



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский**

Московский государственный строительный университет»

129337, Россия, Москва, Ярославское ш., д. 26, тел. +7 (495) 781-80-07, факс +7 (499) 183-44-38

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

по теме:

**Численное моделирование ветровых нагрузок, разработка методики
нелинейного расчета для трехслойных самонесущих навесных панелей
серии НП1.1 и оценках их несущей способности**

Этап 2

**Разработка и верификация методики трехмерного нелинейного расчета трехслойных
самонесущих навесных панелей наружных стен**

Этап 3

**Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния и оценка
несущей способности трехслойной самонесущей навесной панели по разработанной
методике с учетом ветровых нагрузок, определенных на Этапе 1**

МОСКВА 2023

*Подготовка к заключению договоров на разработку проектной документации и выполнение
инженерных изысканий от имени НИУ МГСУ осуществляется только*

*Дирекцией научно-технических проектов
тел.: +7 (495) 739-03-14; e-mail: ntp@mgsu.ru*

1. Постановка задач и исходная информация

2.1 Задачи настоящей работы

1. Разработка методики нелинейного расчета для трехслойных самонесущих навесных панелей (далее НП).
2. Определение несущей способности, прочности, жесткости и трещиностойкости НП.
3. Определение общего коэффициента использования и запасов в технических решениях по конструированию НП и расстановке монтажных связей.

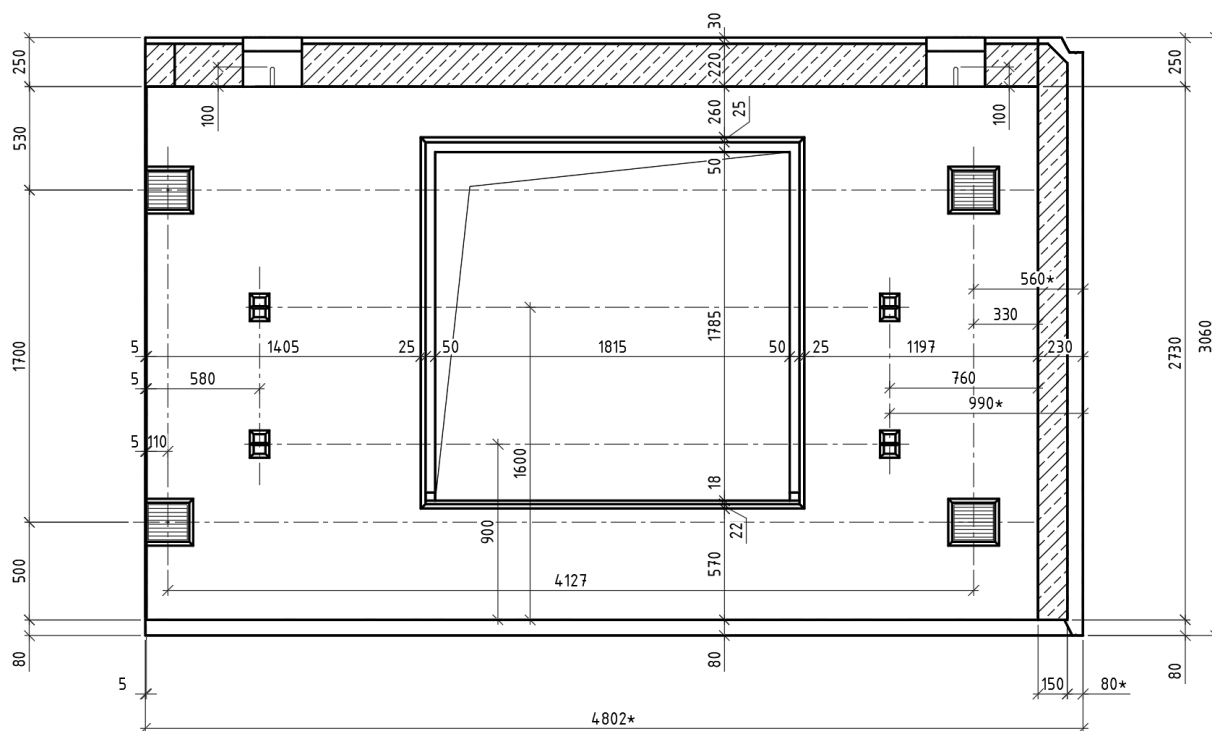


Рис. Чертеж НП, вид с внутренней стороны

2.3 Требования к расчетам

1. Расчет НП выполнить по 2-м предельным состояниям в соответствии с требованиями СП 63.13330, СП 28.13330, ГОСТ 11024.
 - ПС-1 - 1-ое предельное состояние: а) прочность, б) устойчивость.
 - ПС-2 - 2-ое предельное состояние: а) деформации в плоскости и из плоскости элемента; б) трещиностойкость.
2. При расчете по первому предельному состоянию (ПС-1)
 - определить прочность железобетонных слоев при расчетных значениях нагрузок по нормальным и наклонным сечениям (расчетные сочетания принять в соответствии с СП 20.13330);
 - определить прочность системы гибких связей с учетом слоя утеплителя, сжатые элементы проверить на устойчивость;
 - коэффициент надежности по ответственности принять 1,0.
3. При расчете по второму предельному состоянию (ПС-2)
 - определить трещиностойкость внутреннего и внешнего слоев;

- определить жесткость панели из плоскости при действии пикового ветрового воздействия, предельные деформации (выпучивания) НП принять не более 10 мм.
4. Расчеты выполнить с учетом следующих нагрузок.
- пиковое ветровое давление принять по результатам численного моделирования ветрового воздействия;
 - коэффициент надежности по ветровой нагрузке при расчетах по первой группе ПС согласно СП 20.13330 принять равным 1,4; при расчетах по второй группе ПС - 1,0.
 - Нормативные значения изменений средних температур по сечению элемента определены для теплого и холодного времени года, в том числе пониженное значение в холодное время года. Пониженным значением изменений средних температур в летний период следует пренебречь ввиду его незначительности;
 - температурные нагрузки при расчетах задавать только к наружному слою панели за вычетом оконных и дверных проемов;
 - коэффициент надежности по нагрузке для температурных воздействий при расчетах по первой группе ПС согласно СП 20.13330 принять равным 1,1; при расчетах по второй группе ПС - 1,0.
 - Собственный вес панели принять с учетом облицовки и заполнения оконных проемов.

2.4 Общие требования к построению расчетных моделей

1. Расположение монтажных узлов крепления НП к несущим монолитным конструкциям принять в соответствии с чертежами КЖИ панелей и Альбомом монтажных узлов. Узлы крепления являются подвижными в плоскости панели и неподвижными из плоскости.
2. Опираение внутреннего слоя панели принять фактическим, из решения контактной задачи взаимодействия с плитой перекрытия, принимая площадки опирания длиной не более 400 мм. Верхний горизонтальный шов не предусматривает передачу нагрузки от перекрытия на панель.
3. В модели нужно учесть следующие факторы:
 - неупругая работа и возможность образования трещин в железобетонных слоях НП;
 - неупругая работа элементов связей между слоями НП;
 - неупругая работа стальных монтажных связей крепления НП к несущим монолитным конструкциям;
 - ограниченная несущая способность из условий устойчивости сжатых 28 между слоями НП;
 - контактное взаимодействие слоя утеплителя и железобетонных слоев при необходимости учета утеплителя (невозможность работы утеплителя на растяжение между слоями НП).

