

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(ННГАСУ)

УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ И ПРОЕКТНЫХ РАБОТ
(УЭПР)



Утверждаю:

Проректор по научной работе,

Д.Р. техн. наук, доцент

Д.В. Монич

15 августа 2023 г.

ОТЧЕТ

«Аэродинамические исследования плоской крыши по типу
ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ на возникающие ветровые давления при
помощи численного моделирования»

Договор № 2023/43

Начальник УЭПР

Хохлов Д.Н.

Руководитель работы

Лампси Б.Б.

2023 г.

Содержание

Содержание	2
Исходные данные.....	3
1 Объект исследования.....	6
2 Общие сведения о расчете на ветровые воздействия	7
3 Граничные и начальные условия	9
3.1 Тип местности А	9
3.2 Тип местности В	13
4 Проведение испытаний	17
4.1 Тип местности А	17
4.1.1 Ветровой район II	17
4.1.2 Ветровой район III	19
4.2 Тип местности В	22
4.2.1 Ветровой район II	22
4.2.2 Ветровой район III	23
4.2.3 Ветровой район IV	26
5 Обработка результатов.....	29
5.1 Тип местности А	29
5.2 Тип местности В	31
6 Выводы	33
Список литературы.....	35

Изм.	Кол.	Лист	№док	Подп.	Дата			
Выполнил						Стад.	Лист	Листов
Проверил								
ГИП						ННГАСУ		
						Численное исследование кровельного решения ТН- КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ		

Исходные данные

Исследуемое здание представляет собой прямоугольное в плане здание размерами 56,0x16,0 м. Высота здания составляет 75,0 м. На крыше имеется парапет высотой до 2,0 м и общей толщиной 210,0 мм. Крыша исследуемого объекта – плоская, с уклоном 2,1%. За основу кровельного решения принята система компании ТехноНИКОЛЬ: ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS на клей пену (рис. 1). Состав пирога кровли с указанием толщин и масс приведен в таблице 1. Основные физико-механические характеристики панелей Ц-XPS приведены в таблице 2. На парапет полностью заведен водоизоляционный ковер (рис. 2).

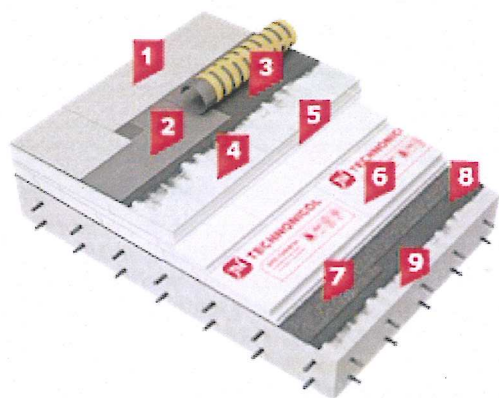
В рамках технического задания были поставлены следующие задачи:

1. Определить максимальную ветровую нагрузку для типов местности А и В, при которой нарушается целостность конструкции:

- разрыв/отслоение битумно-полимерной кровли (Техноэласт ЭКП + Унифлекс ВЕНТ ЭПВ);

- отрыв/переворот одной или группы плит Ц-XPS, в случаях, когда после снятия нагрузки плиты не возвращаются в исходное положение.

2. Определить ветровые районы, в которых возможно применять данное решение.



1. Техноэласт ЭКП
2. Унифлекс ЭПВ
3. Праймер полимерный быстросохнущий №08
4. Сэндвич ТЕХНОНИКОЛЬ Ц-XPS
5. Клиновидные плиты XPS
ТЕХНОНИКОЛЬ CARBON PROF SLOPE 2,1%
6. Экструзионный пенополистирол XPS
ТЕХНОНИКОЛЬ CARBON PROF
7. Технобарьер*
8. Праймер полимерный быстросохнущий (при сплошной приклейке)
9. Железобетонное основание

Рис. 1. Кровельное решение ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ

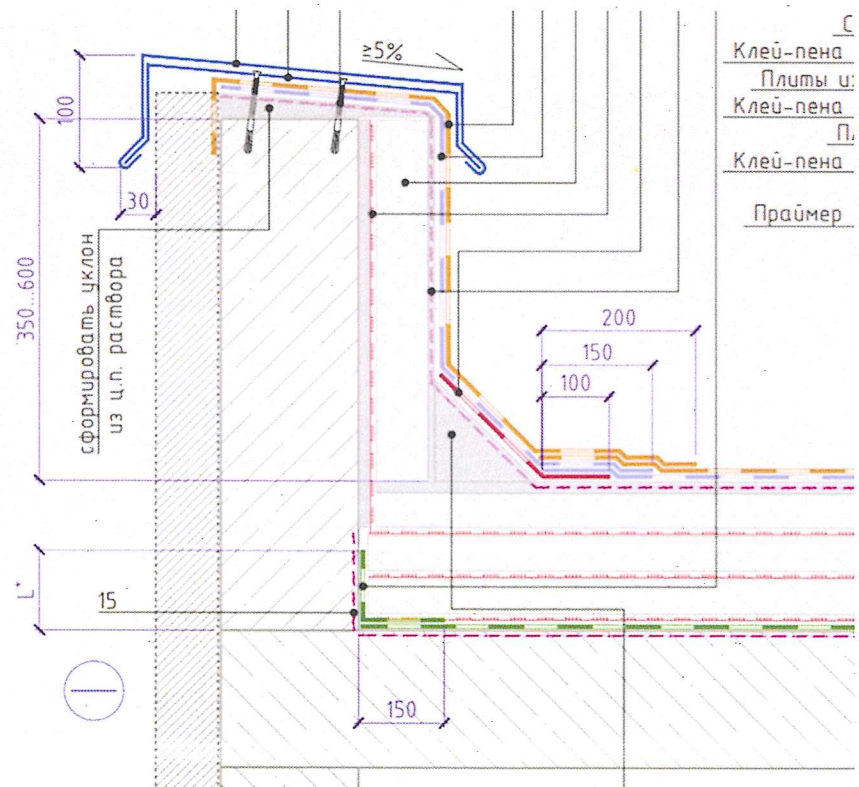


Рис. 2. Парапетный узел

Таблица 1. Состав кровельной конструкции

№	Наименование	Толщина, мм	Масса 1 м ² , кг	Способ укладки, адгезия
1	Техноэласт ЭКП	4,2	5,3	Приклейка к Унифлекс ВЕНТ, адгезия не менее 0,1 МПа
2	Унифлекс ВЕНТ П	2,8	4	Приклейка к плитам Ц-XPS, адгезия не менее 0,05 МПа
3	Сэндвич ТЕХНОНИКОЛЬ Ц-XPS, огрунтованный праймером	60	21,9	Свободная укладка
4	Клиновидные плиты (для создания уклонов) XPS ТЕХНОНИКОЛЬ CARBON PROF SLOPE 2,1%	От 10 мм	От 0,86	Свободная укладка
5	XPS ТЕХНОНИКОЛЬ CARBON PROF	100	2,44	Свободная укладка
6	Пароизоляция Технобарьер	2,8	4	Приклейка к ж/б основанию, адгезия не менее 0,05 МПа
7	Ж/б несущее основание			

Таблица 2. Основные физико-механические характеристики панелей Ц-ХПС

ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

Наименование показателя	Ед. изм.	Критерий	Значение	Метод испытаний
Прочность на сжатие теплоизоляционного слоя при 10 % относительной деформации	кПа	не менее	150	ГОСТ EN 826-2011, ГОСТ 32310-2020 (EN 13164+A.1:2015)
Предел прочности на отрыв слоев	кПа	не менее	50	ГОСТ EN 1607-2011
Предел прочности при изгибе	кПа	не менее	300	ГОСТ 17177-94
Теплопроводность утеплителя в сухом состоянии при температуре (25±5) °С	Вт/(м·К)	не более	0,033	ГОСТ 7076-99, ГОСТ 32310-2020 (EN 13164+A.1:2015)
Теплопроводность в условиях эксплуатации «А» и «Б»	Вт/(м·К)	не более	0,034	ГОСТ Р 54855-2011
Сопrotивление теплопередаче теплоизоляционного слоя:				
50 мм	м ² ·К/Вт	-	1,471	-
100 мм			2,941	
Водопоглощение утеплителя за 24 часа, по объему	%	не более	0,4	ГОСТ 15588-2014
Коэффициент паропроницаемости	мг/(м·ч·Па)	-	0,01	ГОСТ 25898-2020
Влажность стяжки	%	не более	5	-
Группа горючести панели	-	-	Г1*	ГОСТ 30244-94

* Для толщины высокопрочной цементно-песчаной стяжки от 10 мм.

1 Объект исследования

Объект исследования представляет собой прямоугольное в плане здание размерами 56,0x16,0 м. Высота здания – 75,0 м. Здание имеет плоскую крышу с парапетом высотой до 2,0 м. За основу принято решение ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS на клей пену. Уклон плоской кровли составляет 2,1%.

Будем считать, что на здание действуют ветровая нагрузка, которая способствует подъему кровли из-за возникновения ветрового отсоса и собственный вес конструкций покрытия, который будет препятствовать этому подъему.

В рамках исследования будут проведены аэродинамические исследования формы здания на возникающие ветровые давления при помощи численного моделирования. На основе полученных данных будет выделена полоса шириной 1,0 м, на которой имеются наибольшие давления, затем такая полоса будет рассчитана как двухшарнирная балка с приложенной на нее нагрузками.

Исходя из данных таблицы 1 Настоящего отчета определяем действующую нагрузку от собственного веса состава покрытия, с которой в дальнейшем будем производить сравнение. Результаты сводим в таблицу 3.

Таблица 3. Вес покрытия

№	Наименование	Толщина, мм	Масса 1 м ² , кг
1	Техноэласт ЭКП	4,2	5,3
2	Унифлекс ВЕНТ ЭПВ	2,8	4
3	Сэндвич ТЕХНОНИКОЛЬ Ц-XPS	60	21,9
	ВСЕГО:		31,2

Возможными аварийными ситуациями будут являться:

- Отслоение Техноэласт ЭКП – адгезия составляет 0,1МПа или 100,0 кПа;
- Отслоение Унифлекс ВЕНТ П – адгезия составляет 0,05МПа или 50,0 кПа;
- Превышение предела прочности при изгибе плит Ц-XPS.

2 Общие сведения о расчете на ветровые воздействия

Расчеты ветровых потоков и воздействий сводятся в общем случае к численному решению системы трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики. В практических задачах определения ветровых нагрузок и воздействия на здания и сооружения с практически обоснованным упрощением ветровые потоки принимаются несжимаемыми ($\rho = const$), изотермическими ($T = const$), а внешние массовые силы не учитываются.

Численное моделирование выполнено с использованием рабочей среды программного обеспечения *Ansys Workbench* и модуля вычислительной гидрогазодинамики *Ansys CFX* (лицензия *Ansys CostumerNumber*: 1051709).

Была построена трехмерная *CAD* модель с целью дальнейшего импорта в *SpaceClaim* – рабочей среды *ANSYS Workbench*. Модель представляет собой твердотельный объем *Solid*, моделирующий воздушное пространство вокруг исследуемого объекта, которому задано свойство *Fluid*, отвечающее за назначение для последующего расчета свойств газовой среды. Размеры рабочего пространства были приняты в соответствии с [1] в зависимости от максимального размера объекта: $A \geq 5H_{max}$, $B \geq 5H_{max}$, $C \geq 10 H_{max}$, $D \geq 5H_{max}$ (рис. 3). В данном исследовании были приняты следующие значения: $A = B = D = 400,0$ м, $C = 900,0$ м.

