточно точный расчет арочных фрагментов из профилированного настила при следующих предпосылках:

- принимаются однопролетные арочные фрагменты кругового очертания шириной b , без учета взаимного влияния арочных элементов;
- нагрузку в общем виде представляем из двух составляющих: поперечной q_y и продольной (сжимающей или растягивающей) q_z , ориентированных в плоскости арки; при этом сосредоточенные нагрузки рассматриваются в виде распределенных на малых дугах $\delta S = r \cdot \delta \varphi$;
- расчет ведется в упругой постановке.

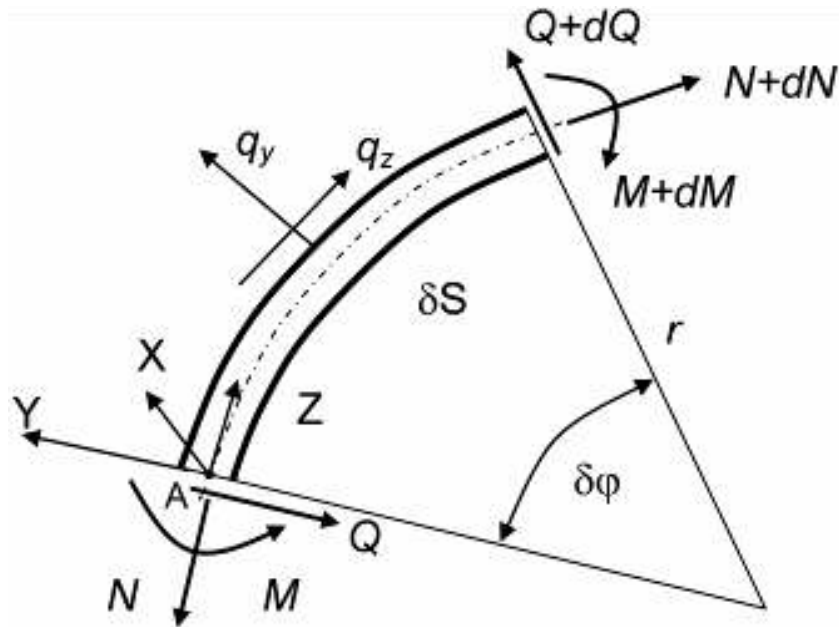


Рис.2.1. Схема равновесия бесконечно малого элемента дуги

Рассмотрим бесконечно малый элемент дуги δS (рис.2.1), находящийся в равновесии под действием внешних (q_y , q_z) и внутренних сил (Q , N – поперечная и продольные силы, M – изгибающий момент). Составим для выбранного элемента три уравнения равновесия в виде: суммы проекций всех сил на оси Z , Y и суммы моментов относительно оси X в точке A без учета моментов от q_y , q_z , как бесконечно малых второго порядка малости:

$$\Sigma Z=0: -N+(N+dN) \cdot \cos d\varphi + (Q+dQ) \cdot \sin d\varphi + q_z \cdot dS=0, \quad (2.1)$$

$$\Sigma Y=0: -Q+(Q+dQ) \cdot \cos d\varphi - (N+dN) \cdot \sin d\varphi + q_y \cdot dS=0, \quad (2.2)$$

$$\Sigma M_{xA}=0: -M+(M+dM) - (Q+dQ) \cdot dS \cdot \cos d\varphi=0. \quad (2.3)$$

С учетом бесконечно малого угла $d\varphi$, считаем, что $\cos d\varphi \approx 1$, $\sin d\varphi \approx d\varphi$, $dQ \cdot d\varphi \approx 0$, $dN \cdot d\varphi \approx 0$. Тогда система уравнений равновесия принимает вид:

$$\frac{dN}{d\varphi} + Q + q_z r = 0, \quad (2.4)$$

$$\frac{dQ}{d\varphi} - N + q_y r = 0, \quad (2.5)$$

$$\frac{dM}{d\varphi} - Q_x r = 0. \quad (2.6)$$

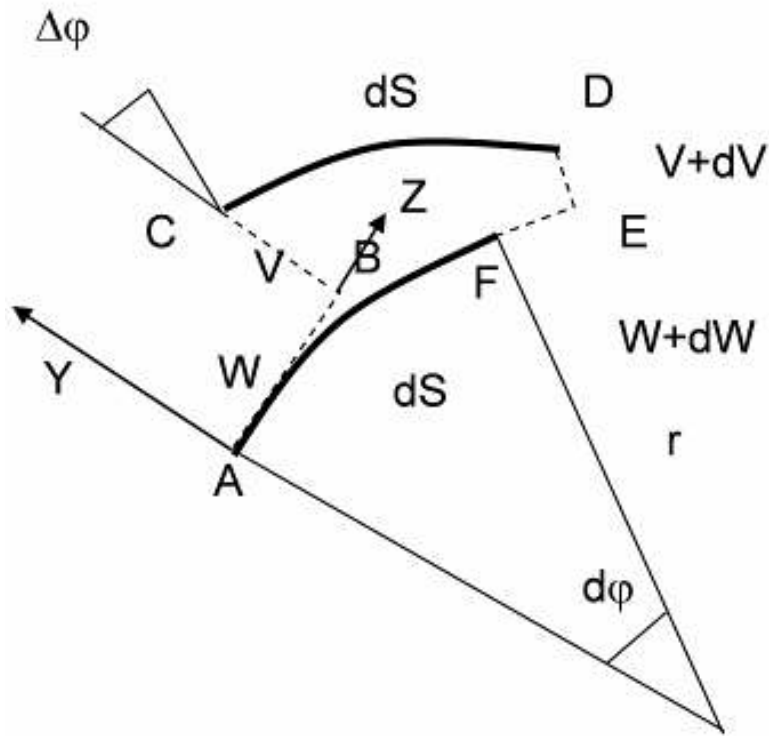


Рис.2.2. Геометрические соотношения для кругового стержня

Рассмотрим геометрические и физические соотношения. При этом пренебрегаем изменением длины дуги dS до и после нагружения и учитываем только перемещения сечений вдоль осей Y, Z соответственно V, W и относительный угол поворота сечений $\Delta\varphi$ (рис.2.2).

Заменяя малые дуги dS их длинами, спроецируем замкнутую ломаную ABCDEF на оси Z и Y соответственно:

$$W + dS \cdot \cos \Delta\varphi - (V + dV) \cdot \sin d\varphi - (W + dW) \cdot \cos d\varphi - dS = 0, \quad (2.7)$$

$$V - dS \cdot \sin \Delta\varphi - (V + dV) \cdot \cos d\varphi + (W + dW) \cdot \sin d\varphi = 0. \quad (2.8)$$

Отбрасывая бесконечно малые величины второго порядка, с учетом того, что $\cos d\varphi \approx 1$, $\sin d\varphi \approx d\varphi$, $\cos \Delta\varphi \approx 1$, приводим полученную систему к виду

$$\frac{dW}{d\varphi} + V = 0, \quad (2.9)$$

$$W - \frac{dV}{d\varphi} = r \cdot \Delta\varphi. \quad (2.10)$$

Для дальнейших рассуждений воспользуемся известным выражением для изменения кривизны стержня, нагруженного изгибающим моментом:

$$\Delta k = M / EI_x. \quad (2.11)$$

Кривизна в общем случае определяется выражением

$$k = d\varphi / ds, \quad (2.12)$$

значит, приращение кривизны

$$k = \Delta d\varphi / ds = d\Delta\varphi / r\Delta\varphi = \Delta\varphi' / r. \quad (2.13)$$

С учетом изложенного получим физическое соотношение:

$$\frac{\Delta d\varphi}{ds} = \frac{Mr}{EI_x} \quad (2.14)$$

Таким образом, три уравнения равновесия, два геометрических и физическое соотношение, образуют полную математическую модель кругового стержня постоянной кривизны, нагруженного внешними силами заданной интенсивности:

$$\frac{dN}{d\varphi} = -Q - q_z r, \quad (2.15) \quad \frac{dW}{d\varphi} = -V, \quad (2.18)$$

$$\frac{dQ}{d\varphi} = N - q_y r, \quad (2.16) \quad \frac{dV}{d\varphi} = W - r \cdot \Delta\varphi \quad (2.19)$$

$$\frac{dM}{d\varphi} = Q_x r, \quad (2.17) \quad \frac{\Delta d\varphi}{ds} = \frac{Mr}{EI_x} \quad (2.20)$$

В основу решения положена схема Эйлера численного интегрирования систем дифференциальных уравнений первого порядка, в которой производная функции f в точке $(i+1)$ представлена в виде:

$$\frac{df}{d\varphi} = f_{i+1} - f_i \quad (2.21)$$

где $\delta\varphi = 2\pi/n$ - шаг приращения текущего угла φ , который должен быть достаточно мал, что достигается, например, для замкнутого кругового стержня, при $n \geq 360$.

При таком подходе система рассматриваемых шести дифференциальных уравнений в упругой стадии деформирования может быть представлена в виде:

$$N_{i+1} = N_i - (Q_i + q_{zi} \cdot r) \cdot \delta\varphi, \quad (2.22)$$

$$Q_{i+1} = Q_i + (N_i - q_{yi} \cdot r) \cdot \delta\varphi, \quad (2.23)$$

$$M_{i+1} = M_i + Q_i \cdot r \cdot \delta\varphi, \quad (2.24)$$

$$W_{i+1} = W_i - V_i \cdot \delta\varphi, \quad (2.25)$$

$$V_{i+1} = V_i + (W_i - r \cdot \Delta\varphi_i) \cdot \delta\varphi, \quad (2.26)$$

$$\Delta\varphi_{i+1} = \Delta\varphi_i + (M_i \cdot r / EI_{ix}) \cdot \delta\varphi, \quad (2.27)$$

где V, W – прогиб и продольное перемещение оси арки, N, Q, M – внутренние усилия в сечении арки, φ – угол поворота оси арки при изгибе, E - модуль упругости

материала арки, I_x – момент инерции поперечного сечения арочного фрагмента перекрытия, r – радиус изгиба арки.

Для определения шести начальных параметров ($Q_o = Q_y(\varphi = 0)$, $N_o = N(\varphi = 0)$, $M_o = M(\varphi = 0)$, $V_o = V(\varphi = 0)$, $W_o = W(\varphi = 0)$, $\Delta\varphi_o = \Delta\varphi(\varphi = 0)$) в конкретной задаче всегда формулируются достаточное количество граничных условий, так как при любом закреплении концов стержня на каждом из них известны три условия:

- жесткое закрепление $V = 0$, $W = 0$, $\varphi = 0$;
- шарнирно-неподвижное закрепление $M = 0$, $V = 0$, $W = 0$;
- шарнирно-подвижное закрепление $M = 0$, $V = 0$, $N = 0$;
- свободный конец $M = 0$, $Q_y = 0$, $N = 0$ и т.д.

Используя предложенную схему, процесс интегрирования легко реализуется в среде электронных таблиц Excel при произвольных начальных параметрах. Отыскание начальных параметров, соответствующих заданным граничным условиям, производится с помощью стандартной процедуры Excel «Поиск решения». В данной процедуре применен метод Ньютона подбора значений начальных параметров N_o , Q_o , M_o , W_o , V_o , $\Delta\varphi_o$, обеспечивающих выполнение стандартного набора граничных условий, сформулированных в виде целевой функции. Данная математическая модель позволяет задавать любые виды загрузок и жесткостей.

Рассмотрим двухслойное арочное покрытие из листового профнастила длиной L и высотой подъема f , радиусами r_1 и r_2 (рис. 2.3).

Ввиду того, что при расчете покрытий в качестве основной принимается снеговая нагрузка, распределенная по всей поверхности кровли, расчет допускается проводить для погонного метра ширины, то есть при составлении расчетной схемы покрытие рассматривать не как цилиндрический свод, а криволинейный арочный стержень с заданными геометрическими характеристиками.

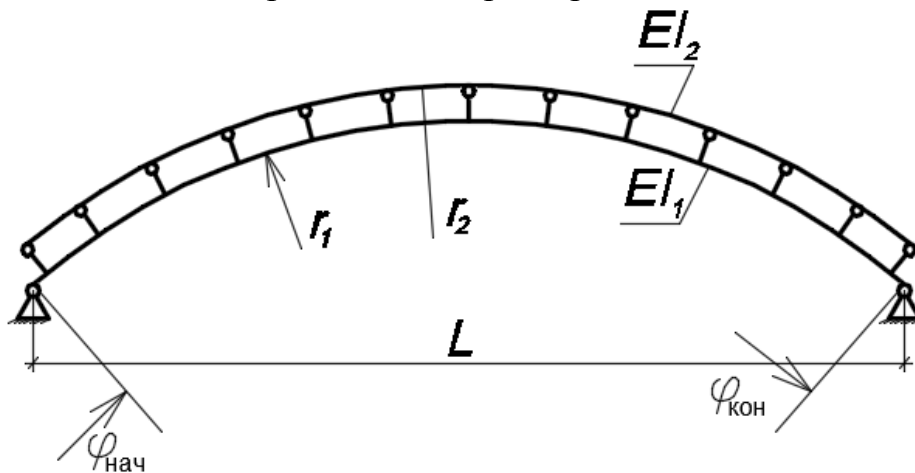


Рис.2.3. двухслойное арочное покрытие

Двухслойное покрытие с упругим наполнителем образовано двумя слоями профнастила разделенными утеплителем, который по всей длине приклеен к настилам, с системой термопрофилей. В нашем случае работой термопрофиля из тонколистовой стали пренебрегаем, поскольку он необходим только на стадии заполнения свода полистиролбетонным утеплителем.