3. Расчетные конечноэлементные модели НП

а. Общие положения

Заказчиком передан комплект актуальных рабочих чертежей и схем в файлах IFC, AutoCAD и Adobe Acrobat, представленные в Приложении к отчету о настоящем исследовании.

На основании переданных материалов были построены подробные объемно-оболочечно-стержневые конечноэлементные модели исследуемой трехслойной самонесущей навесной панели в программном комплексе ANSYS.

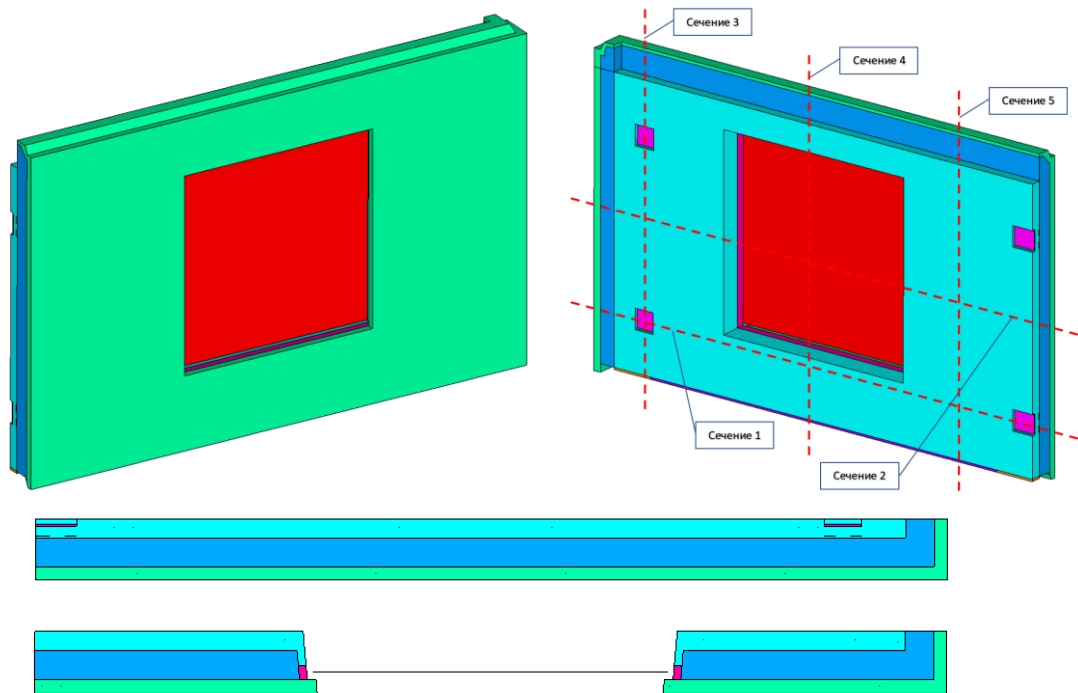


Рис. Геометрическая модель НП: вид с внешней стороны (слева); вид с внутренней стороны (справа), горизонтальные сечения 1, 2 (снизу)

б. Конечноэлементная модель для решения задачи теплопроводности

і. Описание КЭ-модели

Разработанная расчетная КЭ-модель НП для решения задачи теплопроводности имеет размерность: 239 246 узлов и 226 173 элементов.

Объемными элементами SOLID70 моделировались такие элементы НП как:

- бетонные конструкции;
- теплоизоляция (минеральная вата);
- пластины закладных деталей;
- цементный раствор;
- доска.

Оболочечными элементам SHELL131 моделировались анкерующие пластины закладных деталей. Стержневыми элементами LINK33 моделировалась арматура, связывающая наружный и внутренний железобетонные слои как стальная, так и стеклопластиковая.

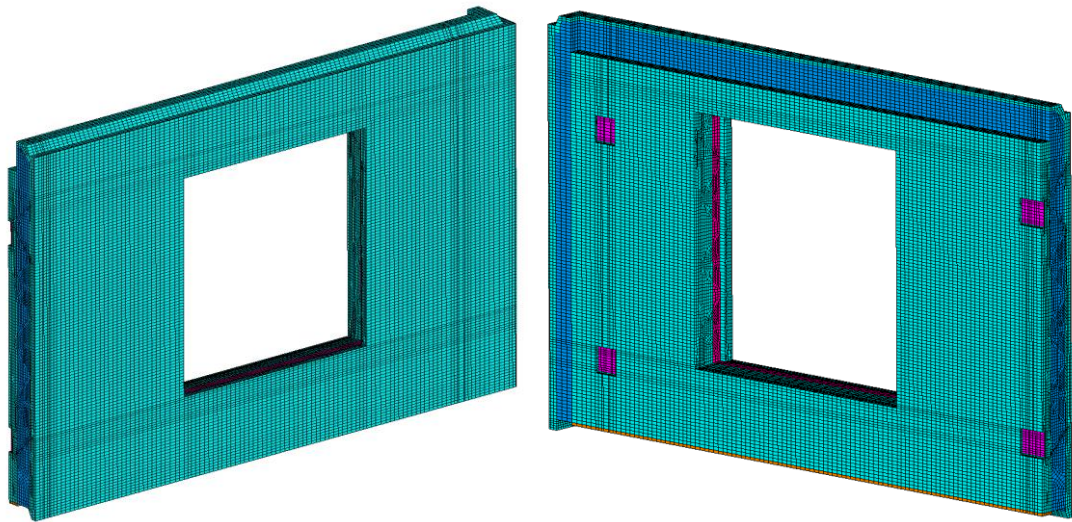


Рис. КЭ-модель НП с цветовым отображением материалов: вид с внешней стороны (слева); вид с внутренней стороны (справа)

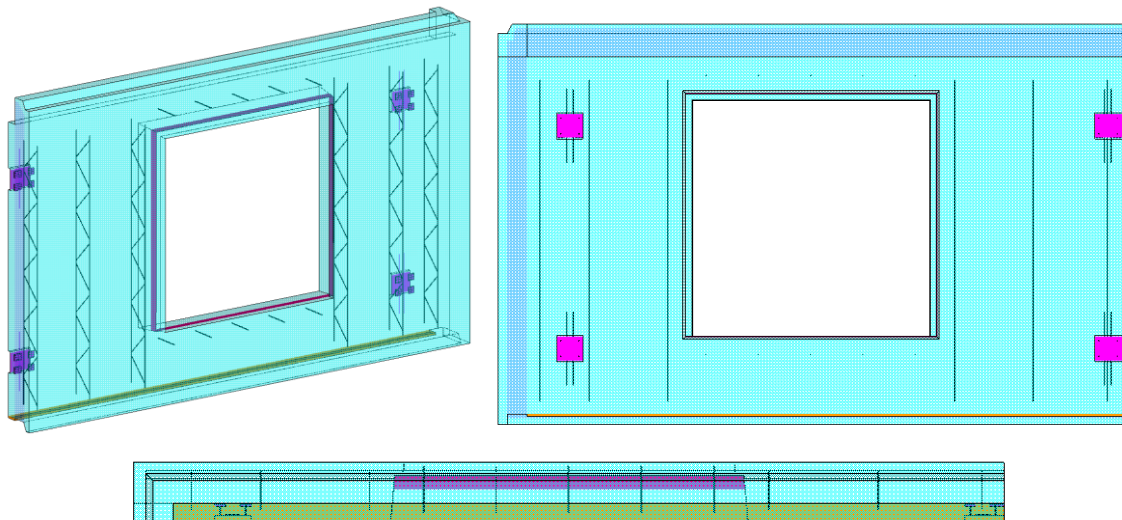


Рис. КЭ-модель НП с цветовым отображением материалов: вид с внешней стороны (слева); вид с внутренней стороны (справа)

с. Конечноэлементная модель для решения задач по определению напряженно-деформированного состояния

Разработанная расчетная КЭ-модель НП адекватно отражает геометрико-жесткостные и прочностные свойства. Размерность КЭ-модели НП: 239 288 узлов и 274 900 элементов.