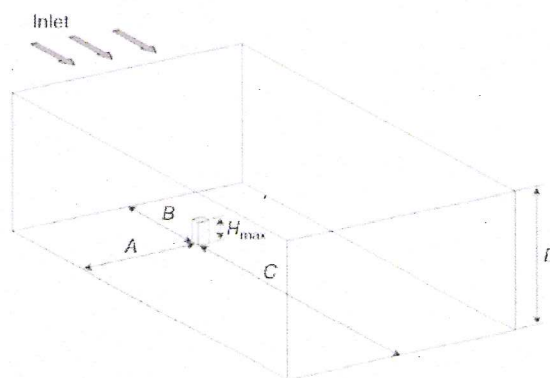
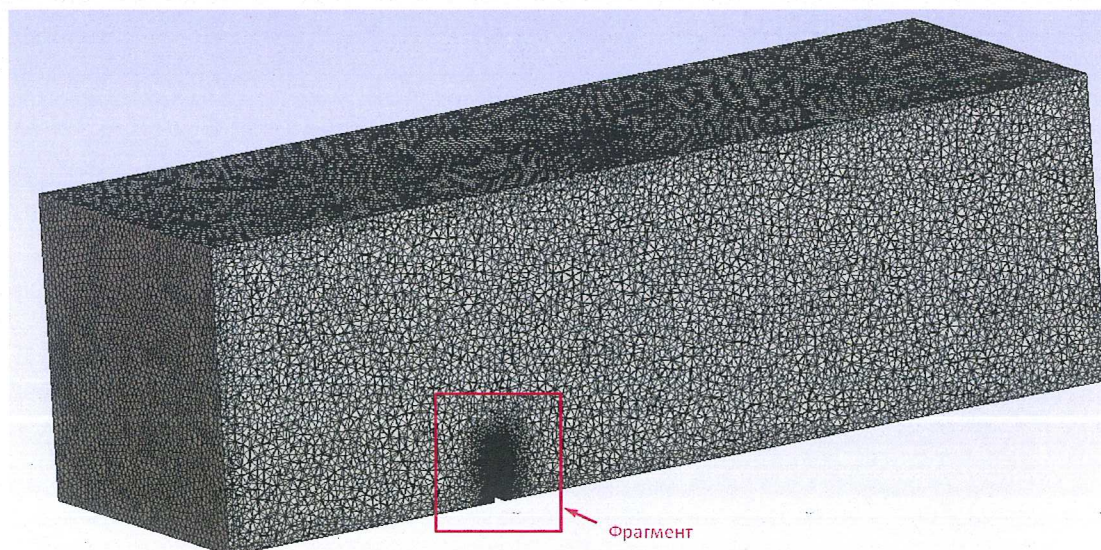


Рис. 3. Размеры ограничивающей области

После создания расчетной области производится формирование расчетной сетки (рис. 4) в сеточном препроцессоре *ANSYS Meshing*. Предварительно задаются именованные границы поверхностей расчетной области, необходимые для последующего задания граничных условий течения воздуха. Для корректного

воспроизведения течения в настройках сеточного генератора задается сгущение элементов сетки к поверхности здания.

а)



б)

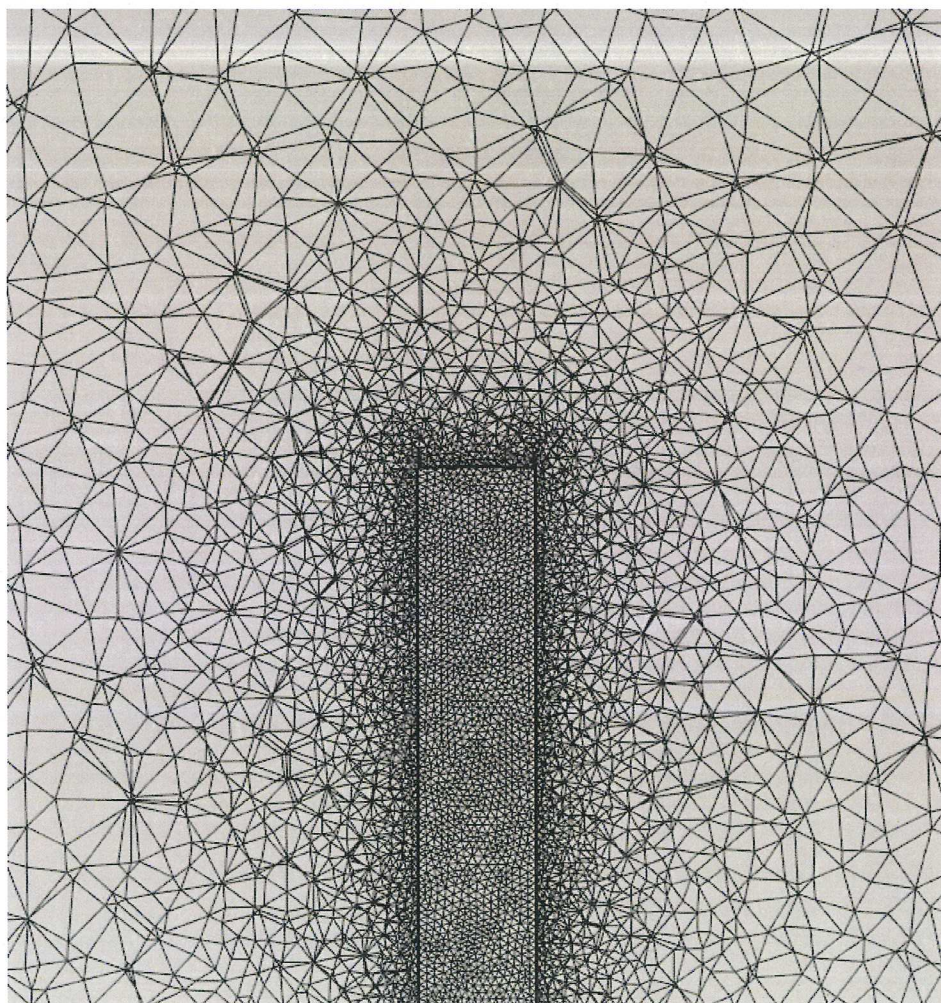


Рис. 4. Расчетная сетка, сформированная в *Ansys Meshing* (а – общая модель, б – фрагмент пространства в районе исследуемого здания)

3 Граничные и начальные условия

3.1 Тип местности А

Во вкладке *Fluid Models* осуществляется выбор модели турбулентного течения. Выбираем модель турбулентности *SST (Shear Stress Transport)*, как наиболее подходящую для решения задач по аэродинамике здания по различным рекомендациям.

На «выходе» (*OUTLET*) используются «мягкие» граничные условия по Нейману (равенство нулю производных) с нулевыми дополнительными давлениями и такими же параметрами турбулентности, как и на «входе».

На верхней и боковых (для расчетной области в форме параллелепипеда) границах расчетной области используются условия симметрии потока. На нижней границе расчетной области (земле) и на всех поверхностях зданий и сооружений используется условие «стенки с прилипанием» ($u = v = w = 0$ м/с), исключающее проникновение вещества через поверхность.

В качестве характеристик набегающего потока (граничные условия на «входе» (*INLET*)) используется профиль ветра, определяемый на основании действующих нормативных документов по формуле 2 [2].

$$U(z) = U_o \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha, U_o = \left(\frac{2w_0}{\rho} \right)^{0.5},$$

где, $w_0 = 0,30 \text{ кПа} = 300 \text{ Па}$ – нормативное значение ветрового давления для II ветрового района по табл. 11.1 [3];

$\rho = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях;

$z_0 = 10,0, \alpha = 0,15$ – параметры, определяемые типом шероховатости местности по табл. 4 [2] как для типа местности А.

$$U_o = \left(\frac{2 \cdot 300}{1,2} \right)^{0.5} = 22,36 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Общий вид закона изменения скорости ветра с высотой будет иметь вид:

$$U(z) = 22,36 \left(\frac{z}{10,0} \right)^{0,15}.$$

Профиль скорости на входе представлен на рисунке 5.

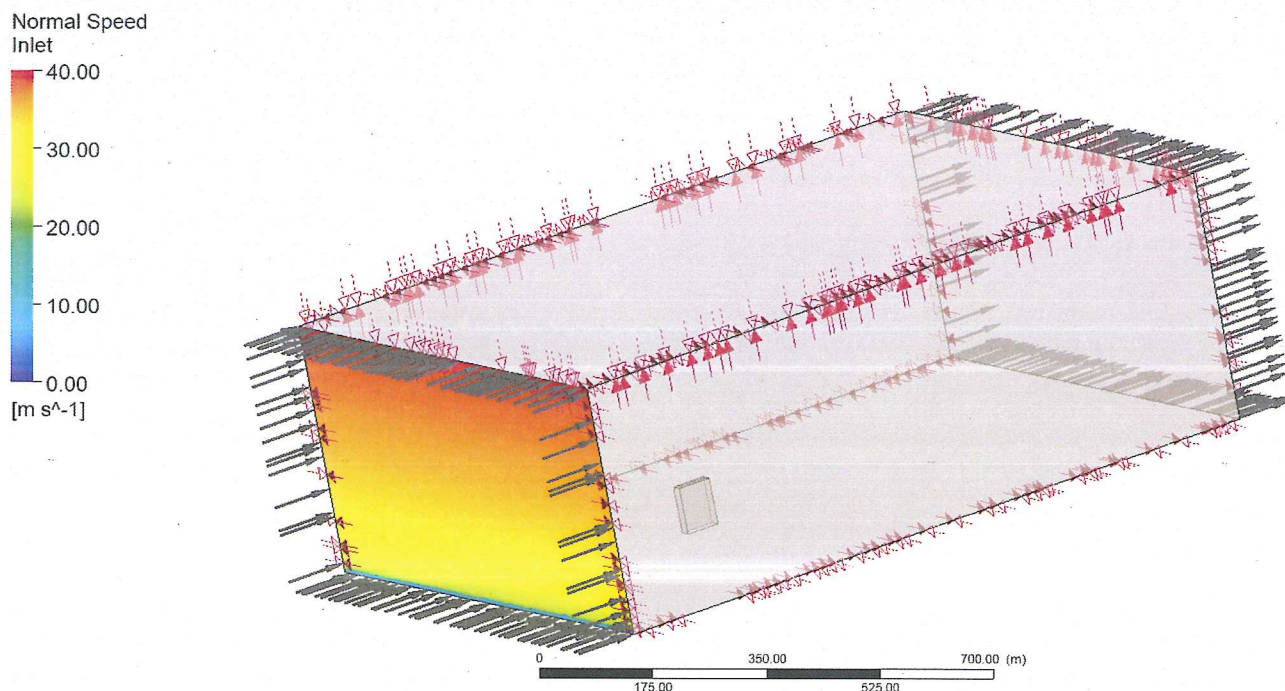


Рис. 5. Профиль скорости (II ветровой район)

Также на входе необходимо задать значения интенсивности и масштаба длины вихрей турбулентности. В российских нормативных документах данные значения не регламентируются, таким образом можно обратиться к нормам других стран, в которых имеются данные по характеристикам турбулентности. Обратимся к европейским нормам [4].