Ввиду сложного напряженно-деформированного состояния системы «верхний слой – эффективный утеплитель - нижний слой» было решено в расчетной схеме

заменить полистиролбетон системой несжимаемых стержней постоянного сечения, шарнирно закрепленным к верхнему слою и жестко к нижнему (рис. 2.5).

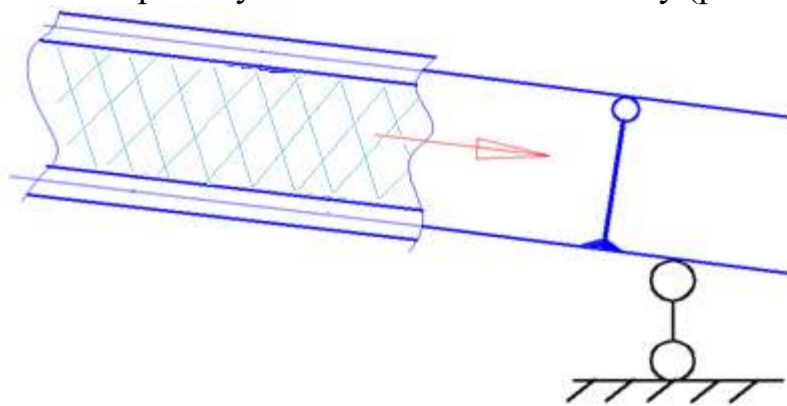


Рис. 2.5. Замена в расчетной схеме реального термопрофиля на эквивалентный стержень

Заменяющий стержень имеет сдвиговую жесткость в линейной области равную сдвиговой жесткости фрагмента полистиролбетона. Сдвиговая жесткость заполнителя определяется по результатам конечно-элементного моделирования.

Данная математическая модель позволяет задавать любые виды нагрузок на конструкцию бескаркасного цилиндрического свода, любые виды поперечных сечений конструкции свода через приведенные характеристики.

Третья глава посвящена определению приведенных геометрических характеристик поперечных сечений бескаркасных цилиндрических сводов, в которых эффективный утеплитель имеет адгезионные связи с настилами свода.

Для упрощенного моделирования двухслойных панелей с упругим наполнителем их можно заменить пластинами с толщинами, при которых их момент инерции будет эквивалентен. То есть:

$$I_{red} = I_{np}.$$

Представим сечение в виде двух стальных пластин, у которых центры тяжести расположены друг от друга на расстоянии равном $h_{пб\ экв} + h_{ст\ экв}$ (Рис. 3.7).

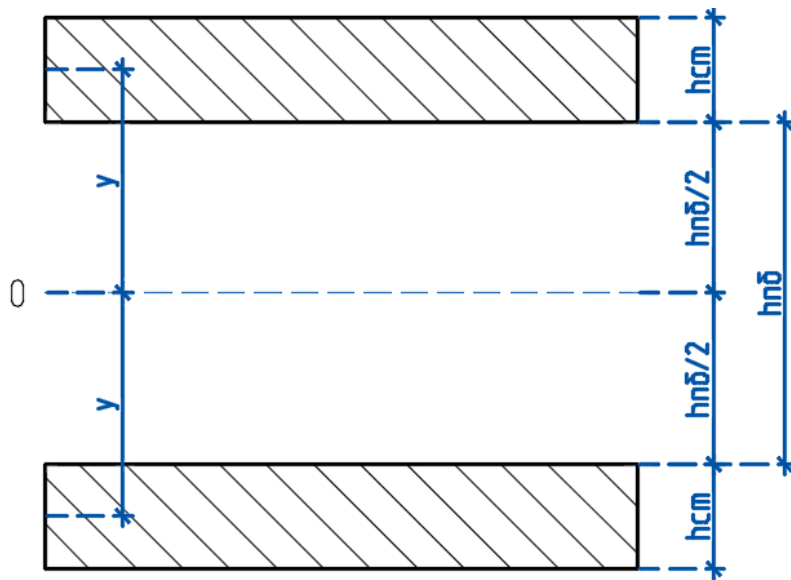


Рис. 3.7 Эквивалентное сечение

$h_{см экв}$ определяется из условия равенства моментов инерции поперечного сечения пластин прямоугольного профиля, расположенных на расстоянии $h_{экв} = 112,4$ мм (высота связевого элемента) друг от друга и момента инерции приведенного сечения двухслойной панели с упругим наполнителем I_{red} (Рис.3.2).

Момент инерции эквивалентного сечения определяется по формуле:

$$I_{пр} = 2 \frac{bh_{см.экв}^3}{12} \alpha + 2bh\alpha y^2 \left(\frac{1}{\beta}\right);$$

где, $\alpha = E_s / E_b = 1615$ - коэффициент приведения;

$\beta = b \cdot h_{см} / A_s = 1140 \cdot 14,6 / 93,3 = 17,84$ - коэффициент приведения;

где, $h_{см}$ – толщина прямоугольной пластины, определяемая из условия равенства моментов инерции поперечных сечений со стальным профилированным настилом ($h_{см} = 14,6$ мм).

Для решения полученного уравнения и выражения из него $h_{см.экв}$ используем формулу Кардано. После всех преобразований получаем:

$$h_{см.экв} = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{D}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{D}};$$

где, $D = (q/2)^2 + (p/3)^2$; $q = -6I / b\alpha$; $p = 12y^2 (1/\beta)$.

В результате расчета $h_{см экв} = 15,3$ мм.

Влияние шага постановки эквивалентных стержней на прогибы двухслойных панелей с упругим наполнителем

Для исследования влияния шага постановки связевых элементов на прогибы двухслойных панелей с упругим наполнителем с эквивалентным поперечным сечением в ПК Лири-САПР выполнено моделирование.

Панели пролетом 6000 мм моделировалась из следующих конечных элементов:

- Тип 44 – универсальный четырех узловой конечный элемент оболочки;

Конечным элементам верхнего и нижнего профилированного настила назначены следующие характеристики:

Тип 44 – $E = 1,12 \cdot 10^6$ т/м²; $V = 0,3$; $h = 1,53$ см. Собственный вес пластин в расчете не учитывался.

Конечным элементам, моделирующим связи назначены следующие характеристики:

Тип 44 – $E = 1,12 \cdot 10^6$ т/м²; $V = 0,3$; $h = 1,4$ см. (толщина связевого элемента варьировалась в зависимости от шага). Собственный вес пластин в расчете не учитывался.

На верхний слой двухслойной панели с упругим наполнителем задавалась равномерно распределенная нагрузка интенсивностью 1 кПа.

Общий вид на конечно элементную модель двухслойной панели с упругим наполнителем приведен на рис. 3.8.

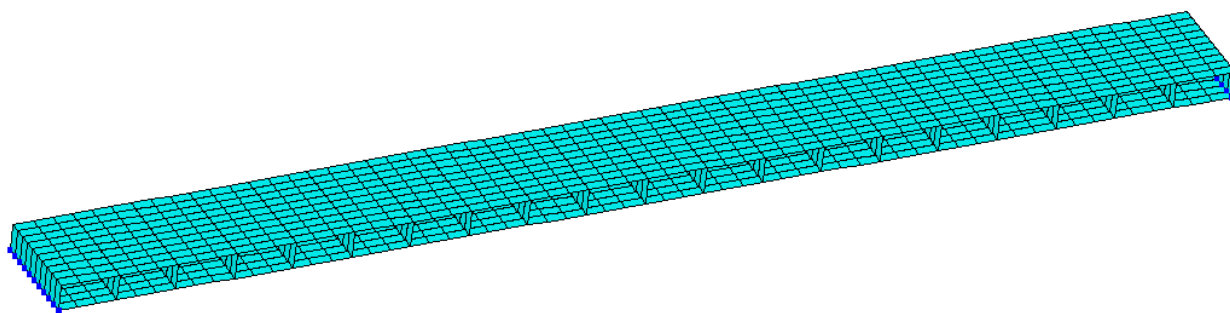


Рис. 3.8 Конечно элементную модель двухслойной панели с упругим наполнителем при шаге эквивалентных стержней 200 мм.

В результате расчета получены значения прогибов двухслойных панелей с упругим наполнителем от действия равномерно распределенной нагрузки. Результаты расчета приведены в табл. 3.3, рис. 3.9

Таблица 3.3

S – шаг эквивалентных стержней, мм	V – прогиб двухслойных панели, мм (Рис. 3.9)	f – прогиб сэндвич панели, мм (Рис. 3.3)	V/f
300	19,2	15,5	1,24
200	17,0		1,10
100	16,5		1,06

С уменьшением шага эквивалентных стержней значения прогибов в двухслойной панели уменьшаются. Если произвести сравнение с прогибом сэндвич панели (п.3.3), то можно получить корректирующий коэффициент $V/f \approx 1,1$, на который необходимо умножать значение модуля упругости при расчете двухслойных

панелей с упругим наполнителем при использовании математической модели приведённой в главе 2.

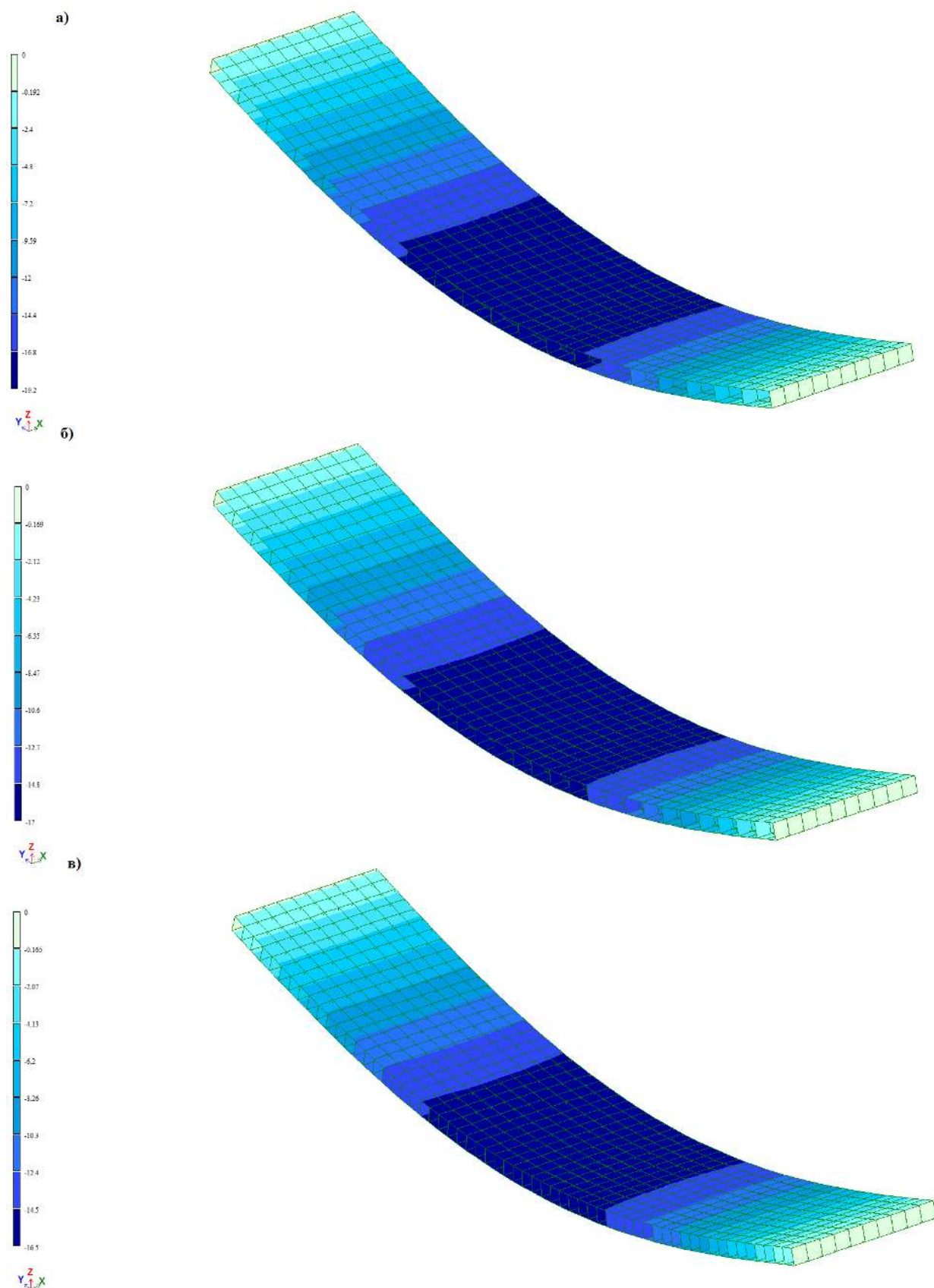


Рис. 3.9 Значения прогибов двухслойных панелей с упругим наполнителем от действия равномерно распределенной нагрузки при шаге эквивалентных стержней а – 300 мм; б – 200 мм, в – 100 мм.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- приведена методика определения высоты связевых элементов необходимых для обеспечения теплотехнических характеристик бескаркасного цилиндрического свода;
- приведена методика определения параметров эквивалентного соединительного стержня;
- приведена методика определения приведенных характеристик эквивалентных двухслойных панелей с упругим наполнителем по критерию изгибной жесткости, получены корректирующие коэффициенты.

Получены параметры приведенных сечений, необходимые для расчета фрагмента двухслойного бескаркасного цилиндрического свода с упругим наполнителем с использованием математической модели плоского кругового стержня, приведенной в главе 2, реализованной в общедоступном математическом редакторе Ms Excel (Прил.1).