Объемными элементами SOLID185 моделировались такие элементы НП как теплоизоляция (минеральная вата), пластины закладных деталей, цементный раствор, доска. Объемными элементами SOLID65 моделировались бетонные конструкции (наружный и внутренний слои НП). Оболочечными элементами SHELL181 моделировались анкерующие пластины закладных деталей, оконный блок, облицовочный кирпич.

Стержневыми элементами BEAM188 моделировалась арматура, связывающая наружный и внутренний железобетонные слои как стальная, так и стеклопластиковая.

Безузловыми, сетконеависимыми элементами REINF264 выполнено армирование наружного и внутреннего бетонных слоев конструкции НП.

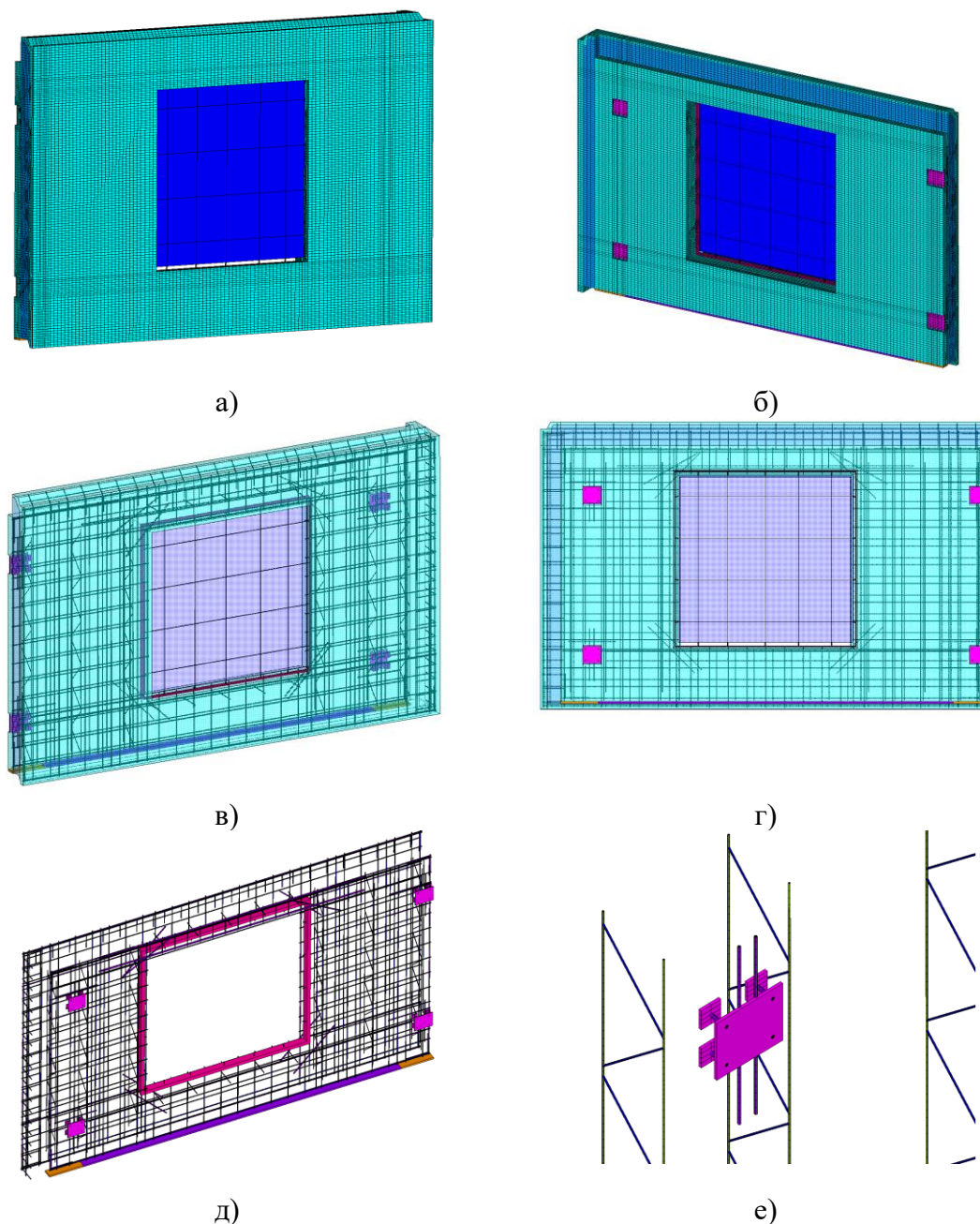


Рис. КЭ-модели: а-г) НП с цветовым отображением материалов - вид с внешней и внутренней стороны; д) модель арматуры с цветовым отображением материалов; е) Фрагмент КЭ-модель арматуры НП, связывающая наружный и внутренний железобетонные слои, с использованием стержневых элементов BEAM188

Для учета отсутствия связи внешнего и внутреннего железобетонных слоев НП по раме окна, связь деревянной рамы с внутренним железобетонным слоем не учитывалась при отсоединении. При давлении отсутствует связь с внешним железобетонным слоем.

При отсоединении жесткость теплоизоляции не учитывалась. Для используемых материалов в соответствующем разделе отчета о настоящем исследовании приведены необходимые расчетные характеристики (модуль упругости, коэф. Пуассона, плотность, расчетное сопротивление, предел прочности, коэф. теплового расширения). Там же приведены используемые диаграммы деформирования арматуры и бетона.

Ниже приведены воздействия и граничные условия.

Таб. — Таблица нагрузок

№, п.п.	Наименование	Тип нагрузки	γ_f
1	Собственный вес	Постоянная	1.1
2	Температура (из решения задачи теплопроводности)	Длительная	1.1
3	Ветер (напор) + внутреннее давление	Кратковременная	1.4
4	Ветер (отсос) + внутреннее давление	Кратковременная	1.4

Рассматривались в том числе следующие сочетания нагрузок:

- Собственный вес (СВ);
- СВ+температурное воздействие (вариант 1);
- СВ+температурное воздействие (вариант 2);
- СВ+температурное воздействие (вариант 1)+ветровая нагрузка схема №1 (напор);
- СВ+температурное воздействие (вариант 2)+ветровая нагрузка схема №4 (отсос);

Расчетные нагрузки от ветра принимались в соответствии с научно-техническим отчетом по теме: Численным моделированием ветровых нагрузок, разработка методики нелинейного расчета для трехслойных самонесущих навесных панелей серии НП1.1 и оценках их несущей способности Этап 1. Численное моделирование и разработка схем зонирования пиковых ветровых давлений для Объекта: «Жилой дом с подземной автостоянкой с инженерными сетями и благоустройством территории по адресу: г. Москва, Алтуфьевское шоссе, влд. 51-53 (корпус 2)».