Интенсивность турбулентности определяется по формуле 4.7 [4]:

$$I_v(z) = \frac{k_l}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)},$$

где, $k_l = 1,0$ – параметр турбулентности, принимаемый по рекомендациям [4];

$c_0(z) = 1,0$ – топографический коэффициент;

$z_0 = 0,01$ – длина шероховатости, определяемые по табл. 4.1 [4].

Полученные значения интенсивности турбулентности сведены в таблицу 4 и представлены на рисунке 6.

Таблица 4. Данные интенсивности турбулентности

$z, \text{ м}$	$I_v(z)$
0	0.14960
8	0.14960
20	0.13156
50	0.11741
75,0	0.11207
100,0	0.10857
150,0	0.10400
200,0	0.10097
250,0	0.09875
300,0	0.09700
350,0	0.09557
400,0	0.09437

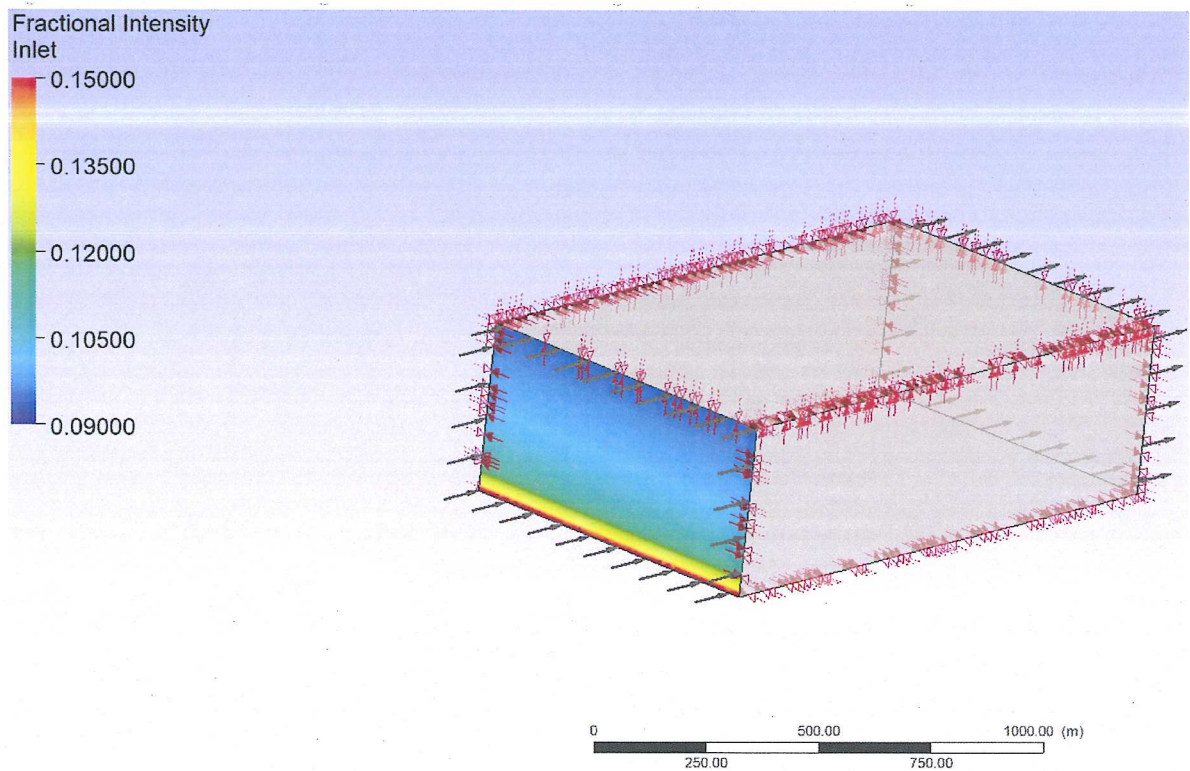


Рис. 6. Профиль интенсивности турбулентности

Масштаб длины вихрей турбулентности определяется по формуле В.1 [4]:

$$L(z) = L_t \left(\frac{z}{z_t} \right)^\alpha ;$$

$z_t = 200 \text{ м}$ – контрольная высота;

$L_t = 300 \text{ м}$ – контрольная длина турбулентности;

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0) = 0,67 + 0,05 \ln(0,01) = 0,44.$$

Полученные значения масштаба длины вихрей турбулентности сведены в таблицу 5 и представлены на рисунке 7.

Таблица 5. Данные масштаба длины вихрей турбулентности

$z, \text{ м}$	$L(z)$
0	72.783
8	72.783
20	108.923
50	163.010
75,0	194.848
100,0	221.14
150,0	264.331
200,0	300,00
250,0	330.949
300,0	358.593
350,0	383.758
400,0	406.981

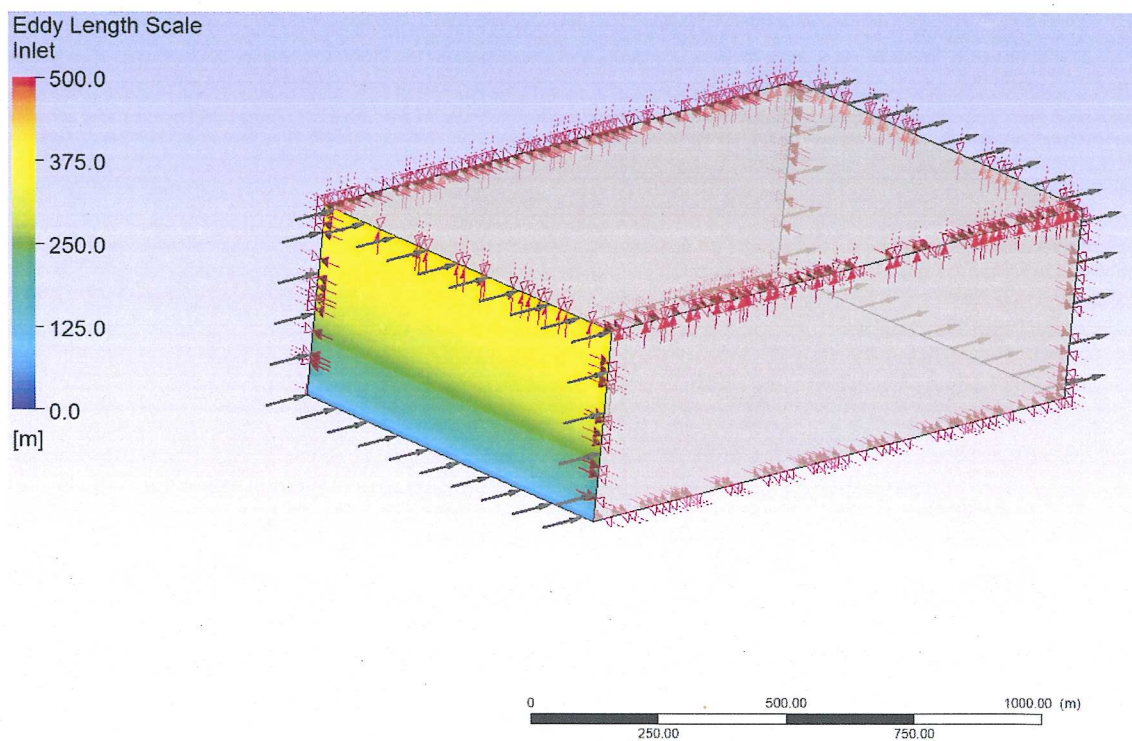


Рис. 7. Профиль масштаба длины вихрей турбулентности

3.2 Тип местности В

Граничные условия на «выходе» (*OUTLET*), а также на верхней и боковых (для расчетной области в форме параллелепипеда) гранях расчетной области остаются такими же, как указано в пункте 3.1.

В качестве характеристик набегающего потока (граничные условия на «входе» (*INLET*)) используется профиль ветра, определяемый на основании действующих нормативных документов по формуле 2 [2].

$$U(z) = U_o \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha, U_o = \left(\frac{2w_0}{\rho} \right)^{0.5},$$

где, $w_0 = 0,30 \text{ кПа} = 300 \text{ Па}$ – нормативное значение ветрового давления для II ветрового района по табл. 11.1 [3];

$\rho = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях;

$z_0 = 30,5, \alpha = 0,20$ – параметры, определяемые типом шероховатости местности по табл. 4 [2] как для типа местности В.

$$U_o = \left(\frac{2 \cdot 300}{1,2} \right)^{0.5} = 22,36 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Общий вид закона изменения скорости ветра с высотой будет иметь вид:

$$U(z) = 22,36 \left(\frac{z}{30,5} \right)^{0,2}.$$

Профиль скорости на входе представлен на рисунке 10.

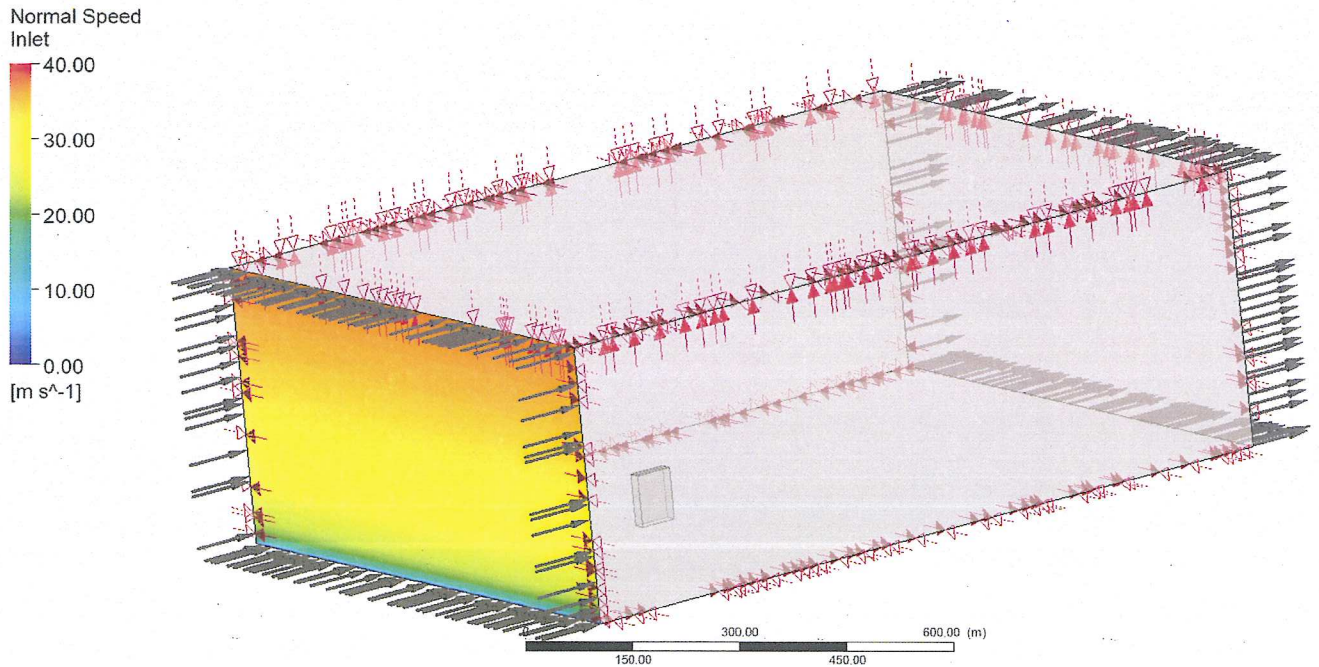


Рис. 10. Профиль скорости (II ветровой район)

Интенсивность турбулентности определяется по формуле 4.7 [4]:

$$I_v(z) = \frac{k_t}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)},$$

где, $k_t = 1,0$ – параметр турбулентности, принимаемый по рекомендациям [4];

$c_0(z) = 1,0$ – топографический коэффициент;

$z_0 = 0,3$ – длина шероховатости, определяемые по табл. 4.1 [4].