Верхняя и нижняя обшивки из профилированного настила и заполнение из полистиролбетона двухслойного бескаркасного цилиндрического свода с упругим наполнителем заменены эквивалентными пластинами и связевыми элементами со следующими параметрами:

- верхняя и нижняя обшивка – эквивалентная пластина с геометрическими характеристиками поперечного сечения равными $h = 15,3$ мм, $b = 1140$ мм, из материала с модулем упругости $E = 11210$ МПа;

- связевые элементы – пластина с геометрическими характеристиками поперечного сечения $h = 112,4$ мм, $t = 14,05$ мм, из материала с модулем упругости $E = 11210$ МПа.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям конструкций бескаркасных цилиндрических сводов, в которых эффективный утеплитель имеет адгезионные связи с настилами свода с целью проверки достоверности формул, полученных в третьей главе данных.

Тонкостенные стальные связевые элементы в конструкции двухслойных бескаркасных цилиндрических сводов с упругим наполнителем при нагружении внешней нагрузкой испытывают сжимающие напряжения. Принципиальным отличием работы сжатого элемента от растянутого является потеря устойчивости. Таким образом, для связевых элементов одним из вариантов отказа является общая потеря устойчивости. При выходе стенки связевого элемента из плоскости, должно происходить отслаивание полистиролбетонного заполнителя от стальных элементов. Что должно повлечь за собой снижение несущей способности конструкции свода в целом.

Однако, стоит учитывать, что связевые элементы находятся в упругой среде, сформированной полистиролбетоном, который будет препятствовать потере устойчивости.

Для оценки влияния упругой среды на устойчивость связевых элементов выполнены расчеты в ПК Лира-САПР.

Упругая среда сформирована КЭ Тип 36 (универсальный пространственный восьми узловый изопарический конечный элемент). Значение модуля упругости изменялось в диапазоне от $E = 0,1$ т/м² до $E = 1000000$ т/м².

Связевой элемент сформирован КЭ Тип 41 (универсальный прямоугольный конечный элемент оболочки) со следующими параметрами:

$E=2.1 \cdot 10^7$ т/м², $V = 0,3$, $t = 1$ мм.

Высота связевого элемента $h = 250$ мм, ширина $b = 1000$ мм. Упругая среда от связевого элемента распределена на 200 мм в обе стороны.

Нагрузка на связевой элемент равномерно распределённая интенсивностью $q = 1$ кН/м.

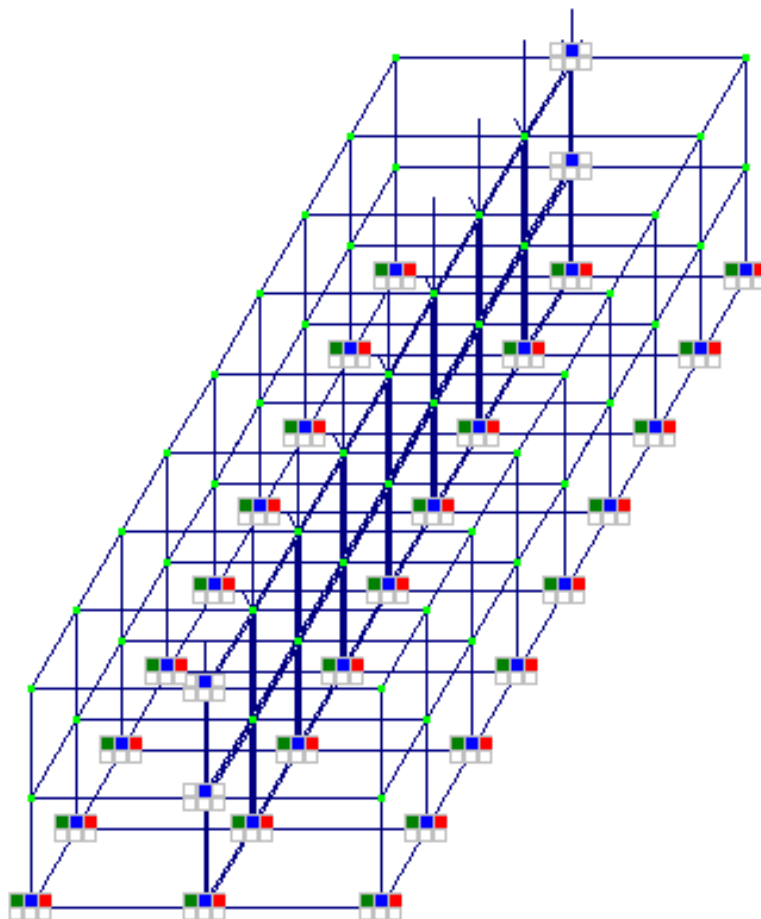


Рис. 4.1 Конечно элементная модель связевого элемента в упругой среде

В результате расчета получены значения коэффициента потери устойчивости (Табл. 4.1). Значение коэффициента устойчивости при расчете без упругой среды (по Эйлеру) составило 0,0944.

Из анализа данных таблицы 4.1 видно, что при увеличении модуля упругости значение коэффициента устойчивости возрастает. Однако увеличение коэффициента устойчивости происходит не линейно (Рис 4.2). При увеличении модуля упругости заполнения E до 25 МПа увеличение значение коэффициента потери устойчивости происходит нелинейно. После увеличения модуля упругости $E > 25$ МПа происходит резкое снижение приращения коэффициента потери устойчивости. Дальнейшее увеличение коэффициента k линейное.

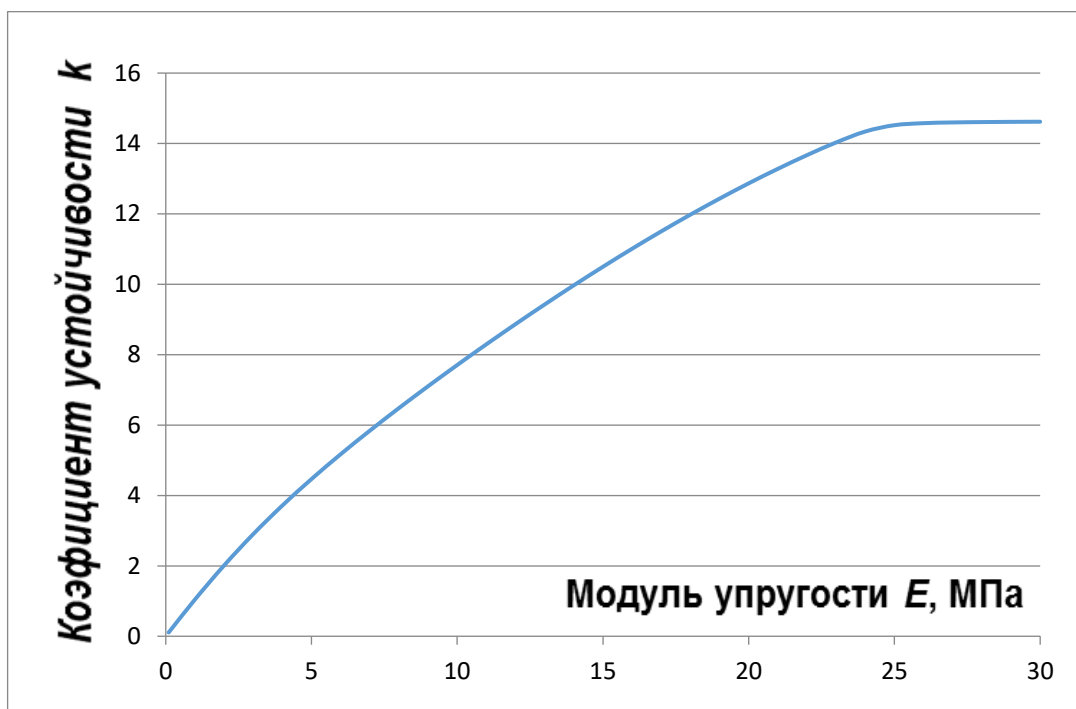
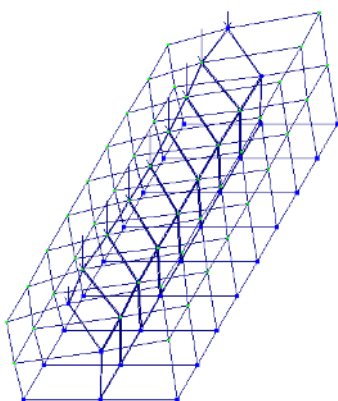


Рис. 4.2 Зависимость коэффициента устойчивости k от модуля упругости заполнения

Также, стоит отметить, что при значении модуля упругости заполнения $E < 25$ МПа потеря устойчивости происходит аналогично первой форме потери устойчивости по Эйлеру, далее по второй.

а)



б)

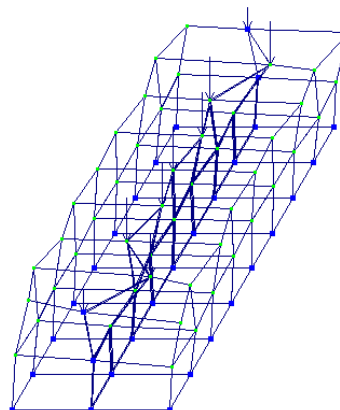


Рис. 4.3 Форма потери устойчивости при значении модуля упругости заполнения:
а) $E \leq 25$ МПа; б) $E > 25$ МПа

Таблица 4.1

$E, \text{т/м}^2$	k	$E, \text{т/м}^2$	k
0.1	0.1073	5000	15.2609
10	7.7067	6000	15.3831
20	12.868	7000	15.5051
30	14.6179	8000	15.627
40	14.6341	9000	15.7475
50	14.64	10000	15.8693
60	14.6436	20000	17.0841
70	14.6475	30000	18.2898
80	14.6509	40000	19.4879
90	14.6516	50000	20.6781
100	14.6538	60000	21.8648
200	14.6688	70000	23.0491
300	14.6828	80000	24.2257
400	14.6954	90000	25.4003
500	14.7088	100000	26.574
600	14.7216	200000	38.1626
700	14.7336	300000	49.6353
800	14.7462	400000	61.0389
900	14.7571	500000	72.4197
1000	14.7692	600000	83.7663
2000	14.8936	700000	95.112
3000	15.0147	800000	106.455
4000	15.139	900000	117.768
5000	15.2609	1000000	129.092

Значение начального модуля упругости полистиролбетонного заполнителя составляет $E = 130$ МПа (начальный модуль упругости полистиролбетона марки по средней плотности D150), при этом значении E величина коэффициента потери устойчивости составляет порядка $k = 14,6$. То есть, другими словами, потеря устойчивости связевого элемента должна произойти при приложении к нему погонной нагрузки интенсивностью $q = 14,6$ кН/м. Что в принципе не возможно при действии на двухслойный бескаркасный цилиндрический свод с упругим наполнителем расчетных нагрузок от снега и ветра.

Таким образом, при значении модуля упругости $E > 25$ МПа нужно уже говорить не об устойчивости связевых элементов в упругой среде, а о прочности упругой среды с включениями в виде связевых элементах. Так как связевой элемент не может потерять устойчивость пока не произойдет разрушение заполнения из полистиролбетона.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- потеря устойчивости связевых элементов при действии на двухслойный бескаркасный цилиндрический свод с упругим наполнителем расчетных нагрузок от ветра и снега не происходит.

Пятая глава посвящена эксперименту. Цель экспериментальных исследований – изучение действительной работы элементов двухслойных бескаркасных цилиндрических сводов с упругим наполнителем.

В процессе эксперимента предусмотрено:

- исследовать работу фрагментов двухслойных бескаркасных цилиндрических сводов с упругим наполнителем из полистиробетона под нагрузкой;
- отработать технологию изготовления фрагментов двухслойных бескаркасных цилиндрических сводов с упругим наполнителем из полистиробетона;
- выполнить апробацию математической модели напряженно-деформированного состояния плоского кругового стержня применительно к фрагментам двухслойных бескаркасных цилиндрических сводов с упругим наполнителем из полистиробетона.

Исследование работы двухслойных бескаркасных цилиндрических сводов с упругим наполнителем из полистиробетона сопряжено со значительными трудностями поскольку площадь одной ячейки составляет $12 - 20 \text{ м}^2$. Испытание таких сооружений требует громоздкой установки, большого количества приборов, материалов и занимает много времени, поскольку необходимы неоднократные повторения эксперимента.

Для изучения действительной работы двухслойных бескаркасных цилиндрических сводов с упругим наполнителем из полистиробетона, на первом этапе, можно ограничиться фрагментом.

Исследование фрагмента позволяет достичь сразу несколько целей при минимальных материальных затратах, а именно;

- отработать технологию заполнения двухслойных бескаркасных цилиндрических сводов полистиролбетоном (технологию изготовления);
- исследовать совместную работу настилов свода с полистиролбетоном без каких-либо дополнительных конструктивных мероприятий, обеспечивающих сцепление материалов;
- выявить характер разрушения фрагмента двухслойного бескаркасного цилиндрического свода;
- исследовать работу фрагментов двухслойных бескаркасных цилиндрических сводов с упругим заполнением из полистиробетона под нагрузкой.

Поэтому было решено проводить исследование на фрагментах шириной $B = 1140 \text{ мм}$ пролетом $l = 6000 \text{ мм}$ (Рис. 5.1- 5.3.).

Для проведения экспериментальных исследований предусмотрена однопролетная разрезная схема. Нагрузка, равномерно распределённая по площади. В качестве контрольных грузов использовались тарированные бетонные блоки со средней массой $18,3 \text{ кг}$ (Приложение 3).