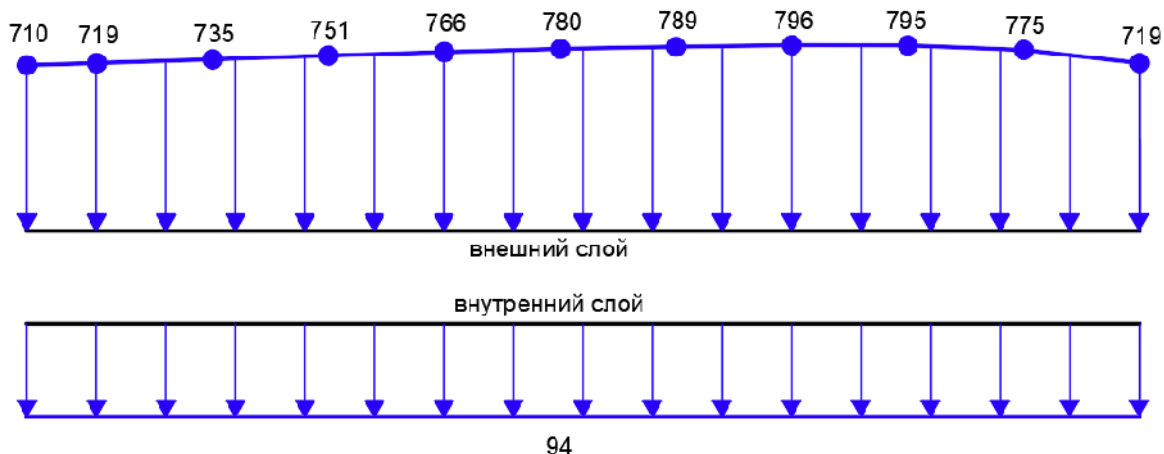


Рис. Расчетная ветровая нагрузка схема №1 (давление) без учета коэф. корреляции, Па

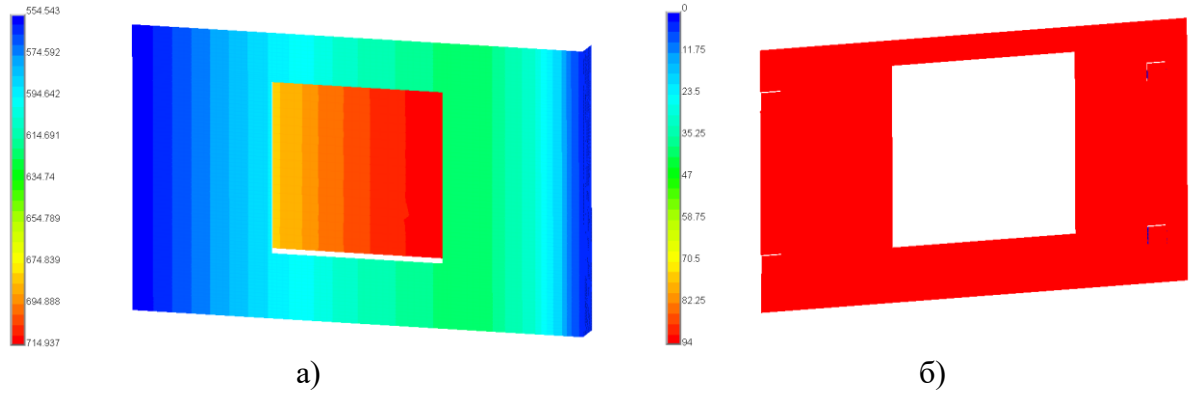


Рис. Расчетная ветровая нагрузка на внешней а) и внутренней б) поверхности НП с учетом коэф. корреляции. Схема №1 (напор)