Полученные значения интенсивности турбулентности сведены в таблицу 6 и представлены на рисунке 11.

Таблица 6. Данные интенсивности турбулентности

$z, \text{ м}$	$I_v(z)$
0	0.30456
8	0.30456
20	0.23811
50	0.19547
75,0	0.18111
100,0	0.17214
150,0	0.16091
200,0	0.15379
250,0	0.14869
300,0	0.14476
350,0	0.14160
400,0	0.13898

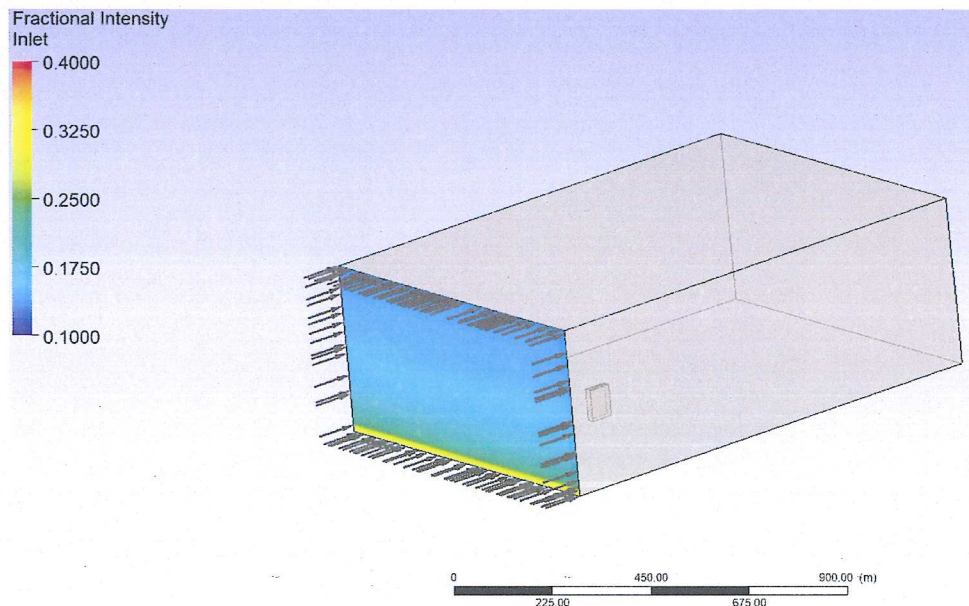


Рис. 11. Профиль интенсивности турбулентности

Масштаб длины вихрей турбулентности определяется по формуле В.1 [4]:

$$L(z) = L_t \left(\frac{z}{z_t} \right)^\alpha ;$$

$z_t = 200$ м – контрольная высота;

$L_t = 300$ м – контрольная длина турбулентности;

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0) = 0,67 + 0,05 \ln(0,3) = 0,61.$$

Полученные значения масштаба длины вихрей турбулентности сведены в таблицу 7 и представлены на рисунке 12.

Таблица 7. Данные масштаба длины вихрей турбулентности

$z, \text{ м}$	$L(z)$
0	42,109
8	42,109
20	73,641
50	128,785
75,0	164,923
100,0	196,559
150,0	251,715
200,0	300,00
250,0	343,745
300,0	384,182
350,0	422,060
400,0	457,878

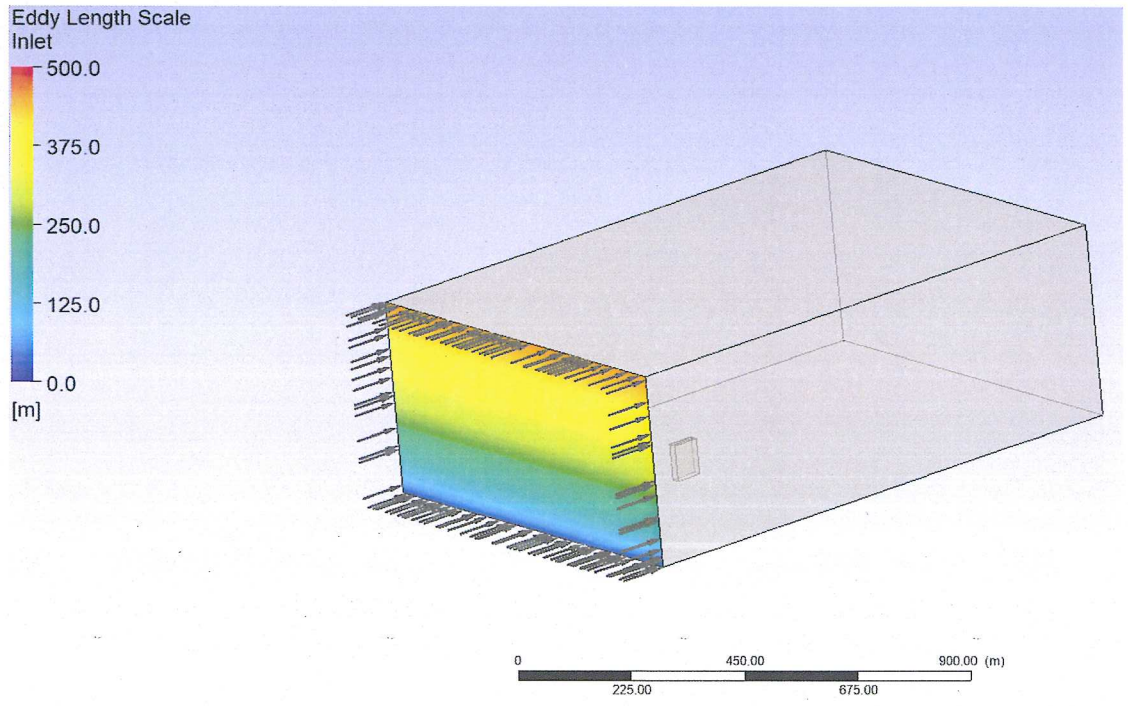


Рис. 12. Профиль масштаба длины вихрей турбулентности

4 Проведение испытаний

Расчет производился в рабочей среде *Ansys CFX-Solver Manager*, в качестве необходимых значений, которые должны быть достигнуты, были заданы среднеквадратичные невязки $RMS=10^{-4}$. По основным графикам *CFX-Solver Manager* можно сделать следующие выводы:

- 1) Среднеквадратичные невязки (RMS) основных уравнений гидрогазодинамики находятся ниже значения $1E^{-4}$;
- 2) Среднеквадратичные невязки (RMS) основных уравнений турбулентности также находятся ниже значения $1E^{-4}$;
- 3) Графики значения сил, действующих на здание, выходят на горизонталь.

Данные выводы говорят о достижении требуемой сходимости решений уравнений и дает возможность перейти к анализу полученных результатов.

Для статического расчета балок применяется программно-вычислительный комплекс *SCAD Office*.

4.1 Тип местности А

4.1.1 Ветровой район II

Результаты аэродинамических испытаний для здания, расположенном в II ветровом районе представлены на рисунке 13.

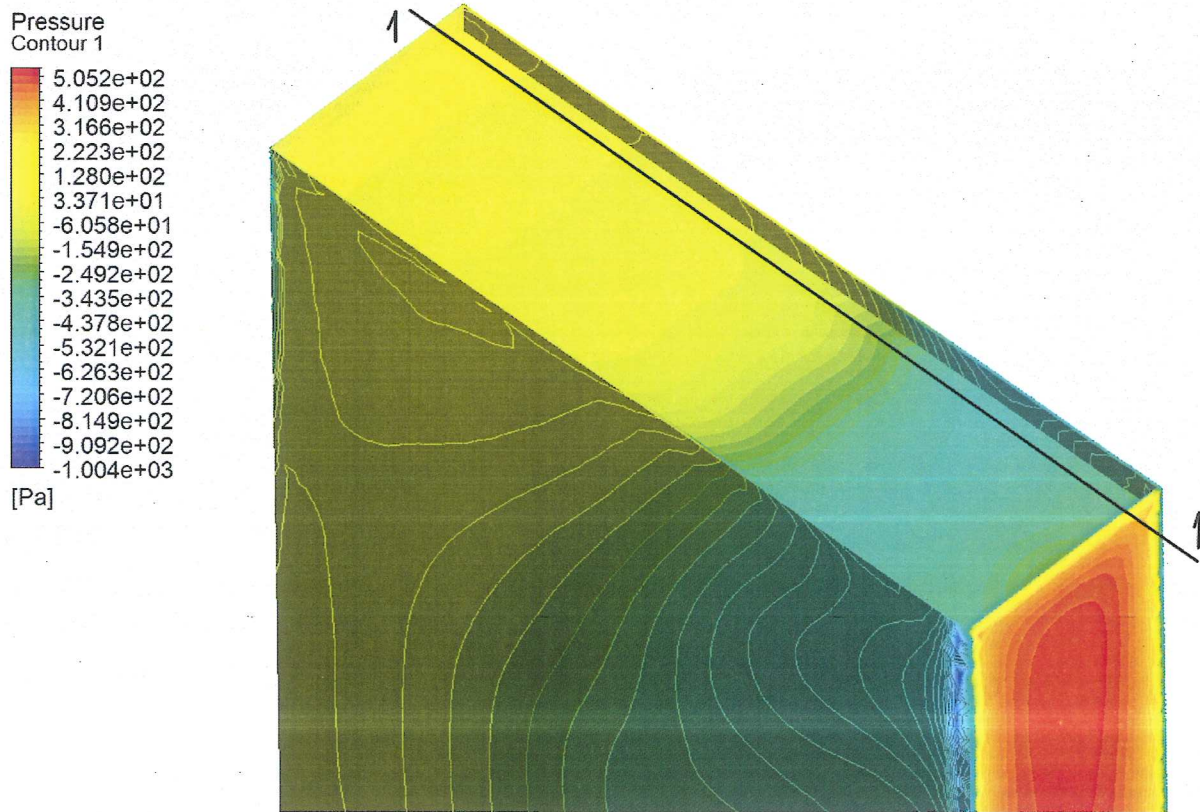


Рис. 13. Результаты численного моделирования

Как говорилось ранее, в качестве расчетной схемы принимается двухшарнирная балка шириной 1,0 м. Схема приложения нагрузки приведена на рисунке 14.