Для фиксации прогибов использовался прогибомер Максимова, установленный в середине пролета.



Рис.5.1 – Испытуемый образец



Рис. 5.2 Испытуемый образец

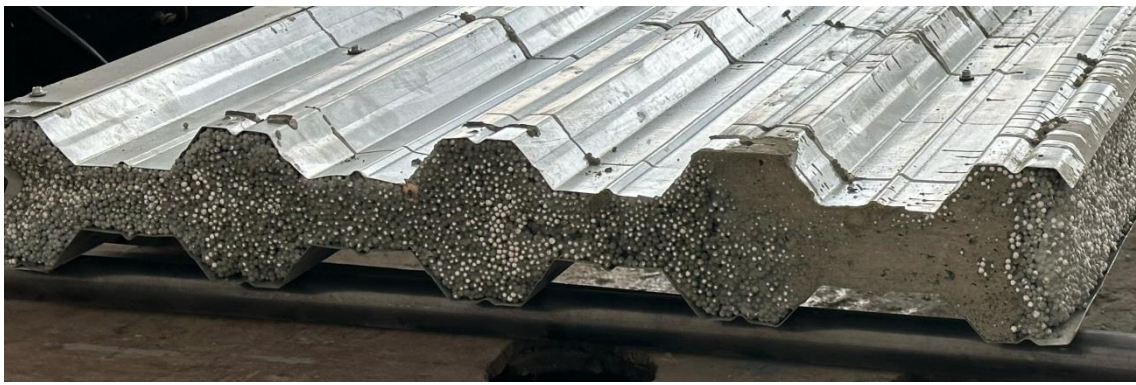


Рис. 5.3 Испытуемый образец

Испытание фрагмента двухслоного бескаркасного цилиндрического свода с упругим заполнением из полистиролбетона

На действие равномерно распределенной нагрузки испытан один опытный фрагмент двухслоного бескаркасного цилиндрического свода с упругим заполнением из полистиролбетона. Расчетная схема испытаний приведена на рисунке 5.4. Геометрические характеристики опытного фрагмента приведены на рисунке 5.5.

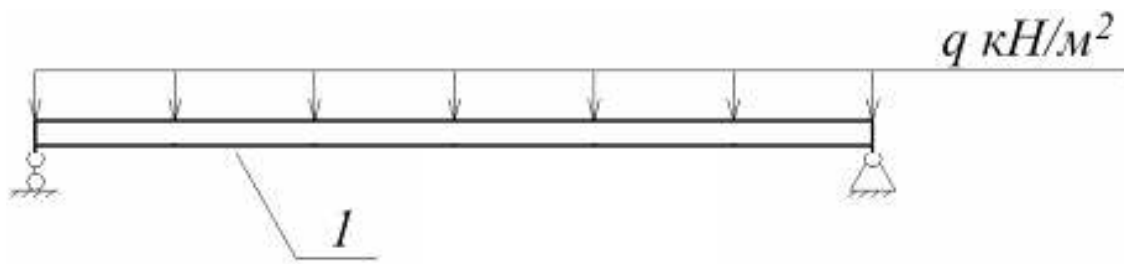


Рис. 5.4 Схема испытания фрагмента бескаркасного цилиндрического свода
1 – испытуемый образец

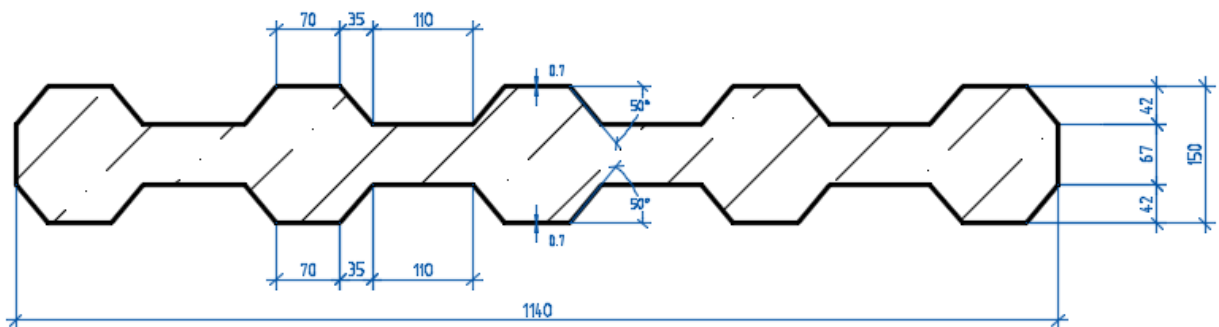


Рис. 5.5 Геометрические характеристики поперечного сечения сэндвич панели

В таблице 5.1 приведены значения нагрузок по ступеням загрузжений и показания прогибомера.

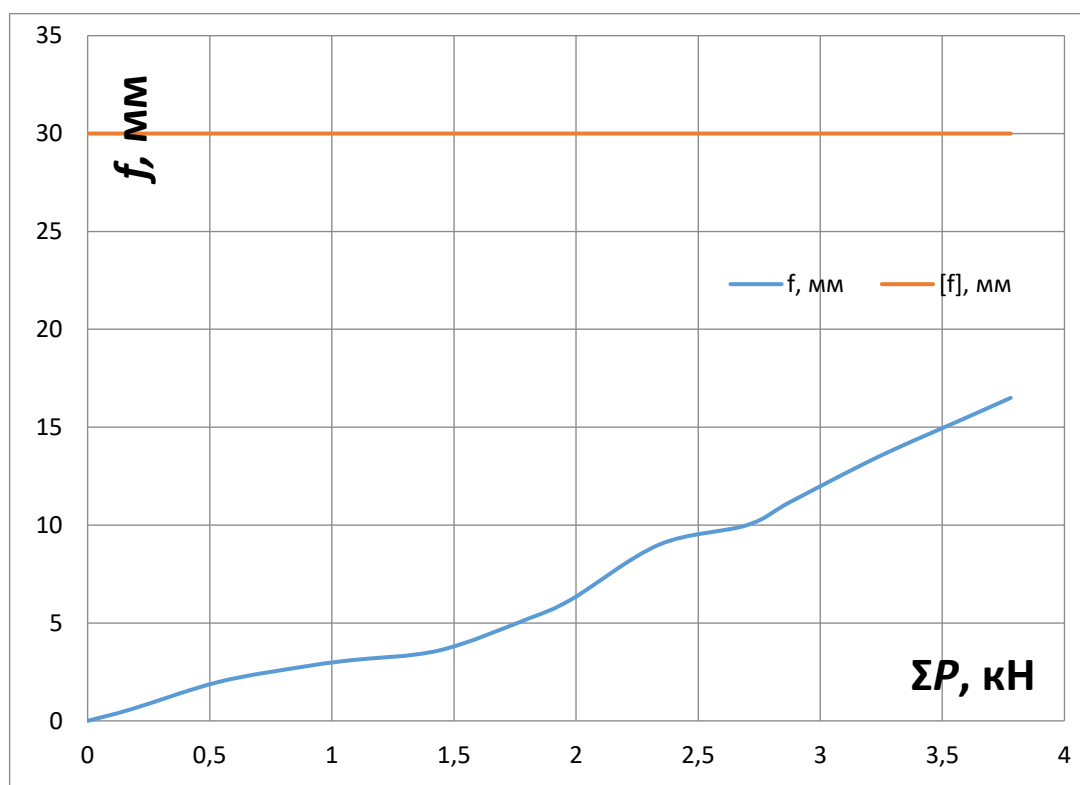


Рис. 5.6 Диаграмма зависимости прогибов опытного образца от нагрузки

Таблица 5.1

Таблица зависимости прогибов опытного образца от нагрузки

№ п/п	кол-во грузов	$\Sigma P, \text{ кН}$	$f, \text{ мм}$	$q_{\text{экв}}, \text{ кПа}$	$[f], \text{ мм}$
1	0	0	0	0	30
2	1	0.18	0.60	0.03	30
3	3	0.54	2.00	0.08	30
4	5	0.90	2.80	0.13	30
5	6	1.08	3.10	0.16	30
6	8	1.44	3.60	0.21	30
7	10	1.80	5.20	0.26	30
8	11	1.98	6.20	0.29	30
9	13	2.34	9.00	0.34	30
10	15	2.70	10.00	0.39	30
11	16	2.88	11.20	0.42	30
12	18	3.24	13.50	0.47	30
13	20	3.60	15.50	0.53	30
14	21	3.78	16.50	0.55	30
15	23	4.14	-	0.61	30

В связи с тем, что внешняя нагрузка прикладывалась к опытному образцу от середины к краям на диаграмме (рис. 5.6) заметны переломы. Однако, если зависимость прогибов от приложенной нагрузки сформировать только по полным ступеням (5 грузов, 10 грузов, 15 грузов, 20 грузов) диаграмма преобразуется и принимает следующий вид (рис. 5.7).

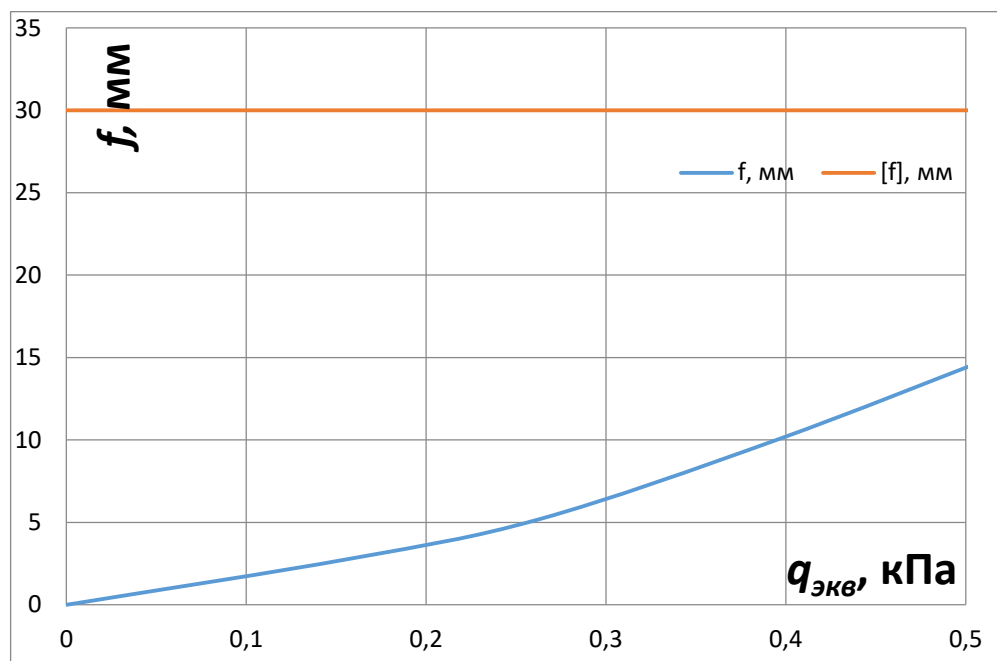


Рис. 5.7 Диаграмма зависимости прогибов опытного образца от нагрузки





Рис. 5.8 Опытный образец под нагрузкой





Рис. 5.9 Характер разрушения опытного образца

Разрушение опытного образца произошло при эквивалентной равномерно распределенной нагрузке $q_{экв} = 0.61$ кПа. Разрушение произошло из-за отслоения профилированного настила от полистиролбетона на опорном участке и сквозного разрыва заполнения (рис. 5.9).

По результатам испытаний было установлено:

- полистиролбетон без каких-либо конструктивных связей сцепляется с настилами двухслойного бескаркасного цилиндрического свода;
- опытный образец был испытан по разрезной однопролетной схеме на действие равномерно распределенной нагрузки;
- разрушение опытного образца произошло при эквивалентной равномерно распределенной нагрузке $q_{экв} = 0.61$ кПа. Разрушение произошло из-за отслоения профилированного настила от полистиролбетона на опорном участке и сквозного разрыва заполнения;
- для повышения несущей способности двухслойного бескаркасного цилиндрического свода с упругим наполнителем необходимо обеспечить увеличение сцепления заполнения полистиролбетона с настилами свода;
- увеличение сцепления заполнения полистиролбетона с настилами свода можно обеспечить увеличением марки полистиролбетонного заполнителя. Это не только обеспечит лучшие условия сцепления, но и напрямую увеличит несущую способность и жесткость свода;
- увеличение марки заполнителя скажется на снижении теплотехнических характеристик. Для обеспечения прежнего уровня теплозащитных свойств необходимо будет увеличить толщину свода, что в свою очередь увеличит расстояние

между настилами. Это еще увеличит несущую способность свода, но и утяжелит конструкцию;

- для дальнейших исследований необходимо будет проводить оптимизацию по следующим критериям: материалоемкость, собственный вес конструкции, несущая способность;

- еще одним способом обеспечения сил сцепления с настилами свода является применение составов увеличивающих адгезию. На этапе изготовления, до сбора двухслойного свода, нанесение на настилы с внутренней стороны эпоксидных клеев или адгезионных составов типа «Бетонконтакт», установка связевых элементов в своде с более частым шагом;

- необходимы дальнейшие исследования на действие длительных и повторяющихся нагрузок.

Шестая глава посвящена сравнению результатов расчета результатов численного моделирования с экспериментальными данными

Арочный фрагмент перекрытия длиной 6000 мм, со стрелой подъема 1 мм. При такой стреле подъема радиусом кривизны арки можно пренебречь и считать ее прямолинейным фрагментом.