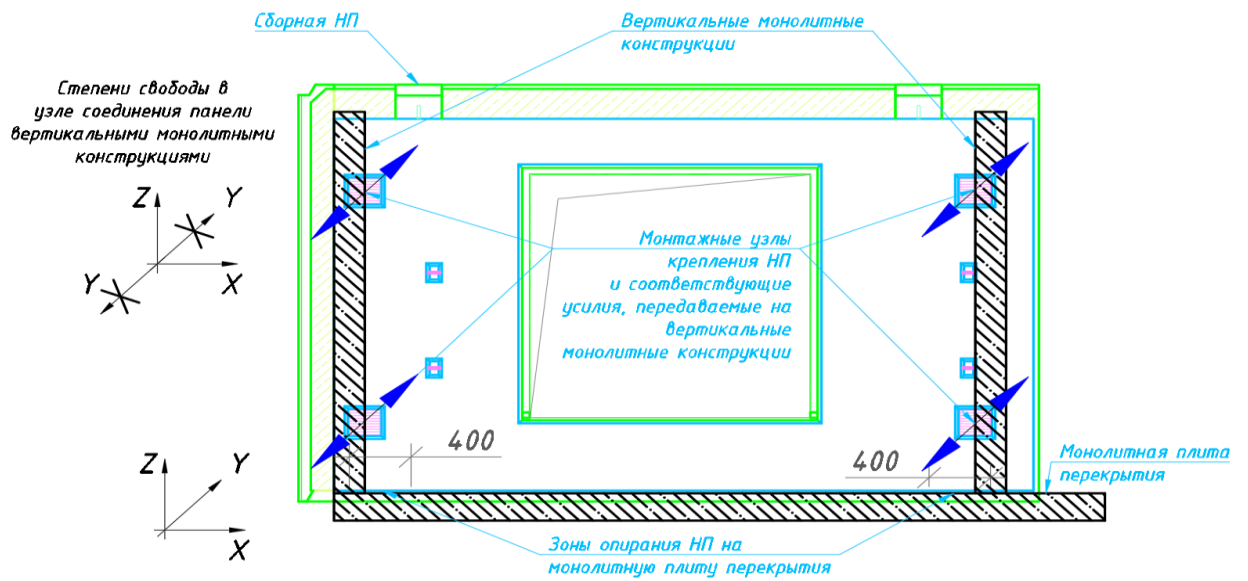


Рис. Общая схема опирания и работы НП

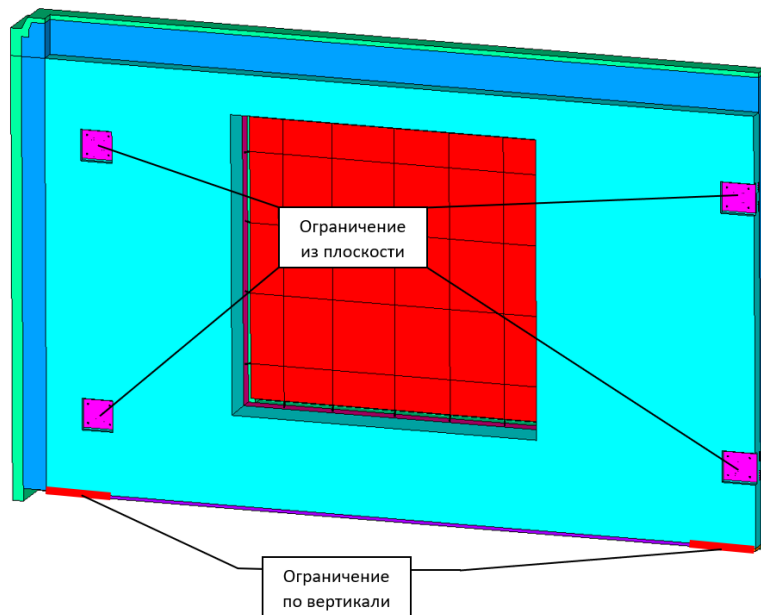


Рис. Общая схема граничных условий НП

4. Результаты расчетных исследований

а. Результаты расчетных исследований задачи теплопроводности

Ниже приведены результаты для варианта 1 – холодное время года

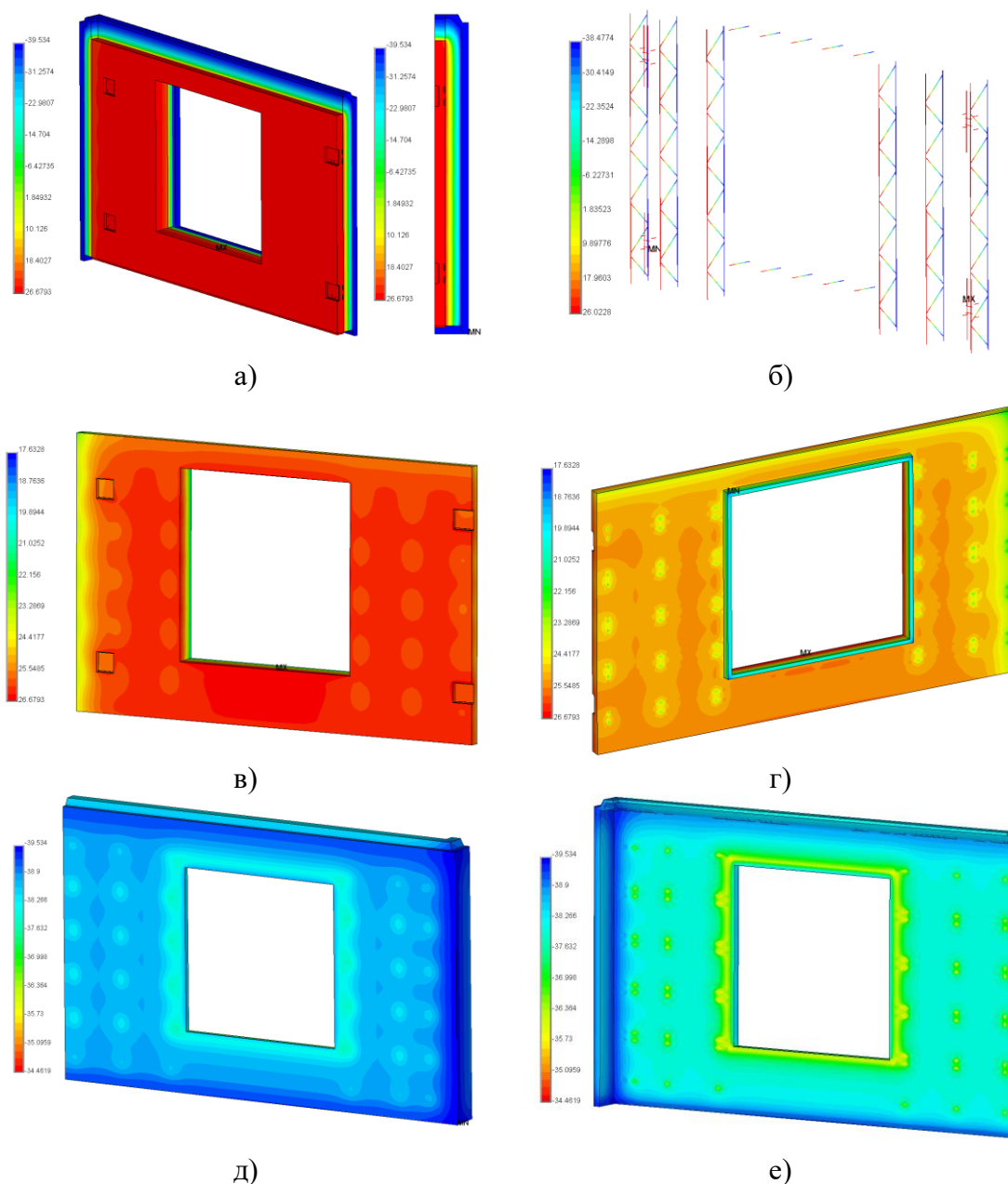


Рис. Результаты от расчетных нагрузок с учетом коэффициента надежности по нагрузке 1.1 а) распределение температур по НП; б) распределение температур по стальной и стеклопластиковой арматуре, связывающей наружный и внутренний железобетонные слои НП; в) распределение температур во внутреннем железобетонном слое НП- вид с внутренней стороны НП; г) распределение температур во внутреннем железобетонном слое НП - вид со стороны утеплителя; д) распределение температур во внешнем железобетонном слое НП - вид с внешней стороны НП;е) распределение температур во внешнем железобетонном слое НП - вид со стороны утеплителя

б. Результаты расчетных исследований НДС и прочности НП

Результаты расчета от собственного веса (СВ)