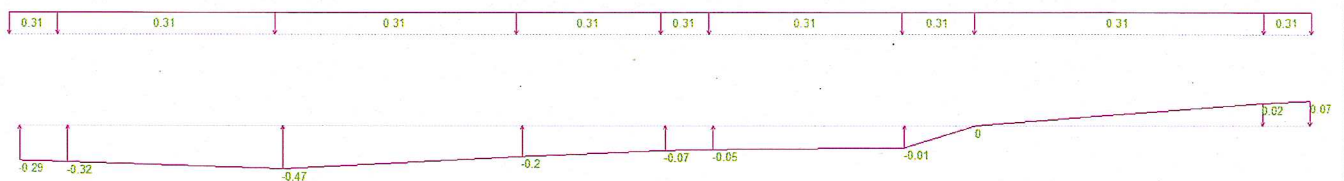


Рис. 14. Схема приложения нагрузка на балку: а – нагрузка от собственного веса кровли,
б – ветровая нагрузка

От действующих нагрузок составляется комбинация загрузений и строится эпюра изгибающих моментов (рис. 15).



Рис. 15. Эпюры изгибающих моментов

Из эпюры видно, что при заданной комбинации нагрузок не возникает подъема покрытия, следовательно, нет ограничений по применению решения кровли ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS на клей пену во II ветровой зоне для типа местности А.

Следует повысить ветровой район до III района, для которого нормативное значение ветрового давления по табл. 11.1 [3] составляет $w_0 = 0,38 \text{ кПа} = 380 \text{ Па}$.

4.1.2 Ветровой район III

Профиль ветра для III ветровой зоны будет иметь следующую зависимость:

$$U_0 = \left(\frac{2 \cdot 380}{1,2} \right)^{0,5} = 25,17 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Общий вид закона изменения скорости ветра с высотой будет иметь вид:

$$U(z) = 25,17 \left(\frac{z}{10,0} \right)^{0,15}$$

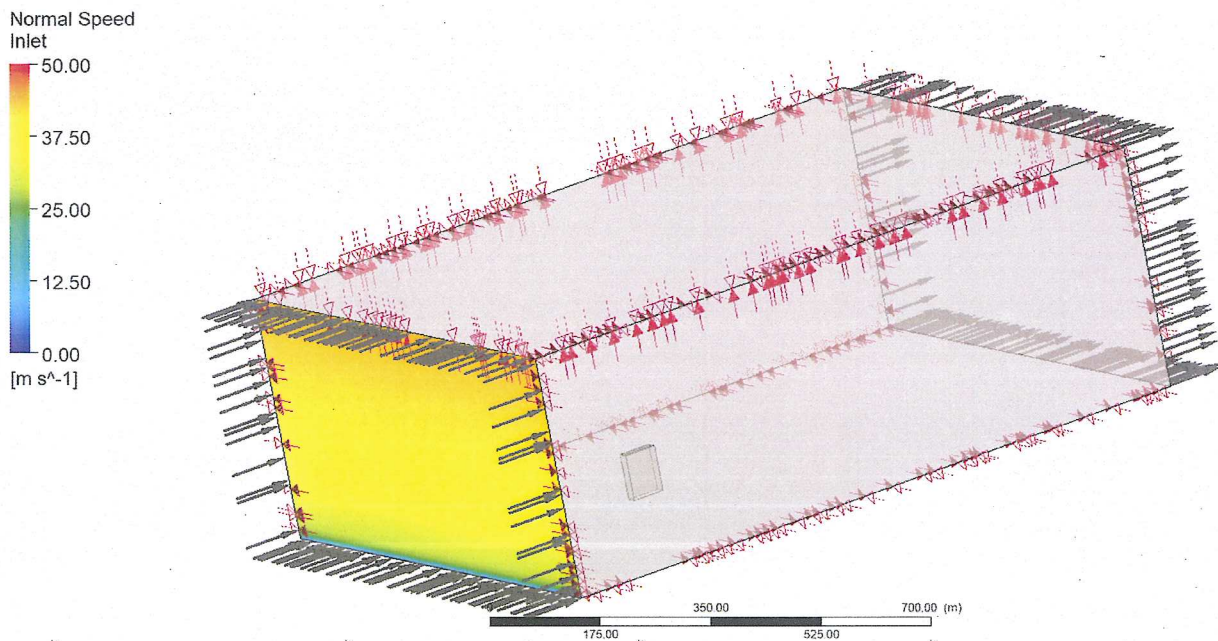


Рис. 16. Профиль скорости (III ветровой район)

Интенсивность турбулентности и масштаб длины вихрей остаются без изменения.

Результаты аэродинамических испытаний для здания, расположенном в II ветровом районе представлены на рисунке 17.

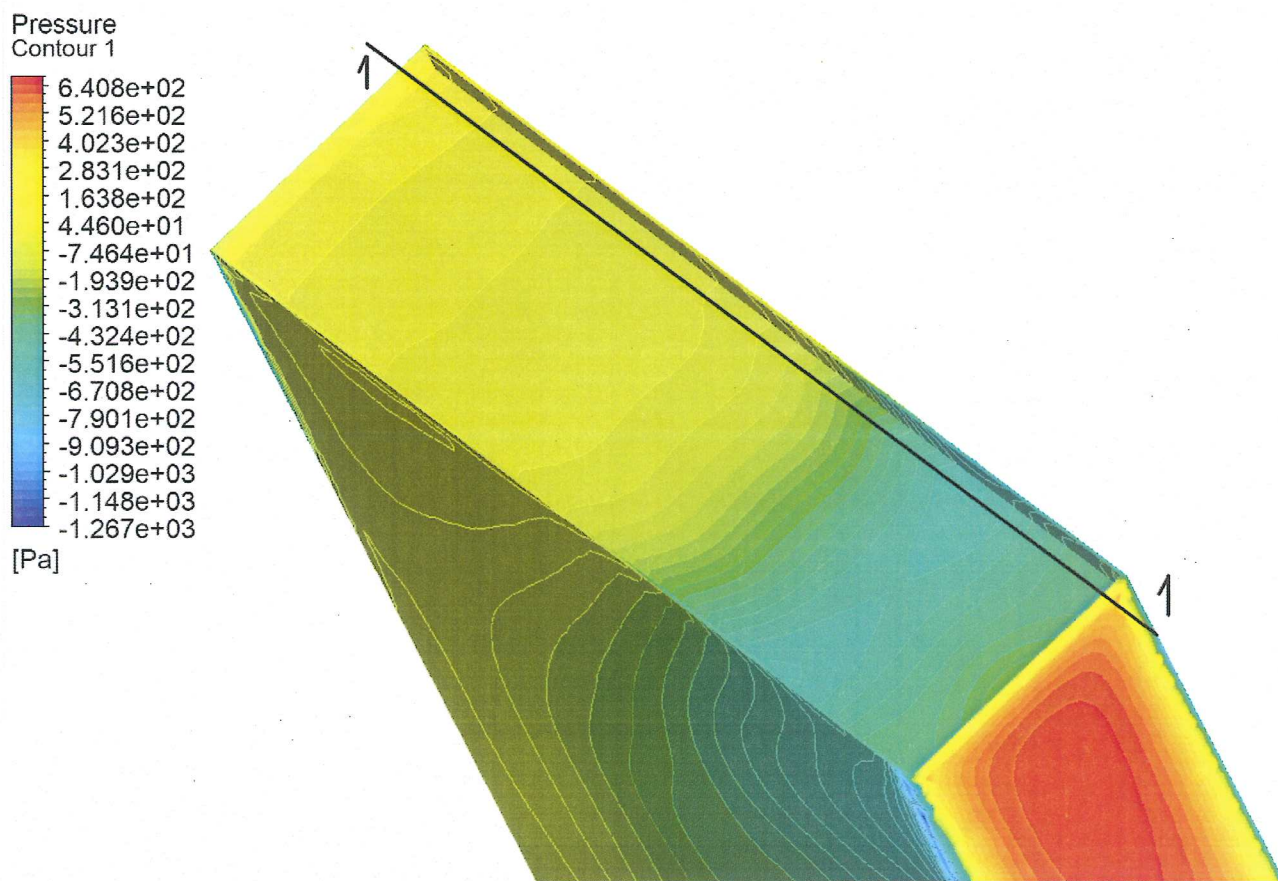


Рис. 17. Результаты численного моделирования

Действующие на двухшарнирную балку нагрузки приведены на рисунке 18.

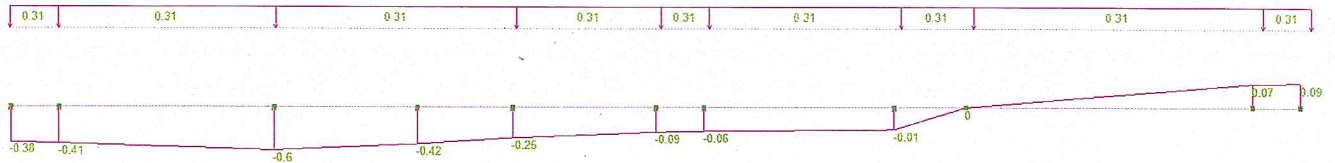


Рис. 18. Схема приложения нагрузка на балку: а – нагрузка от собственного веса кровли, б – ветровая нагрузка

От действующих нагрузок составляется комбинация загрузений и строится эпюра изгибающих моментов (рис. 19).

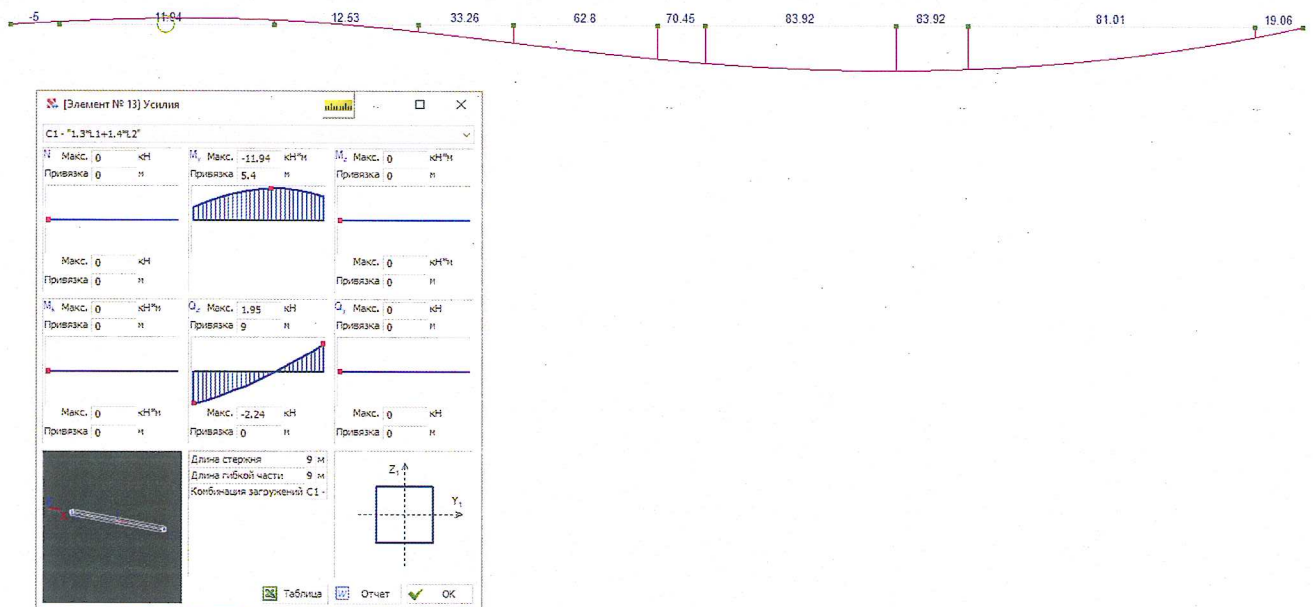


Рис. 19. Эпюра изгибающих моментов

Расчет производится по формулам балок, работающих на изгиб:

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W_x} \leq [\sigma] = 300,0 \text{ кПа},$$

где:

$M_{max} = 11,94 \text{ кН} \cdot \text{м}$ - максимальный изгибающий момент;

$W_x = \frac{1,0 \cdot 0,06^2}{6} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ - Момент сопротивления сечения (утеплитель толщиной 60,0 мм).

$$\sigma = \frac{11,94}{6 \cdot 10^{-4}} = 19\,900,0 \text{ кПа} > [\sigma] = 300,0 \text{ кПа}.$$

Следовательно, в III ветровом районе не рекомендуется к применению на высоте 75,0 метров решение кровли ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ.