В расчете использовались следующие параметры фрагмента двухслойного бескаркасного цилиндрического свода с упругим наполнителем:

- верхняя и нижняя обшивка – эквивалентная пластина с геометрическими характеристиками поперечного сечения равными $h = 15,3$ мм, $b = 1140$ мм, из материала с модулем упругости $E = 11210$ МПа;

- связевые элементы – пластина с геометрическими характеристиками поперечного сечения $h = 112,4$ мм, $t = 14,05$ мм, из материала с модулем упругости $E = 11210$ МПа.

Расчет производился на действие равномерно распределенной нагрузки интенсивностью 0,16 кПа, 0,26 кПа, 0,39 кПа, 0,53 кПа и 0,61 кПа.

В результате расчета получены данные о прогибах, моментах, продольных силах в эквивалентных обшивках свода. Результаты расчета, а так же результаты сравнения с экспериментальными данными приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Таблица зависимости прогибов образца от нагрузки

№ п/п	$q_{\text{экв}}$, кПа	$f_{\text{оп}}$, мм	$f_{\text{теор}}$, мм	%
1	0	0	0	0
2	0.16	2.80	2.47	11.20
3	0.26	5.20	4.70	10.00
4	0.39	10.00	8.50	15.00
5	0.53	15.50	13.00	16.10

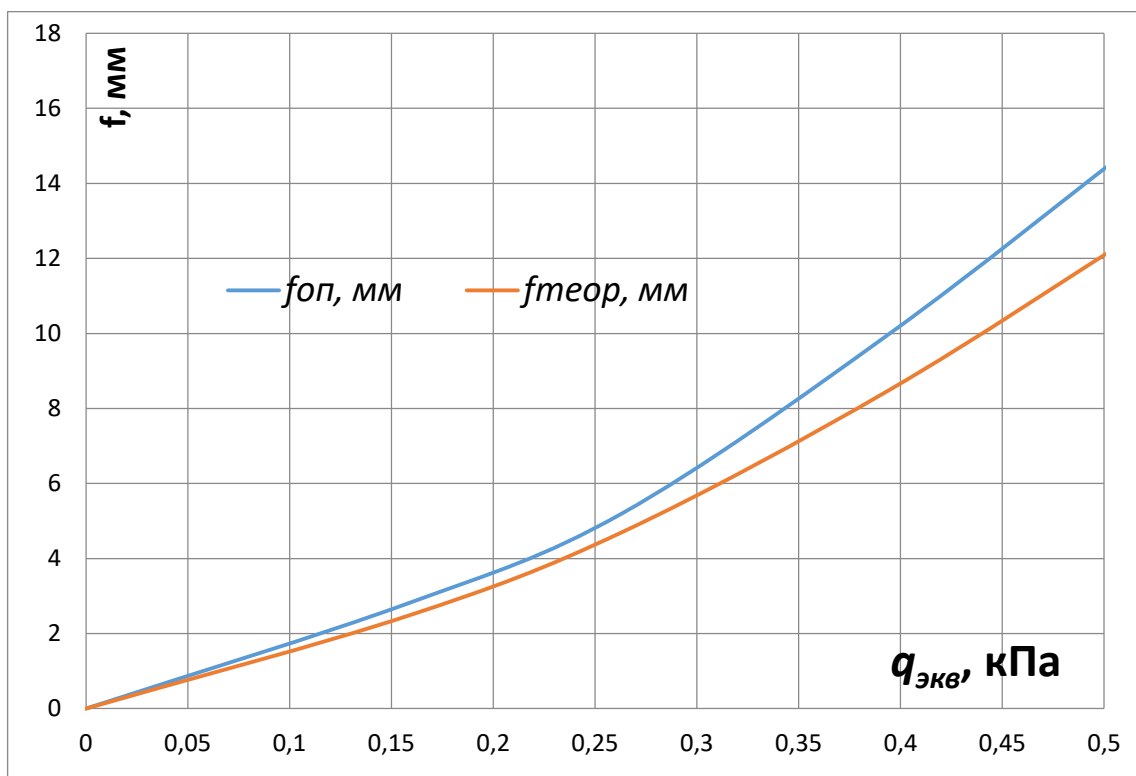


Рис. 6.1 Диаграмма зависимости прогибов фрагмента свода от нагрузки

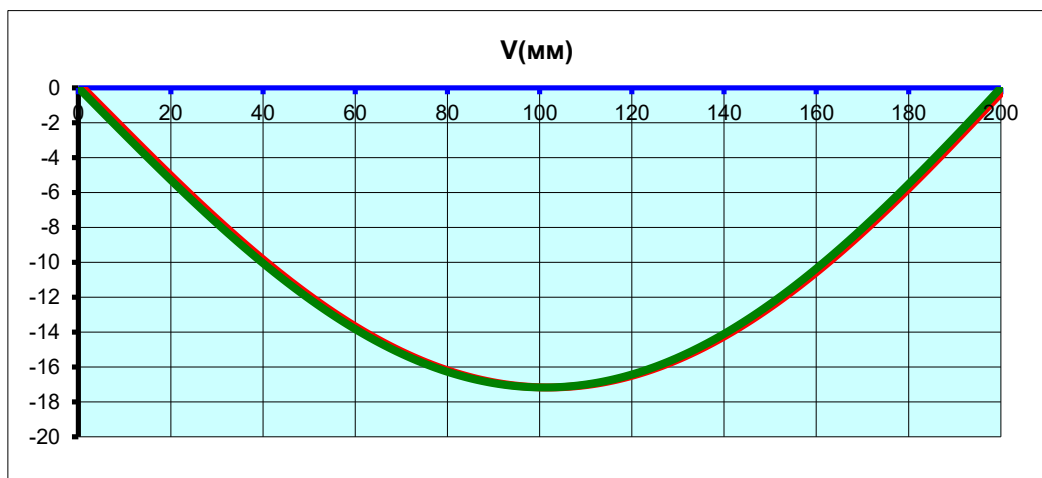


Рис. 6.2 Значения прогибов в эквивалентных обшивках свода при равномерно распределенной нагрузке 0,61 кПа.

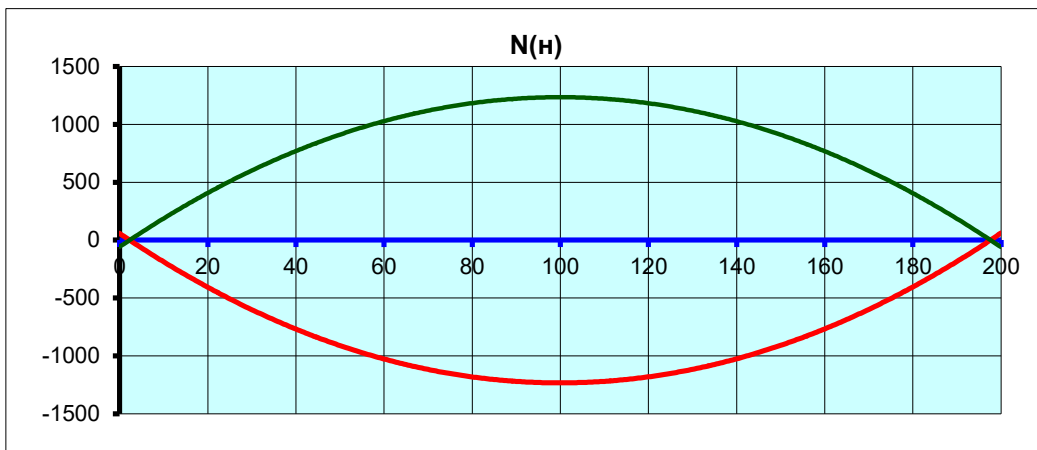


Рис. 6.3 Значения продольных сил в эквивалентных обшивках свода при равномерно распределенной нагрузке 0,61 кПа.

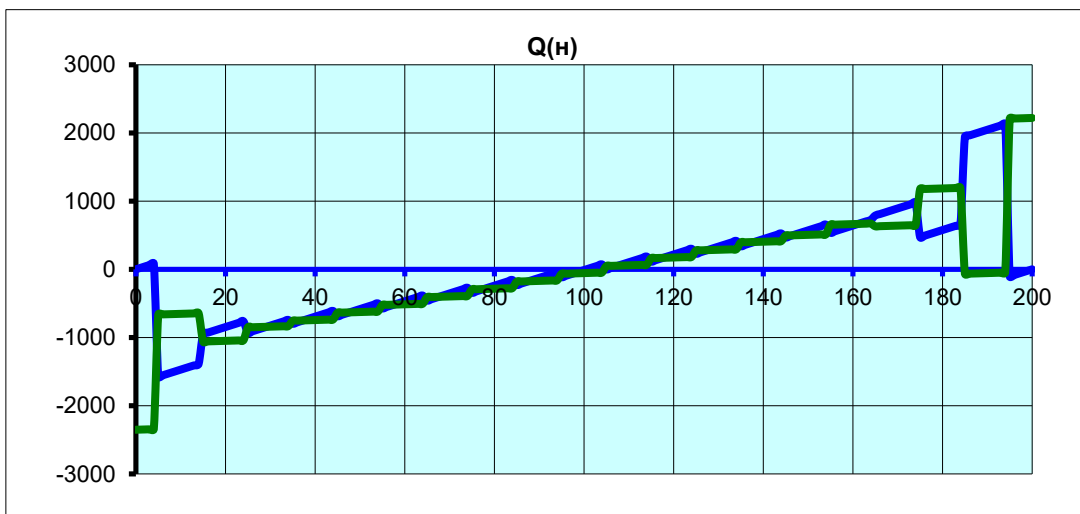


Рис. 6.4 Значения поперечных сил в эквивалентных обшивках свода при равномерно распределенной нагрузке 0,61 кПа.

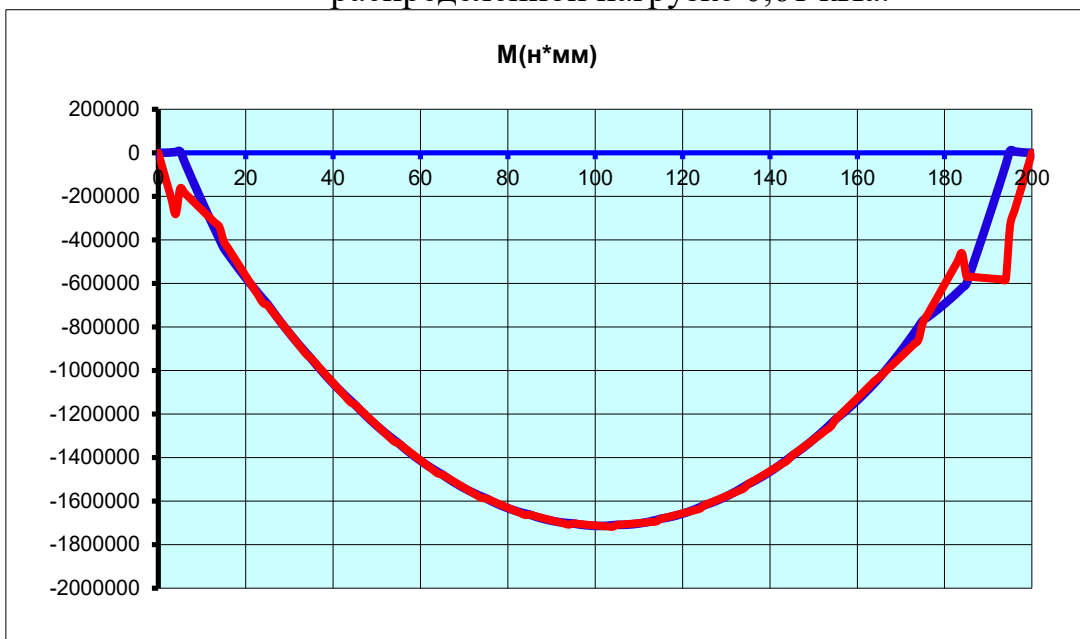


Рис. 6.5 Значения изгибающих моментов в эквивалентных обшивках свода при равномерно распределенной нагрузке 0,61 кПа.

В результате расчета и сравнения максимальное расхождение опытных и теоретических данных составило 16,1%. Это достаточно для инженерных расчетов на стадии технико-экономического обоснования строительства.

Увеличение расхождения результатов расчета по мере увеличения нагрузки объясняется тем, что расчеты в программном комплексе Ms Excel выполнены для идеально упругой системы, без дефектов. При увеличении нагрузки в полистирол бетоне начали проявляться пластические деформации, из-за которых происходит снижение модуля упругости материала и как следствие увеличение прогибов.

В дальнейшем данное обстоятельство необходимо учитывать введением в расчет модуля деформации полистиролбетона, основанного на упругопластической диаграмме состояния материала под нагрузкой.

Для уменьшения пластических деформаций в полистиролбетона целесообразно увеличить его марку по прочности и средней плотности.

Заключение:

1. Полистиролбетон является наиболее оптимальными материалам для формирования упругой среды, в которой работают связевых элементы в составе двухслойных бескаркасных цилиндрических сводов.

2. Потеря устойчивости связевых элементов при действии на двухслойный бескаркасный цилиндрический свод с упругим наполнителем расчетных нагрузок от ветра и снега не происходит.

3. Главным способом обеспечения совместной работы полистиролбетонного утеплителя с арочными профилированными настилами, формирующими верхний и нижний слои двухслойного бескаркасного цилиндрического свода является адгезия и наличие связевых элементов.

4. Приведена математическая модель напряженно-деформированного состояния плоского кругового стержня. Данная математическая модель позволяет задавать любые виды загрузок и жесткостей. Расчет математической модели выполняется методом начальных параметров в математической среде Ms Excel при помощи стандартной процедуры «Поиск решения».