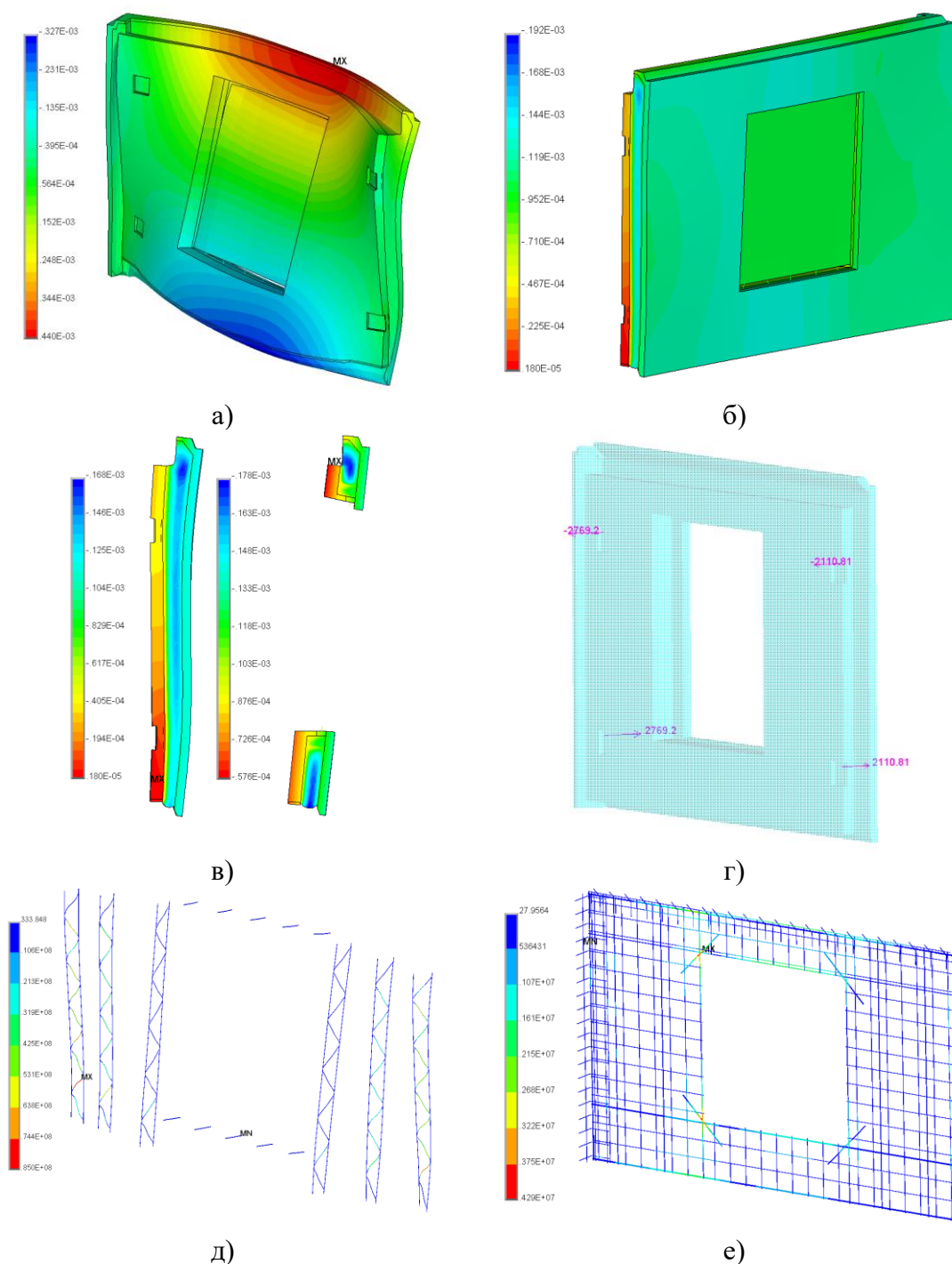


Рис. Результаты от расчетных нагрузок с учетом коэффициента надежности по нагрузке 1.1 а) Перемещения из плоскости НП, м. $U_{max}=0,4$ мм. Картина деформированного состояния, масштабный коэф. 1500.- вид с внутренней стороны; б) Вертикальные перемещения, м. $U_{max}=-0,2$ мм - вид с внешней стороны; в) Вертикальные перемещения, м. Картина деформированного состояния, масштабный коэф. 500 Сечения по закладным деталям и по оконному проему; г) Реакции в закладных деталях от расчетных нагрузок, Н; д) Эквивалентные (по Мизесу) напряжения в арматуре НП, связывающей наружный и внутренний железобетонные слои, масштабный коэф. 1000, Па. $\sigma_{max}=85$ МПа; е) Эквивалентные (по Мизесу) напряжения в арматуре наружного железобетонного слоя НП, Па. $\sigma_{max}=4,3$ МПа

Результаты расчета от СВ+температурное воздействие (вариант 1)

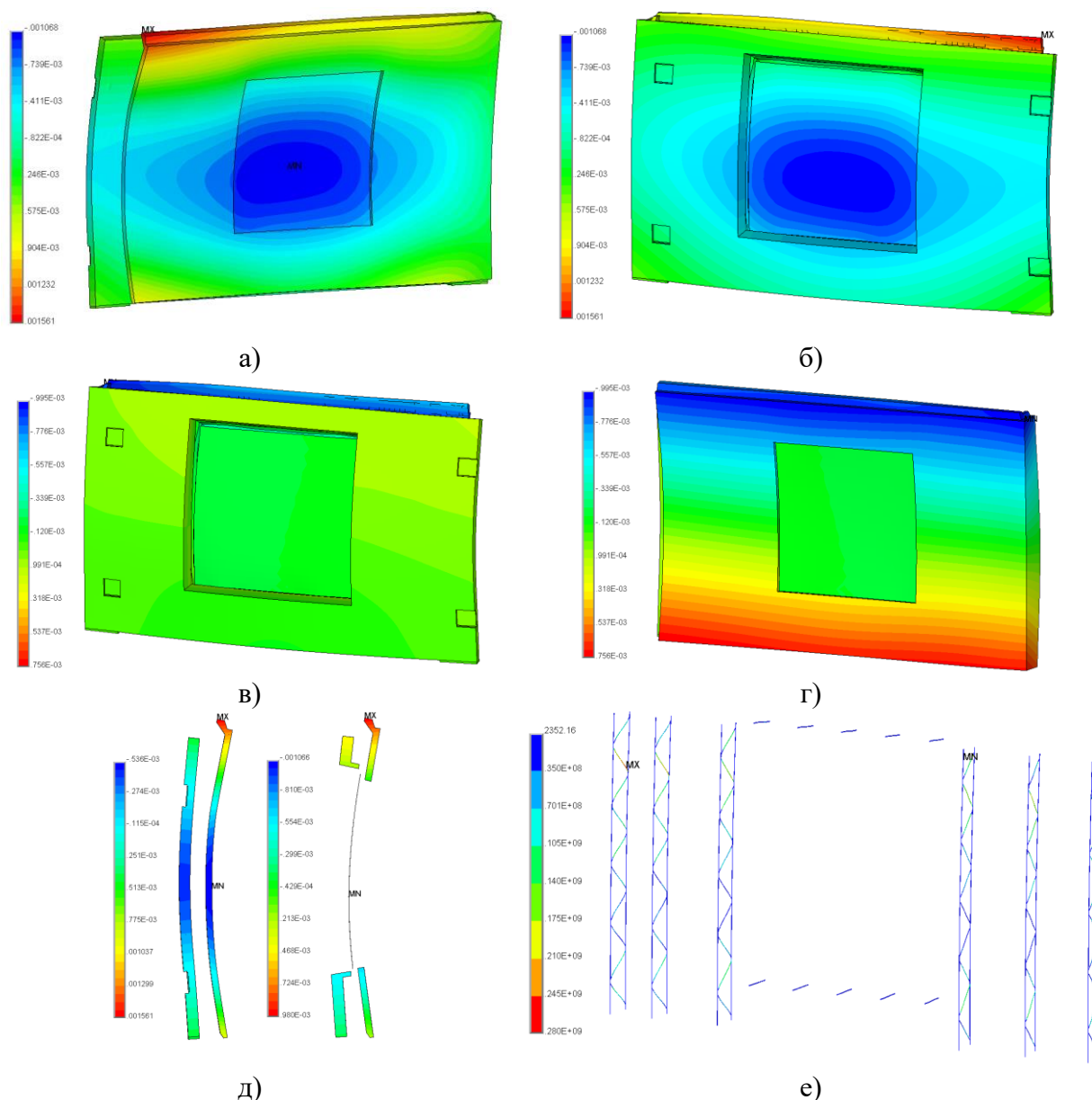


Рис. Результаты от расчетных нагрузок с учетом коэффициента надежности по нагрузке 1.1 а-б) перемещения из плоскости НП, м. $U_{\max}=1,6$ мм.: картина деформированного состояния, масштабный коэф. 100; в-г) вертикальные перемещения, м. $U_{\max}=-1$ мм.; д) перемещения из плоскости, м: картина деформированного состояния, масштабный коэф. 100 Сечения по закладным деталям и по оконному проему; е) эквивалентные (по Мизесу) напряжения в арматуре НП, связывающей наружный и внутренний железобетонные слои, Па. Масштабный коэф. 50, $\sigma_{\max}=280$ МПа

Результаты расчета от СВ+температурное воздействие (вариант 1)+ветровая нагрузка схема №1 (напор)