4.2 Тип местности В

4.2.1 Ветровой район II

Результаты аэродинамических испытаний для здания, расположенном в II ветровом районе представлены на рисунке 20.

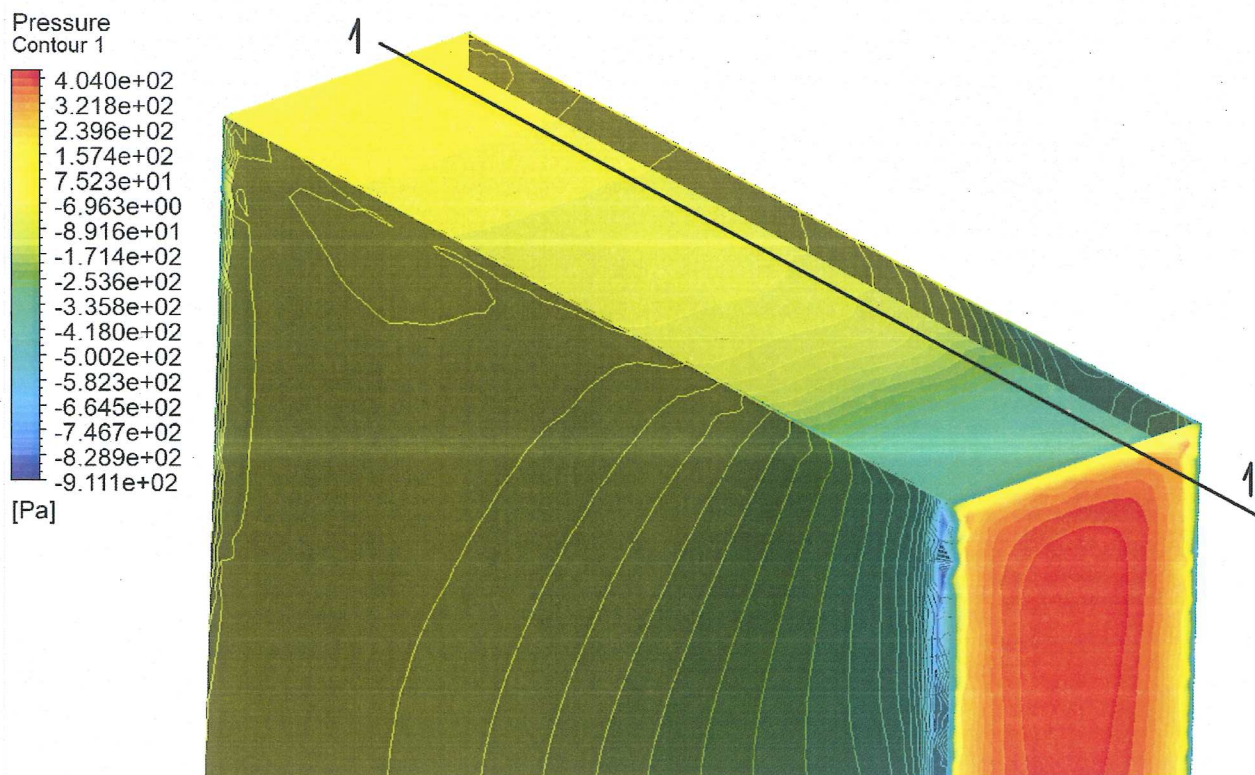


Рис. 20. Результаты численного моделирования

Действующие на двухшарнирную балку нагрузки приведены на рисунке 21.

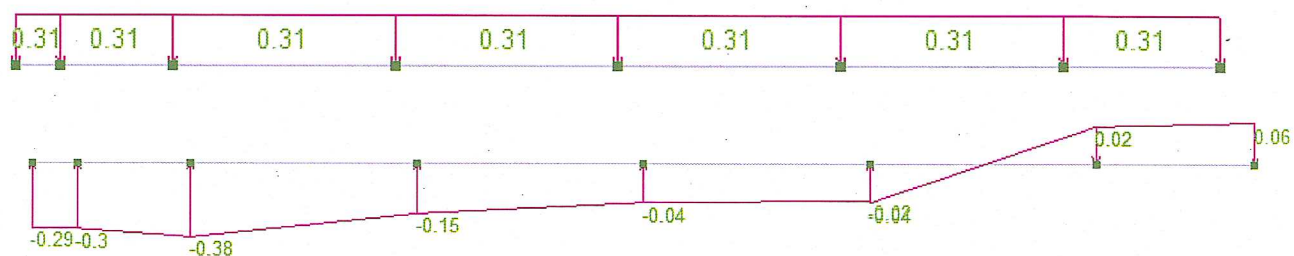


Рис. 21. Схема приложения нагрузка на балку: а – нагрузка от собственного веса кровли,
б – ветровая нагрузка

От действующих нагрузок составляется комбинация загрузжений и строится эпюра изгибающих моментов (рис. 22).

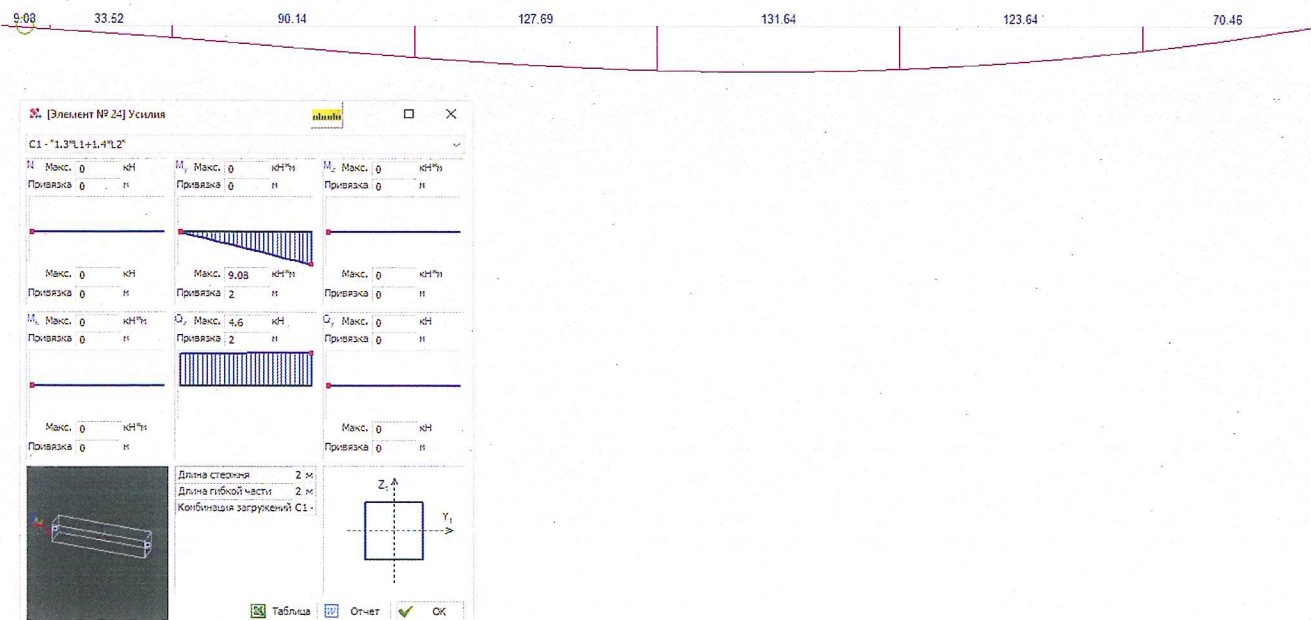


Рис. 22. Эпюры изгибающих моментов

Из эпюры видно, что при заданной комбинации нагрузок не возникает подъема покрытия, следовательно, нет ограничений по применению решения кровли ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS на клей пену во II ветровой районе для типа местности В.

Следует повысить ветровой район до III района, для которого нормативное значение ветрового давления по табл. 11.1 [3] составляет $w_0 = 0,38 \text{ кПа} = 380 \text{ Па}$.

4.2.2 Ветровой район III

Профиль ветра для III ветрового района будет иметь следующую зависимость:

$$U_0 = \left(\frac{2 \cdot 380}{1,2} \right)^{0,5} = 25,17 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Общий вид закона изменения скорости ветра с высотой будет иметь вид:

$$U(z) = 25,17 \left(\frac{z}{10,0} \right)^{0,15}$$

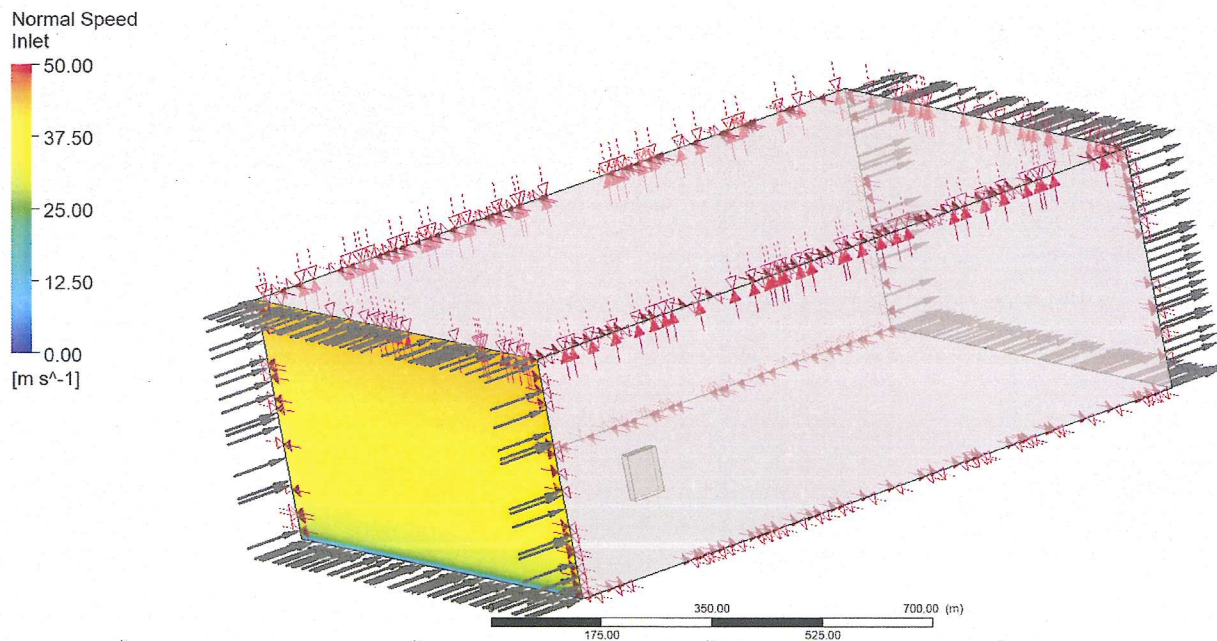


Рис. 23. Профиль скорости (III ветровой район)

Интенсивность турбулентности и масштаб длины вихрей остаются без изменения.