5. Приведена методика определения высоты связевых элементов необходимых для обеспечения теплотехнических характеристик бескаркасного цилиндрического свода; методика определения параметров эквивалентного соединительного стержня; методика определения приведенных геометрических характеристик эквивалентных сечений двухслойных панелей с упругим наполнителем по критерию изгибной жесткости.

6. Получены параметры приведенных сечений обшивок и связевых элементов, необходимые для расчета фрагмента двухслойного бескаркасного цилиндрического свода с упругим наполнителем с использованием математической модели плоского кругового стержня, реализованной в общедоступном математическом редакторе Ms Excel.

7. По результатам испытаний было установлено:

- полистиролбетон без каких-либо конструктивных связей сцепляется с настилами двухслойного бескаркасного цилиндрического свода;
- опытный образец был испытан по разрезной однопролетной схеме на действие равномерно распределенной нагрузки;

- разрушение опытного образца произошло при эквивалентной равномерно распределенной нагрузке $q_{\text{экв}} = 0.61$ кПа. Разрушение произошло из-за отслоения профилированного настила от полистиролбетона на опорном участке и сквозного разрыва заполнения;

- в результате расчета и сравнения максимальное расхождение опытных и теоретических данных составило 16,1%. Это достаточно для инженерных расчетов на стадии технико-экономического обоснования строительства;

8. Одним из основных параметров, при расчете двухслойных бескаркасных цилиндрических сводов с упругим наполнителем является прогиб конструкции. При интеграции значений прогиба, полученных по предложенной методике, в математическую модель, предложенную К. Штаммом и Х. Витте появляется возможность оценивать не только напряженно-деформированное состояние настилов свода, но и полистиролбетонного заполнителя.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении:

- разработка методики расчета двухслойных бескаркасных цилиндрических сводов с упругим наполнителем, основанной на математической модели, предложенной в трудах К. Штамма и Х. Витте с использованием значений прогибов, полученных по предложенной методике;

- увеличение сил сцепления полистиролбетонного заполнителя с обшивками свода за счет различных конструктивных мероприятий;

- увеличение несущей способности бескаркасного цилиндрического свода за счет увеличения марки полистиролбетонного заполнителя по прочности и средней плотности;

- оптимизация структуры двухслойного бескаркасного цилиндрического свода с упругим наполнителем: по маркам профилированного настила для верхней и нижней обшивки свода; по марке полистиролбетонного заполнителя по прочности и средней плотности; количеству связевых элементов;

- исследования на действие длительных и повторяющихся нагрузок.

Список работ опубликованных по теме диссертации

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Вестнике **СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АКАДЕМИИ ВОЕННЫХ НАУК № 65** (Приложение к Вестнику Академии Военных Наук ISSN 2073-8641) Свидетельство о регистрации ПИ№ 77-12244 от 02.04.2002 г. Журнал Вестник АВН включен в перечень ВАК на тему: Анализ свойств теплоизоляционных материалов для формирования оптимальной упругой связевой среды элементов бескаркасных цилиндрических сводов.

В сборниках материалов конференций и других изданий:

1. VII Международную научно-практическую конференцию студентов, аспирантов и молодых учёных «Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных», приуроченной к 110-летию со дня рождения Т.В. Алексеевой на тему: Влияние совместной работы профилированного настила и эффективного утеплителя из телоизоляционного полистиролбетона на деформативность трехслойных бескаркасных цилиндрических сводов.

Приложение 1. Построение автоматического шаблона по расчету двухслойных арочных покрытий

Главной особенностью работы двухслойных арочных покрытий изготовленных из профилированного настила будет то, что две арки из верхнего и нижнего профилированного настила работают одновременно. Однако каждая из арок воспринимает свои нагрузки.

Верхняя арка из профилированного настила является ограждающей, она воспринимает нагрузку от снега, давления ветра. Все эти нагрузки являются распределенными и задаются в строгом соответствии с СП “Нагрузки и воздействия”.

Нижняя арка является несущей она воспринимает все нагрузки, которые воспринимает верхняя, но уже в виде сосредоточенных сил в местах установки термопрофилей. Также не стоит забывать про реакции опор, которые также являются сосредоточенными силами и вес утеплителя, который, как и снеговая и ветровая нагрузка является распределенной. Схема загрузки слоев двухслойного арочного покрытия приведена на рисунке П.1.1

Построение:

Запишем все исходные данные в ячейках листа MS Excel как показано в табл. П.1.1.

Таблица «Исходная геометрия арки» включает длину пролета покрытия L (мм), величину стрелы арки $h_{\text{ниж}}$ (мм), отношение радиуса арки к пролету r/L (вычисляется автоматически).

Таблица П.1.1. «Исходные данные»

ИСХОДНАЯ ГЕОМЕТРИЯ АРКИ	
$L, \text{ мм} =$	18500
$h_{\text{ниж}}, \text{ мм} =$	3500
$r / L =$	0.76

Нагрузка на нижнюю арку



Нагрузка на верхнюю арку

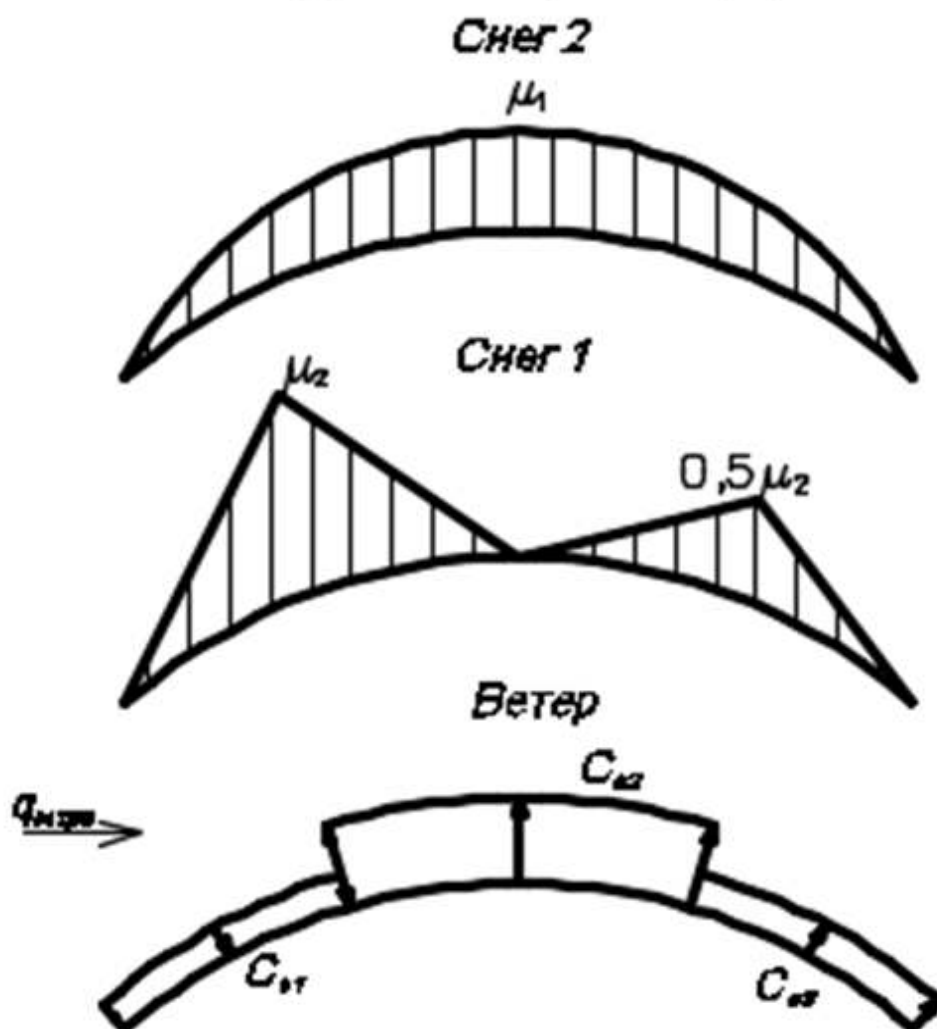


Рис.П.1.1. Нагрузки на двухслойное арочное покрытие

Необходимые для расчетов геометрические характеристики профилей запишем в таблицу (Табл. П.1.2).

Таблица «Геометрические характеристики профиля» заполняется копированием всей соответствующей строки для каждого слоя в отдельности из сортамента [140]. Также заполнение табл. П.1.2 возможно при помощи приведенных характеристик.

Таблица П.1.2. «Геометрические характеристики профиля»

	№ профиля	Толщина металла, t , мм	Площадь A , мм ² /м	Момент инер. J_x , мм ⁴ /м	Момент сопр. W_x , мм ³ /м	Высота сечения профиля H , мм	Собст. вес $q_{\text{соб}}$ н/мм/м	Вес арки шир. 1 м, кг
ВЕРХ	H60	1	1425	807800	19930	60	0.11186	212.07
НИЖН	H60	1.5	2135	1210700	31580	60	0.16760	315.46

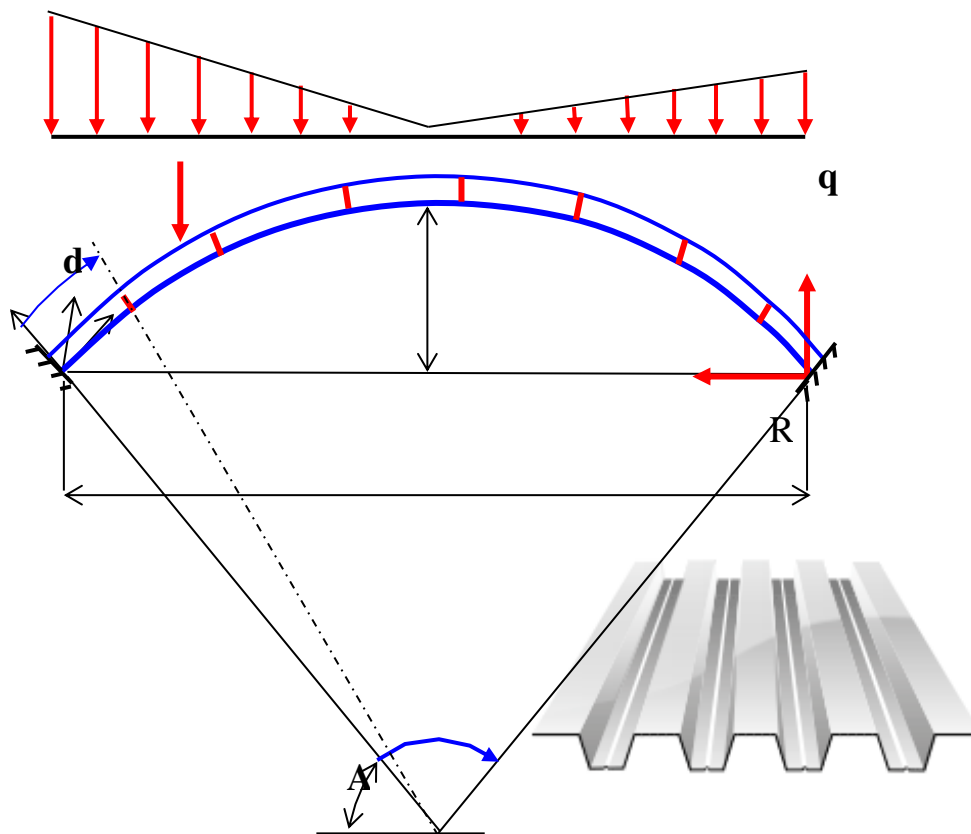


Рис. П.1.2. Первое основное сочетание нагрузок на арочное покрытие

В таблице содержатся следующие параметры гофрированных листов:

T - толщина гофрированного листа, мм;

A – площадь поперечного сечения гофрированного листа шириной 1 метр, мм²/м;

I_x – момент инерции поперечного сечения гофрированного листа шириной 1 метр, мм⁴/м;

W_x – момент сопротивления поперечного сечения гофрированного листа шириной 1 метр, мм³/м.