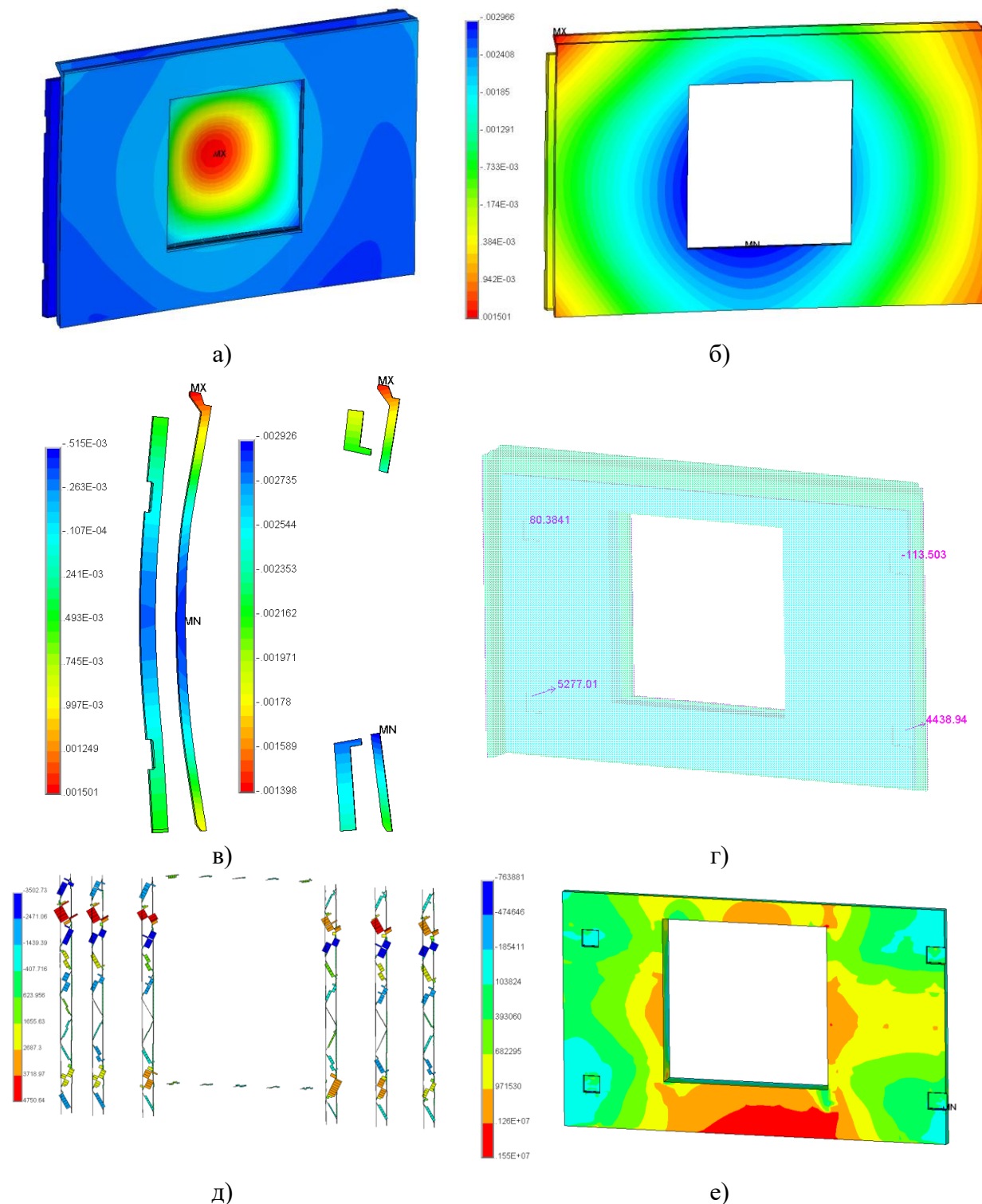


Рис. а) суммарные перемещения НП. Картина деформированного состояния, масштабный коэф. 20; б) перемещения из плоскости НП, м. $U_{\max}=3$ мм. Картина деформированного состояния, масштабный коэф. 20; в) перемещения из плоскости НП, м. Картина деформированного состояния, масштабный коэф. 100 Сечения по закладным деталям и по оконному проему; г) реакции в закладных деталях от расчетных нагрузок, Н; д) продольные усилия в арматуре НП, связывающей наружный и внутренний бетонные слои, Н. $N_{\max}=4,8$ кН; е) главные растягивающие напряжения во внутреннем бетонном слое НП, Па. $\sigma_{1\max}=1,55$ МПа. Вид с внутренней стороны НП

Для каждого варианта нагрузки типа Св+ температурное воздействие + ветровая нагрузка представляются также картины трещинообразования в бетонных слоях а также картины трещинообразования в зависимости от приложенной в процентном отношении ветровой нагрузки.

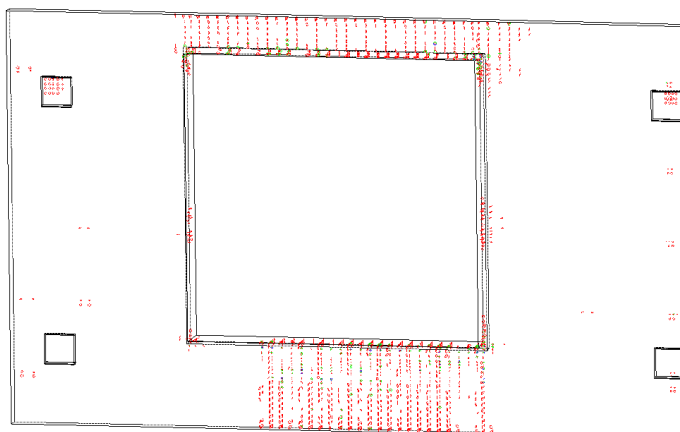


Рис. Св+темп. воздействие (вариант 2)+ветровая нагрузка №6 (отсос). Картина трещинообразования во внутреннем бетонном слое НП