Результаты аэродинамических испытаний для здания, расположенном в III ветровом районе представлены на рисунке 24.

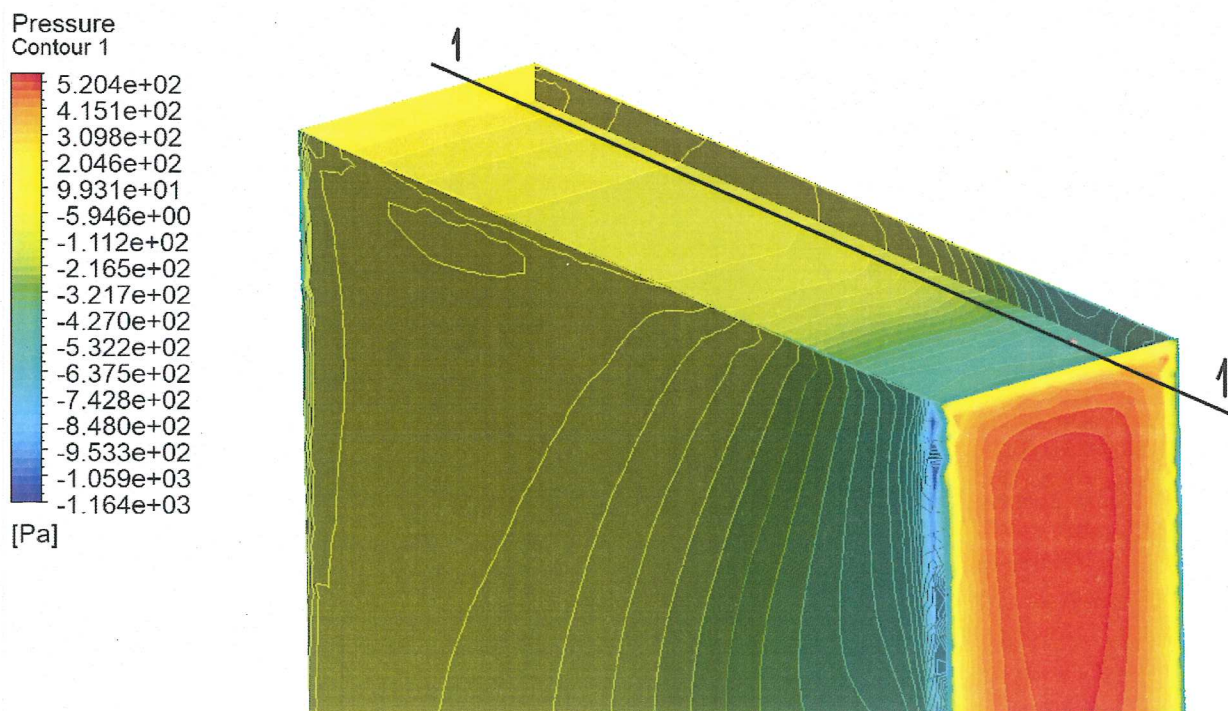


Рис. 24. Результаты численного моделирования

Как говорилось ранее, в качестве расчетной схемы принимается двухшарнирная балка шириной 1,0 м. Схема приложения нагрузки приведена на рисунке 25.



Рис. 25. Схема приложения нагрузка на балку: а – нагрузка от собственного веса кровли, б – ветровая нагрузка

От действующих нагрузок составляется комбинация загрузжений и строится эпюра изгибающих моментов (рис. 26).

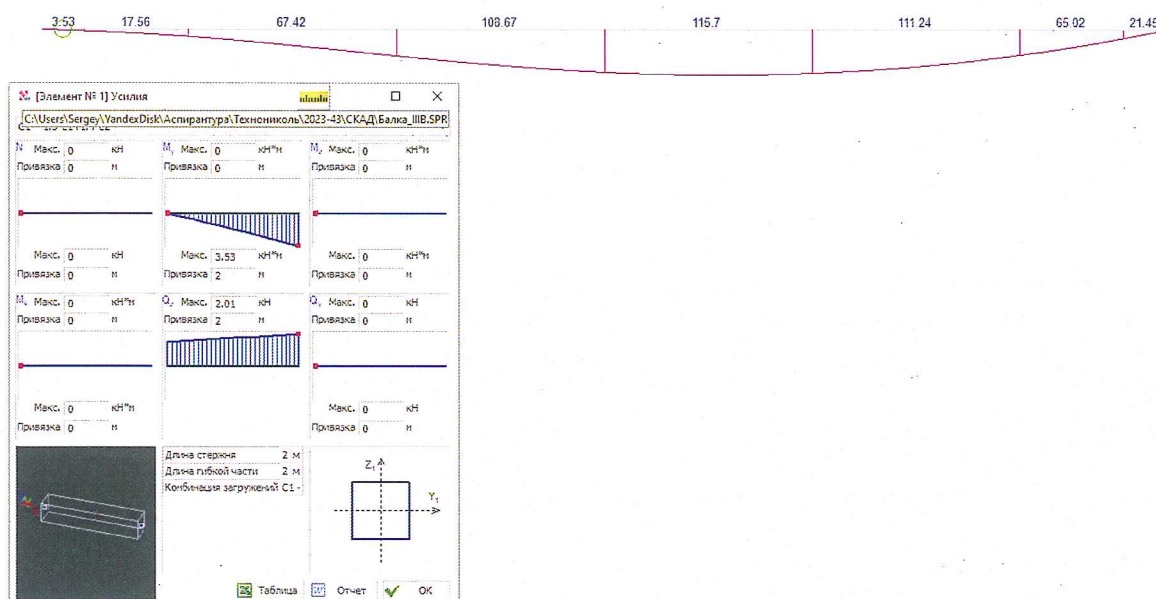


Рис. 26. Эпюра изгибающих моментов

Из эпюры видно, что при заданной комбинации загрузжений не возникает подъема покрытия, следовательно, нет ограничений по применению решения кровли ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS на клей пену во III ветровой районе для типа местности В.

Следует повысить ветровой район до IV района, для которого нормативное значение ветрового давления по табл. 11.1 [3] составляет $w_0 = 0,48\text{кПа} = 480\text{ Па}$.

4.2.3 Ветровой район IV

Профиль ветра для IV ветрового района будет иметь следующую зависимость:

$$U_o = \left(\frac{2 \cdot 480}{1,2} \right)^{0,5} = 28,28 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Общий вид закона изменения скорости ветра с высотой будет иметь вид:

$$U(z) = 28,28 \left(\frac{z}{30,0} \right)^{0,2}$$

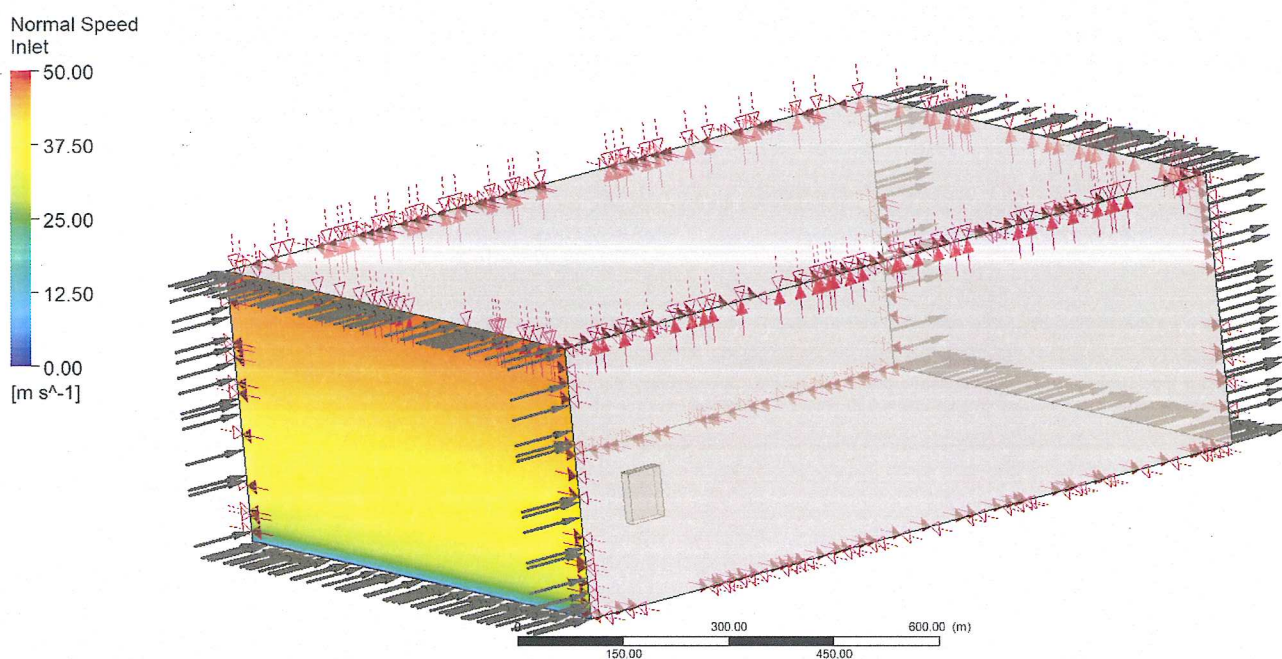


Рис. 27. Профиль скорости (IV ветровой район)

Интенсивность турбулентности и масштаб длины вихрей остаются без изменения.

Результаты аэродинамических испытаний для здания, расположенном в II ветровом районе представлены на рисунке 28.