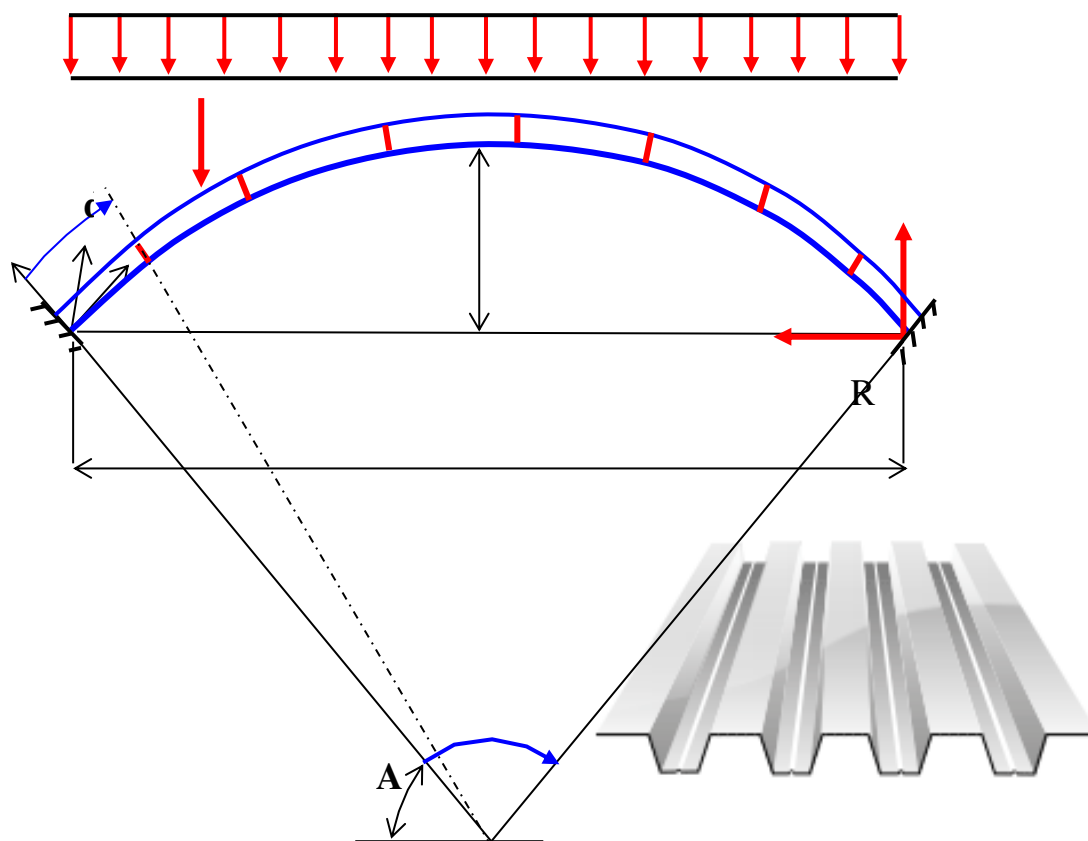


Рис. П.1.3. Второе основное сочетание нагрузок на арочное покрытие

Создадим таблицу «Нагрузки» в которую внесем значения нормативной снеговой нагрузки $q(\text{снег})$ (н/мм*м), и значение сосредоточенной нагрузки P (н) (расчетная снеговая нагрузка вычисляется в соответствии со СП “Нагрузки и воздействия” автоматически).

Таблица П.1.3 «Нагрузки»

НАГРУЗКИ	
Нормативная снеговая нагрузка	
$q(\text{снег}), \text{н/мм*м}$	1.50
Сосредоточенная сила P , н	1500

РАСЧЕТНАЯ СНЕГОВАЯ НАГРУЗКА	
$q_1 = 1,8 * q(\text{снег}) * \sin(1,4 * \gamma / 2), \text{н/мм*м}$	1.17

Также создадим таблицу «Константы материала», в которой расчетчик вносит только значение предела текучести (условного) или расчетного сопротивления материала покрытия (н/мм^2) (плотность стали, модуль упругости материала покрытия E , допускаемый прогиб оси арки и допускаемая продольная сила из условия устойчивости арки заполняются автоматически).

Таблица П.1.4 «Константы материала»

КОНСТАНТЫ МАТЕРИАЛА	
Плотность стали, н/мм^3	0.0000785
Модуль упругости E , н/мм^2	200000
Расчетное сопротивление, н/мм^2	320
Допускаемый прогиб оси, мм	80
Доп. N на устойчивость, т	5.7

При заполнении таблицы «Исходные данные» автоматически заполняется таблица «Расчетные параметры».

Для определения радиуса арки r (мм), угла раскрытия арки γ , угла начала угла начала φ_0 , длинны дуги арки составим таблицу, где будет происходить определение «Исходных данных арки» (Табл. П.1.5).

При заполнении ячеек с длиной пролета арки L (мм) и величиной стрелы арки $h_{\text{ниж}}$ (мм) в таблице «Исходные данные» отношение радиуса арки к пролету r/L , и графы в таблице «Расчетные геометрические параметры» будут заполняться автоматически.

Таблица П.1.5 «Расчетные параметры»

Радиус верх. слоя $r(\text{верх})$, мм	29481
Радиус ниж. слоя $r(\text{ниж})$, мм	29271
Угол раскрытия γ , рад	0.64
36.84 град	82.78
Угол начала AL_0 , град	71.58
Лверх дуги = $r(\text{верх}) \cdot \gamma(\text{рад})$, мм	18958
Лниж дуги = $r(\text{ниж}) \cdot \gamma(\text{рад})$, мм	18823

В таблице П.1.6 «Характеристики термопрофиля» необходимо заполнить значения толщины эквивалентного термопрофилю стержня, его высоту, количество

термопрофилей в покрытии, и координату первого термопрофиля, считая от левой опоры (количество шагов из 200 шагов интегрирования).

Таблица 4.6 «Характеристики термопрофиля»

Характеристики шляпного профиля на 1 м длины			
t, мм =	4.93	Jx, мм ⁴ =	9985.26
h, мм =	159	F, мм ² =	9860
Сдвиговая жесткость Cw, н/мм =			23847.31
Сдвиговая податливость 1/Cw, мм/н =			0.000042
Количество "шляп" n =	11		
Координата первой "шляпы"	k	2	
dAL0 = k*dAL, град / мм	0.37		188
Шаг между "шляпами", рад / град / мм	0.06		3
	1801		1788

Дальнейшее решение происходит при помощи процедуры «Поиск решения» (Рис.П.1.4), которая добавляется в рабочее меню через «параметры Excel», графа «Надстройки».

В открывшемся окне «Поиск решения» требуется указать изменяемую и целевую ячейки. Изменяемой ячейкой является неизвестный параметр в начале координат. Целевой ячейкой является известное значение в конце координат. Изменяемые и целевые ячейки назначаются в соответствии с граничными условиями.

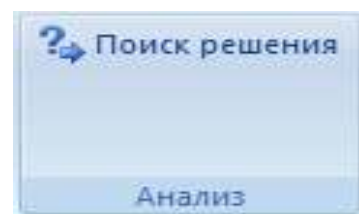
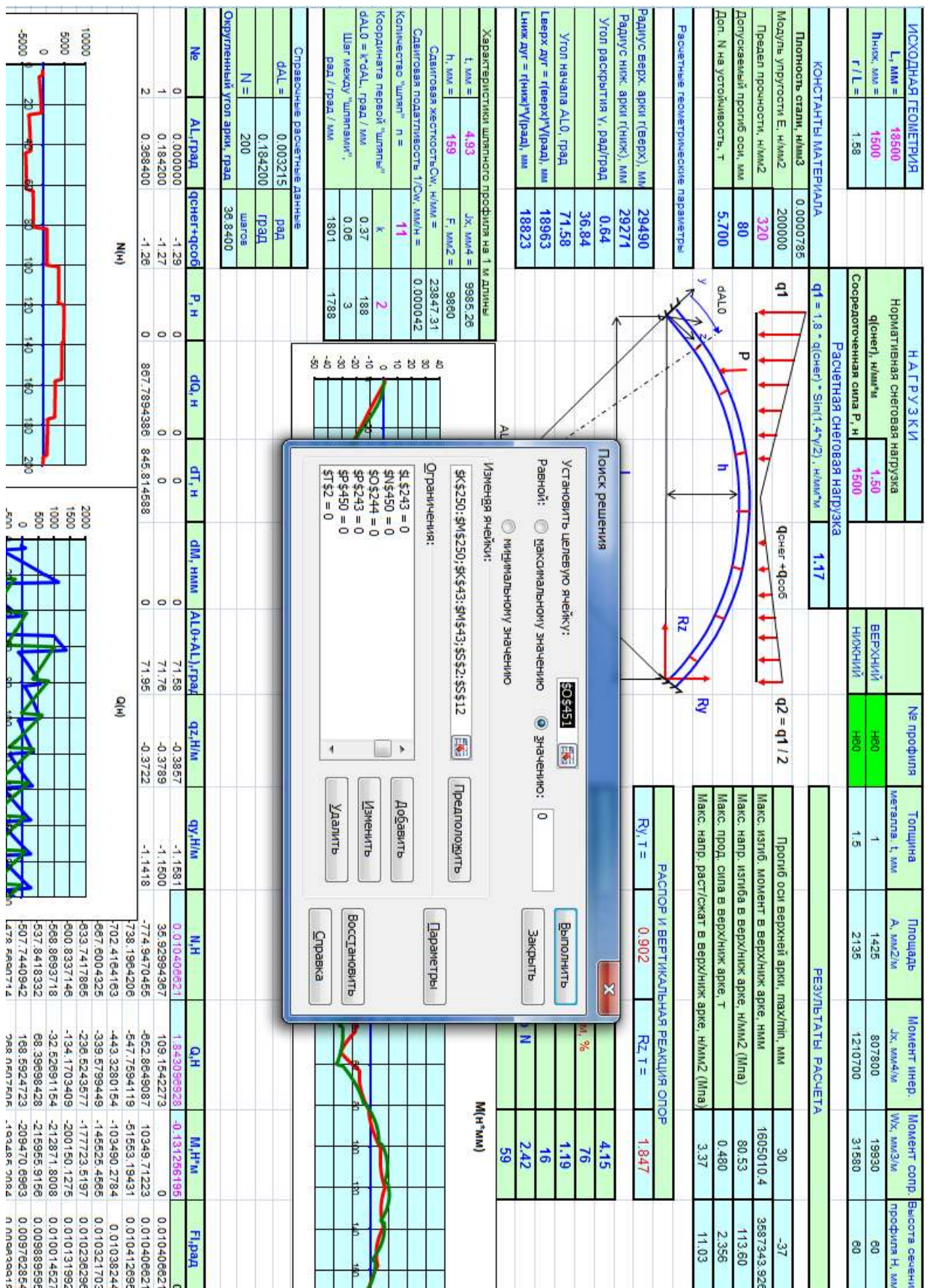


Рис.П.1.4. Поиск решения



Поскольку в начале и конце арки располагаются шарнирные опоры, то для них мы имеем следующие граничные значения: $F_i = 0$, $V = 0$, $W = 0$. Данные значения напрямую вводятся в первые ячейки соответствующих столбцов. Остальные параметры в начале являются изменяемыми ячейками.

В результате активации программы производится расчет. При этом автоматически заполняется таблица «Результаты расчета», где, кроме экстремальных расчетных параметров верхнего и нижнего слоев, приводятся величина распора и вертикальной реакции опор арочного покрытия.

В графе «ПРОЧНОСТЬ» вычисляется коэффициент запаса прочности равный отношению расчетного сопротивления материала арки к максимальным расчетным напряжениям $\sigma_{\max}$. В графе «Перегрузка (запас) по нормальным напряжениям» вычисляется выражение

$$100\%(1 - (\sigma_{\max} / R)).$$

В графе «ЖЕСТКОСТЬ» вычисляется коэффициент запаса жесткости равный отношению допускаемого прогиба покрытия $[f]$ к максимальному расчетному прогибу $V_{\max}$. В графе «Перегрузка (запас) по условию жесткости» вычисляется выражение

$$100\%(1 - (V_{\max} / [f])).$$

Аналогично вычисляется коэффициент запаса устойчивости по продольной силе N и запас по продольной устойчивости.

Таблица П.1.7«Результаты расчета»

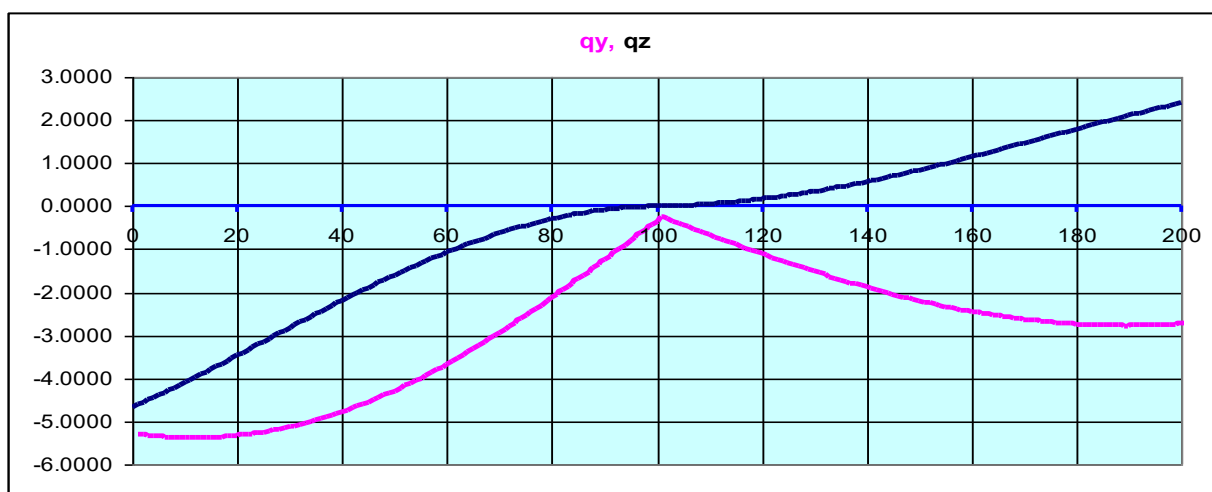
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА			
Прогиб оси верхней арки, max/min, мм		30	-37
Макс. изгиб. момент в верх/ниж арке, нмм		1604369.4	3584703.231
Макс. напр. изгиба в верх/ниж арке, н/мм ² (Мпа)		80.50	113.51
Макс. прод. сила в верх/ниж арке, т		0.477	2.354
Макс. напр. раст/сжат в верх/ниж арке, н/мм ² (Мпа)		3.35	11.02

РАСПОР И ВЕРТИКАЛЬНАЯ РЕАКЦИЯ ОПОР			
$R_y, \tau =$	0.902	$R_z, \tau =$	1.848

ПРОЧНОСТЬ	4.15
Запас прочности по норм. напряжениям, %	76
ЖЕСТКОСТЬ	1.19
Запас по условию жесткости, %	16
УСТОЙЧИВОСТЬ по N	2.42
Запас по продольной устойчивости, %	59

В процессе расчета автоматически заполняется и таблица «Расчет крепежных элементов». По заданным значениям расчетных сопротивлений материала растяжек на растяжение и материала болтов крепления профиля на срез, расстоянию между стяжками и количества болтов на одном метре длины вычисляется минимальный диаметр стяжек и болтов для наиболее нагруженного слоя.