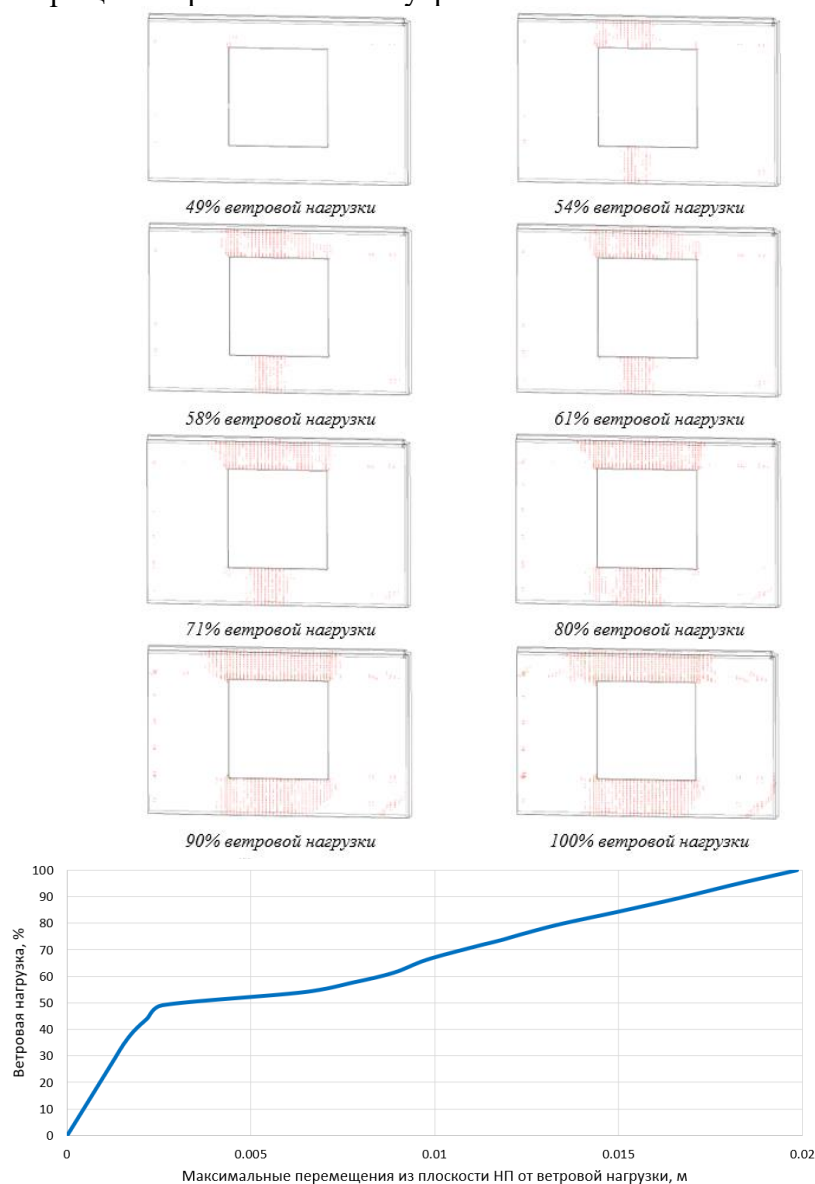


Рис. Св+темп. воздействие (вариант 2)+ветровая нагрузка №6 (отсос). График зависимости максимальных перемещения из плоскости НП от нагрузки

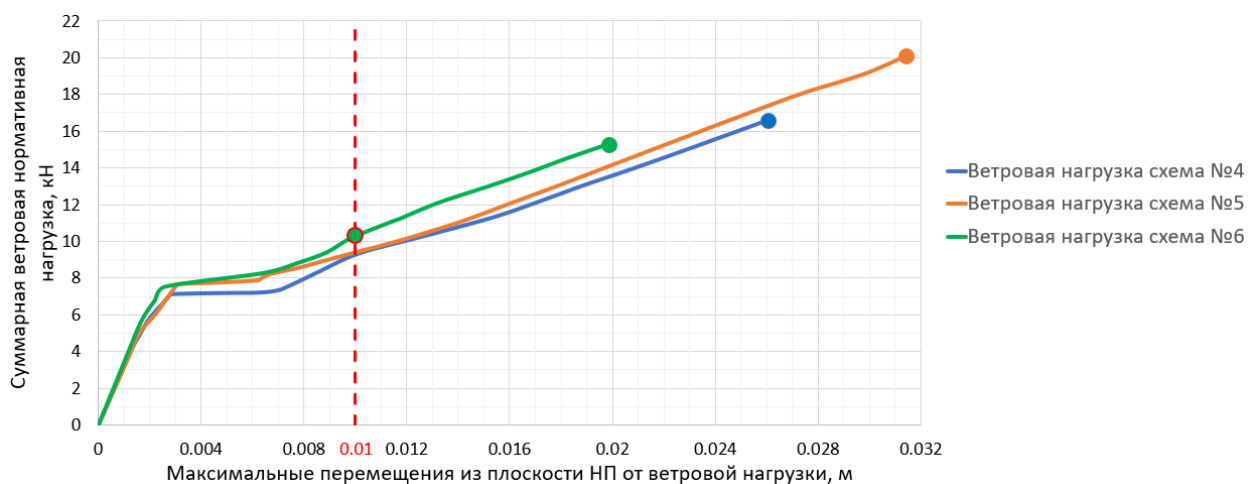


Рис. График зависимости максимальных перемещения из плоскости НП от суммарной нормативной пиковой ветровой нагрузки для различных схем, с отображением предельного прогиба (выпучивания) 10мм

Выводы и рекомендации

Расчетные разработки и исследования, выполненные по этапам 2,3 НИР позволяют сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. Разработаны и верифицированы расчетные объемно-оболочечно-стержневые физически нелинейные конечноэлементные модели трехслойных самонесущих навесных панелей (в программном комплексе ANSYS).
2. Разработана и верифицирована методика расчета трехслойных самонесущих навесных панелей для определения распределения температур по толщине и напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции в физически нелинейной постановке.
3. Выполнены расчеты по определению распределения температур по толщине панели для холодного (вариант 1) и теплого (вариант 2) времени года.
4. По разработанной методике, с учетом различных нагрузок/воздействий, таких как:
 - собственный вес;
 - температурное воздействие в холодное (вариант 1) и теплое (вариант 2) время года (из решения задачи теплопроводности);
 - ветер (напор/отсос) + внутреннее давление (определены на Этапе 1);выполнены расчеты для следующих их сочетаний:
 - Собственный вес (СВ);
 - СВ+температурное воздействие (вариант 2);
 - СВ+температурное воздействие (вариант 1)+ветровая нагрузка схема №1 (напор);
 - (...)
5. Выполненные расчетные исследования показывают, что:
 - при температурных воздействиях НП работает упруго, без значимых зон трещинообразования в бетонных слоях;
 - основной вклад в НДС конструкции, при рассмотренных сочетаниях, вносит ветровая нагрузка (схемы №№ 4,5,6 – отсос);
 - по графикам зависимости максимальных перемещения из плоскости НП от суммарной пиковой нормативной ветровой нагрузки можно выделить три характерные стадии работы: 1 – упругая; 2 – активное трещинообразование в бетоне; 3 – работа панели со сниженной жесткостью с учетом трещин.
6. Проверка трехслойной навесной панели выполнялась по двум предельным состояниям:
 - ПС-1 – 1-ое предельное состояние: а) прочность, б) устойчивость.
 - ПС-2 – 2-ое предельное состояние: а) прогибы в плоскости и из плоскости элемента; б) трещиностойкость.
7. Анализ выполненных расчетных исследований НП показывает, что для всех рассмотренных схем ветровых нагрузок, в сочетании с весом и температурными воздействиями, критерии прочности и устойчивости по 1-му предельному состоянию **выполняются**.
8. Расчетные исследования НП по 2-му предельному состоянию, в том числе, нижеприведенная проверка эстетико-психологического требования по предельным прогибам (выпучиванию), выполнены с учетом нормативной кратковременной пиковой ветровой нагрузки. При этом, в соответствии с «буквой» СП 20.13330.2016 п.Д.1.5, упомянутая расчетная ситуация должна соответствовать действию постоянных и длительных нормативных нагрузок.

Критерии по 2-му предельному состоянию для 95% навесных панелей - при расчетной равномерно-распределенной пиковой ветровой нагрузке (давлении-отсосе), не превышающей 1400Па - **выполняются**.

Для зон фасадов с экстремальными расчетными равномерно-распределенными пиковыми ветровыми давлениями (отсос) более 1400Па (показаны на рисунке ниже) критерий предельного прогиба (выпучивания) 10мм **не выполняется**.

9. Для снижения прогибов (выпучивания) навесных панелей серии НП1.1 в указанных зонах от пиковых ветровых нагрузок рекомендуется принять дополнительные конструктивные мероприятия, направленные на увеличение изгибной жесткости панели.