Каждый расчет сопровождается автоматическим построением графиков изменения расчетных параметров по длине покрытия исходя из двухсот шагов интегрирования, где 0 соответствует правой опоре или началу координат, а 200 – правой опоре (Рис. П.1.6-П.1.7.).



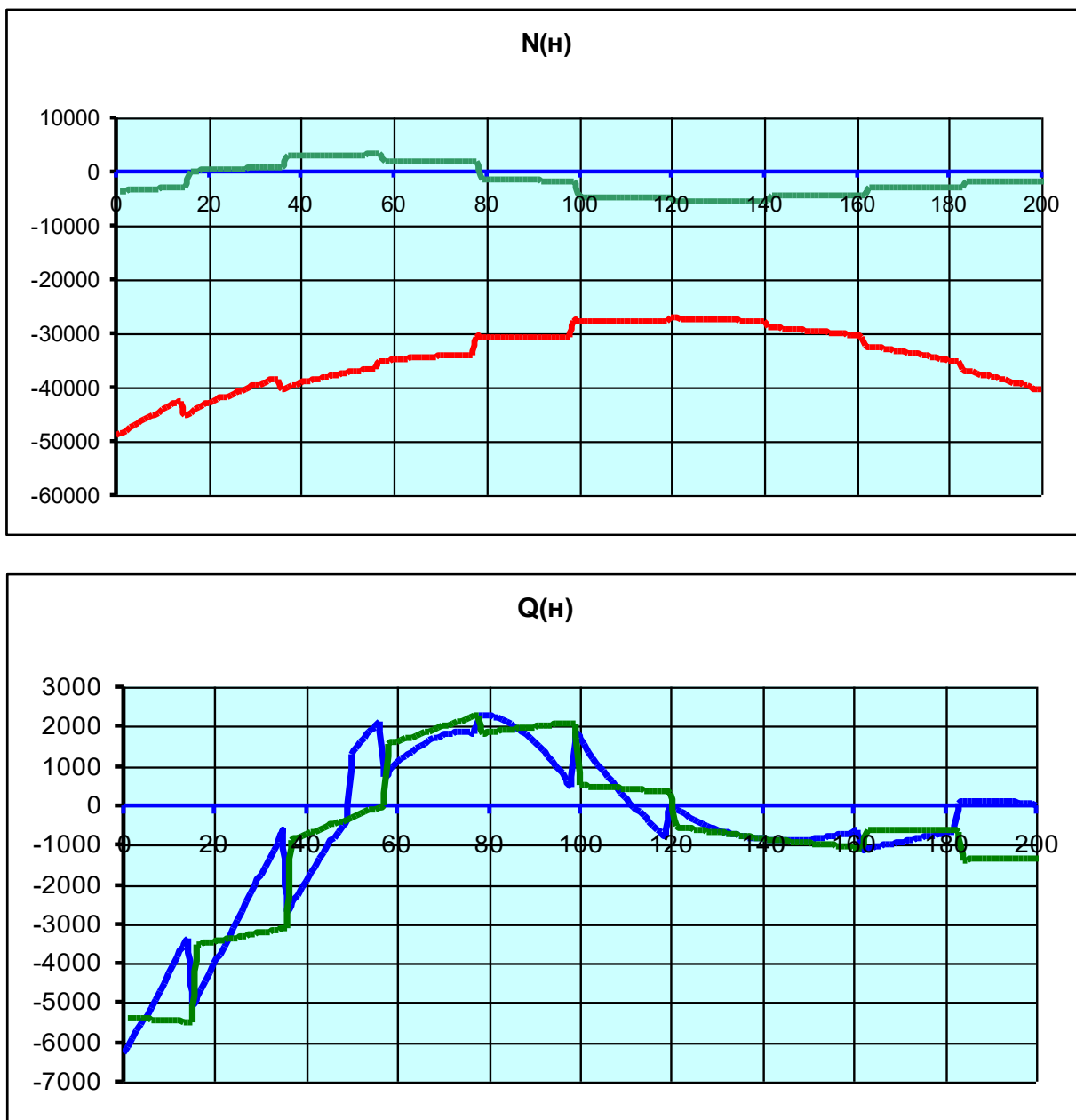


Рис. П.1.6 Графики изменения нагрузки и расчетных параметров по длине покрытия

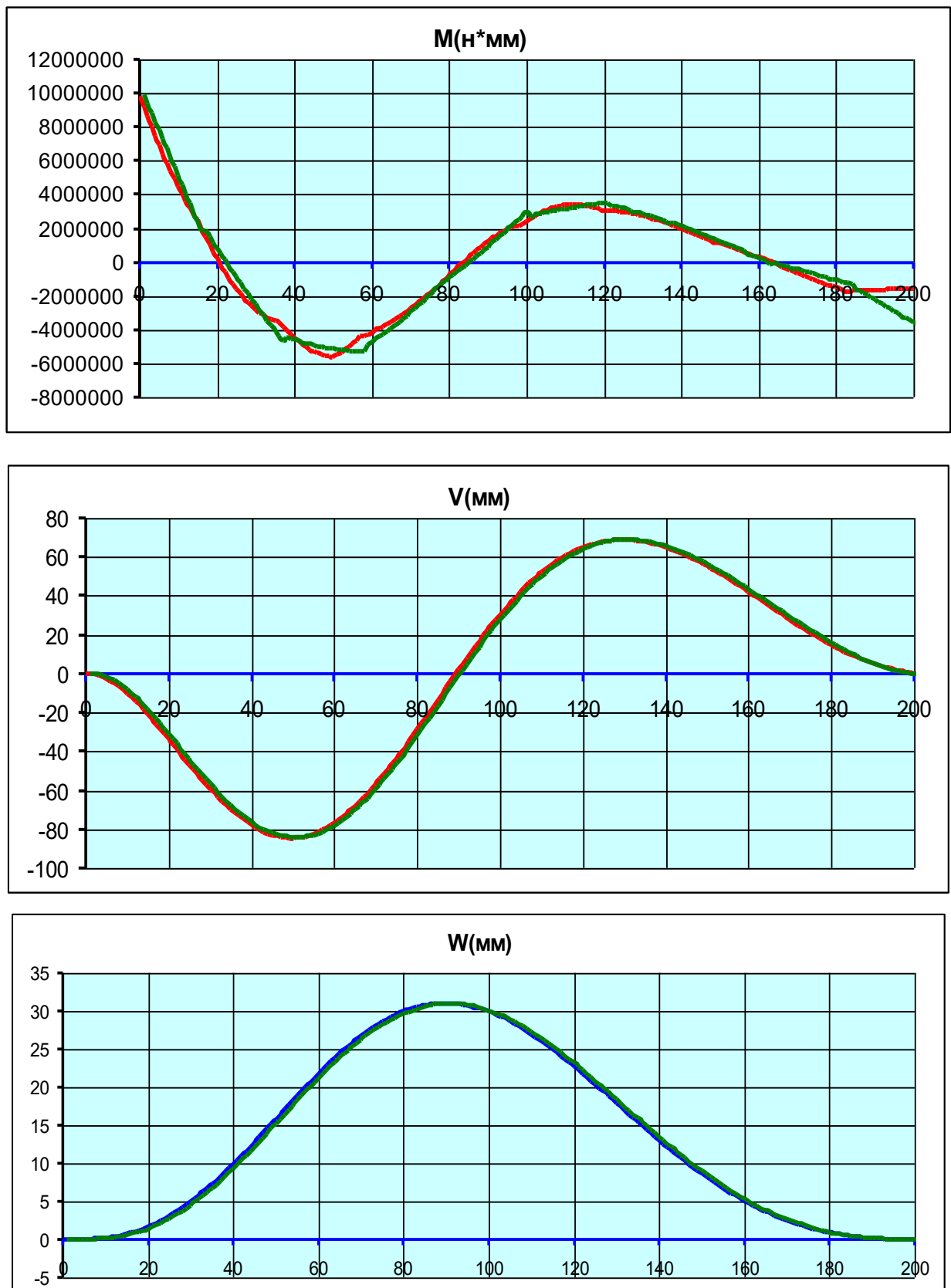


Рис. П.1.7. Графики изменения нагрузки и расчетных параметров по длине покрытия

Приложение 2. Протоколы определения прочности заполнителя из полистиролбетона

Форма 2/1 от 26.01.2022

 Юридический адрес: 644012, г.Омск, ул.6-я Крайняя, д.2, тел. 8 (3812) 21-37-37 sibcentr.55@yandex.ru	Испытательный центр Общества с ограниченной ответственностью "Сибирский инновационный испытательный центр" (ООО "СибЦентр")		2022					
	ПРОТОКОЛ испытания бетона на прочность при сжатии по контрольным образцам		Номер протокола					
			Бко	0	0	0	0	0
			Дата выдачи протокола		25.11.2022			
		лист 1		листов 1				

Условия проведения испытаний соответствуют ГОСТ 10180, ГОСТ 12730.1

Заказчик испытаний (наименование, адрес)	-
Проводитель работ	-
Объект строительства	-
Место отбора	-
ИД на метод отбора образцов (проб)	-
Описание, состояние и однозначная идентификация образца (пробы)	бетонные образцы кубы из легкого бетона размером 150*150*150 мм,
Поставщик, № паспорта	
Маркировка № Акта отбора/Кол-во проб	3 образца
Адрес места осуществления деятельности ИЦ	644012, г. Омск ул. 6-я Крайняя, д. 2, тел. (3812) 21-37-37 sibcentr.55@yandex.ru
Дата бетонирования	-
Дата получения образцов (проб)	31.10.2022
Условия проведения испытаний	температура 21,3°C, влажность 56,2%
Используемое оборудование	Весы лабораторные электронные АЛ-6200СЕ зав. № 211243010 св-во о поверке №С-В3/04-07-2022/173807116 до 03.07.2023; Штангенциркуль ШЦ-2-250-0,05 зав. №11071266 свидетельство о поверке №С-В3/07-12-2021/115249742 до 06.12.2022; Машина для испытаний на сжатие "MATEST" C040N зав. № C040PN132/BA/0033 свидетельство о поверке №С-В3/03-10-2022/191473311 до 02.10.2023; Прибор комбинированный Testo 622 зав. №39517437/807 св-во о поверке №С-В3/10-12-2021/116544889 до 09.12.2022

Результаты испытаний

№ пробы	Наименование конструкции (класс)	Геометрические параметры образца, см			Масса образца, кг	R, кг/см ² , ГОСТ 12730.1	Разрушающая нагрузка, кН	Прочность при сжатии, МПа (с учетом масштабного коэффициента)	Средняя прочность в серии, МПа	
		Длина	Ширина	Высота						
1	Устройство теплоизоляции кровли из легкого бетона	14,5	14,3	15,3	526,1	794	1,9	0,09	0,09	
2		14,7	14,5	15,0	476,7	705	2,0	0,09		
3		14,9	14,8	15,1	486,5	730	2,0	0,09		

- ☐ Погрешность результатов испытаний не превышает значений, указанных в ГОСТ 10180, ГОСТ 12730.1
☐ Настоящий протокол относится только к образцам, предоставленным на испытание
☐ Запрещается частичная перепечатка данного протокола без согласования с испытательным центром

Заключение	Средняя прочность бетона образцов в серии - 0,09 МПа
-------------------	--

Примечание Результаты испытаний относятся к образцам, предоставленным заказчиком

Испытание выполнил

Начальник отдела
(подпись)


(подпись)

Карнаух Д.И.
(расшифровка)

Приложение 3. Сертификат о калибровке контрольного груза

РСТ	ФБУ «Омский ЦСМ» Федеральное бюджетное учреждение «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Омской области»	644116, г. Омск, ул. 24-я Северная, д. 117а тел.: (3812) 68-07-99, 68-22-28 http://csm.omsk.ru E-mail: info@ocsm.omsk.ru
	СЕРТИФИКАТ О КАЛИБРОВКЕ № 132610-2024	
Дата калибровки 27 сентября 2024 г.		Страница 1 из 1
Объект калибровки наименование: Контрольный груз		
тип: - номер: 1		
Заказчик Комлев А.А.		
Место проведения калибровки ФБУ «Омский ЦСМ», г. Омск, ул. 24-я Северная, д. 117 А каб. №109А		
Метод калибровки МК-5.3.-0015 "Методика калибровки. Гири"		
Калибровка выполнена с помощью 19145.07.СИ.00275107, ХР26003L, зав.№В209743959, КТ специальный		
Условия калибровки Температура окружающего воздуха 22,3 °С, относительная влажность 50,1 %, атмосферное давление 101,2 кПа		
Результаты калибровки действительное значение массы груза - 18,35 кг		
Значение неопределенности		
Дополнительная информация		
Оценки неопределенности калибровки Начальник отдела должность лица, ответственного за калибровку Инженер по метрологии 1 категории должность лица, выполняющего калибровку Дата выдачи 27 сентября 2024 г.   Д.Б. Шестаков подпись, фамилия Ю.Е. Клиникова подпись, фамилия Результаты калибровки относятся только к указанному объекту калибровки		
19335		

ООО "Омскбизнесцентр", лауреат конкурса "100 лучших товаров России", г. Омск-7, ул. Общественная, 34, ИНН 5503047730, тел. 212-131, факс 333858, пер. 15 930, 2021 г.