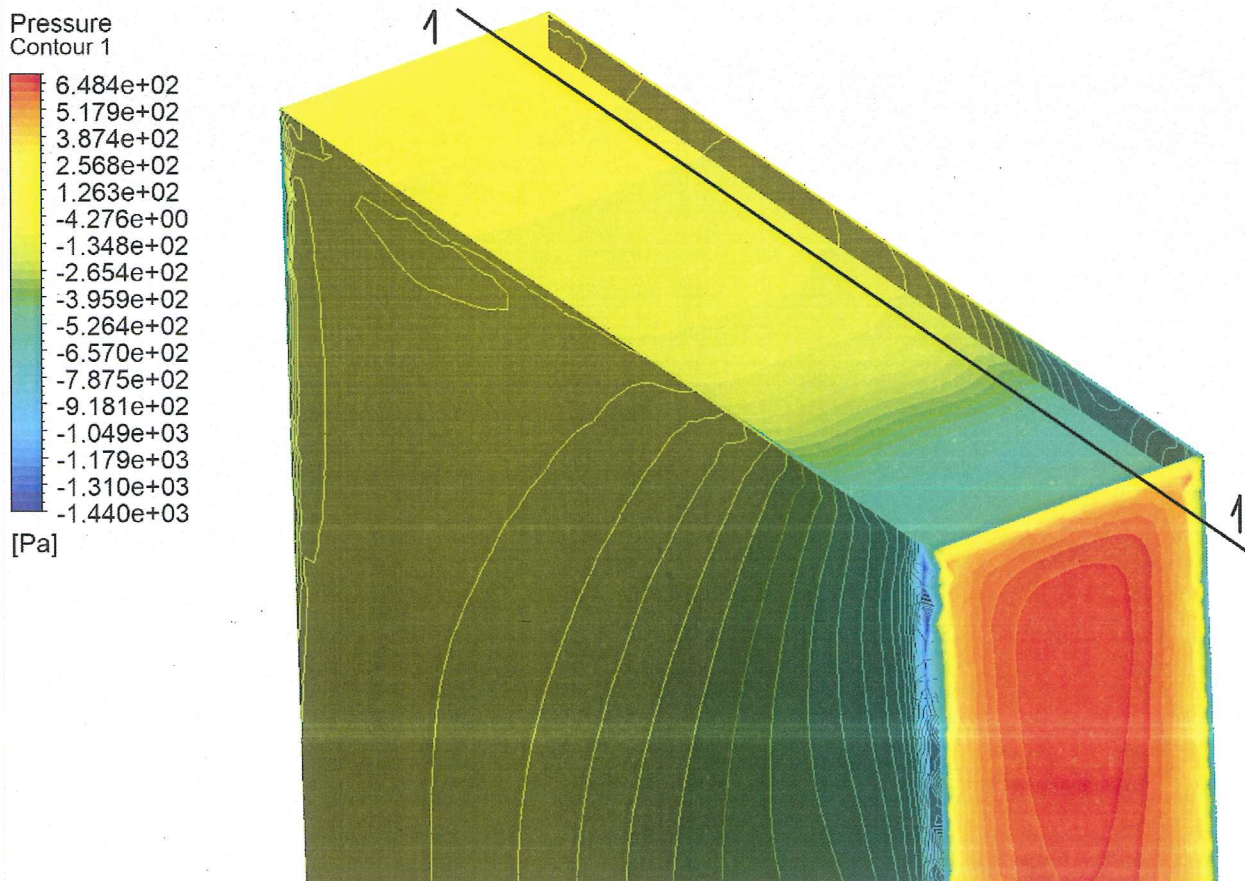


Рис. 28. Результаты численного моделирования

Действующие на двухшарнирную балку нагрузки приведены на рисунке 29.

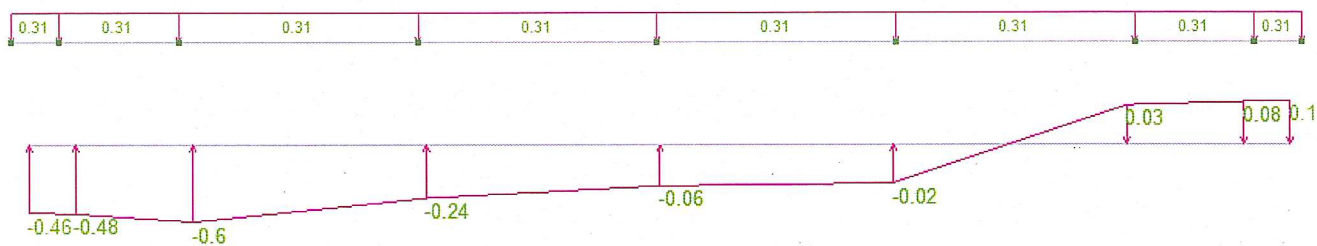


Рис. 29. Схема приложения нагрузка на балку: а – нагрузка от собственного веса кровли, б – ветровая нагрузка

От действующих нагрузок составляется комбинация загрузений и строится эпюра изгибающих моментов (рис. 30).

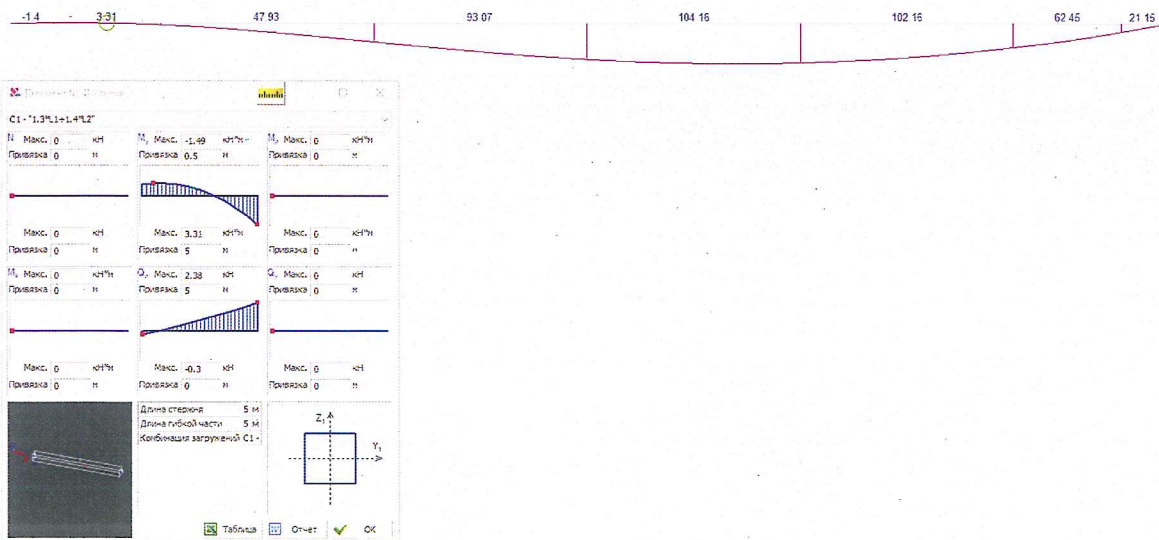


Рис. 30. Эпюра изгибающих моментов

Расчет производится по формулам балок, работающих на изгиб:

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W_x} \leq [\sigma] = 300,0 \text{ кПа},$$

где:

$M_{max} = 1,49 \text{ кН} \cdot \text{м}$ - максимальный изгибающий момент;

$W_x = \frac{1,0 \cdot 0,06^2}{6} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ - Момент сопротивления сечения (утеплитель толщиной 60,0 мм).

$$\sigma = \frac{1,49}{6 \cdot 10^{-4}} = 2483,3 \text{ кПа} > [\sigma] = 300,0 \text{ кПа}.$$

Следовательно, в IV ветровом районе не рекомендуется к применению на высоте 75,0 метров решение кровли ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ.

5 Обработка результатов

Следующей задачей является определение высоты здания, на котором возможно применение кровельного решения в соответствии с ТЗ. Решение данной задачи будет иметь оценочный характер.

5.1 Тип местности А

Как было исследовано ранее, рассматриваемое кровельное решение возможно применять на здании высотой 75,0 метров в II ветровом районе, следовательно, можно определить скорость ветра на данной отметке и найти высоту, на которой данная скорость достигается в других ветровых районах, так как ветровое давление зависит от скорости ветровых потоков.

Вычислим по ранее приведенным формулам значение скорости в зависимости от ветрового района (таблица 8).

Таблица 8. Значения скорости ветра для ветровых районов

Ветровой район	I	II	III	IV	V	VI	VII
U_0 , м/с	19,58	22,36	25,17	28,28	31,62	34,88	37,64
z , м	U(z)						
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	19,58	22,36	25,17	28,28	31,62	34,88	37,64
20	21,72	24,81	27,92	31,38	35,09	38,70	41,76
30	23,09	26,37	29,67*	33,35	37,29	41,13	44,38
40	24,10	27,53	30,98	34,82	38,93	42,94	46,34
50	24,92	28,47	32,04	36,01	40,26	44,40	47,92
60	25,62	29,26	32,93	37,01	41,37	45,64	49,24
70	26,22	29,94	33,70	37,87	42,34	46,70	50,40
75	26,49	30,25	34,05	38,27	42,78	47,19	50,92

Значения ветровых скоростей, полученных в табл. 9 переведем в значения ветрового давления по формуле 11.3 [3]. Результаты сведены в таблицу 9.

Таблица 9. Значения ветровых давлений

Ветровой район	I	II	III	IV	V	VI	VII
z , м	U(z)						
0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.165	0.215	0.272	0.344	0.430	0.523	0.609
20	0.203	0.265	0.335	0.424	0.529	0.644	0.750

30	0.229	0.299	0.379	0.478	0.598	0.727	0.847
40	0.250	0.326	0.413	0.521	0.652	0.793	0.923
50	0.267	0.348	0.441	0.558	0.697	0.848	0.987
60	0.282	0.368	0.466	0.589	0.736	0.896	1.043
70	0.296	0.385	0.488	0.617	0.771	0.938	1.092
75	0.302	0.394	0.498	0.630	0.787	0.958	1.115

Как видно из таблицы для II ветрового района на высоте 75,0 метров скорость ветровых потоков составляет 30,25 м/с, данная скорость для других районов достигается на высоте:

- Для III района – около 40,0 метров;
- Для IV района – около 20,0 метров;
- Для V, VI, VII районов – менее 10,0 метров.

Для более точного определения высоты выражается высота z из формулы определения скорости:

$$z = \sqrt{\frac{U(z)}{U_0}} \cdot z_0,$$

- Для III района:

$$z = \sqrt[0,15]{\frac{30,25}{25,17}} \cdot 10,00 = 34,10 \text{ м};$$

- Для IV района:

$$z = \sqrt[0,15]{\frac{30,25}{28,28}} \cdot 10,00 = 15,65 \text{ м};$$

- Для V района:

$$z = \sqrt[0,15]{\frac{30,25}{31,62}} \cdot 10,00 = 7,44 \text{ м};$$

- Для VI района:

$$z = \sqrt[0,15]{\frac{30,25}{34,88}} \cdot 10,00 < 5,0 \text{ м};$$

— Для VII района:

$$z = \sqrt[0,15]{\frac{30,25}{37,64}} \cdot 10,00 < 5,0 \text{ м.}$$

5.2 Тип местности В

Как было исследовано ранее, рассматриваемое кровельное решение возможно применять на здании высотой 75,0 метров в III ветровом районе, следовательно, можно определить скорость ветра на данной отметке и найти высоту, на которой данная скорость достигается в других ветровых районах, так как ветровое давление зависит от скорости ветровых потоков.

Вычислим по ранее приведенным формулам значение скорости в зависимости от ветрового района (таблица 10).

Таблица 10. Значения скорости ветра для ветровых районов

Ветровой район	I	II	III	IV	V	VI	VII
$U_0, \text{ м/с}$	19,58	22,36	25,17	28,28	31,62	34,88	37,64
$z, \text{ м}$	$U(z)$						
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	15.66	17.89	20.14	22.63	25.30	27.91	30.11
20	17.99	20.55	23.13	26.00	29.06	32.06	34.59
30	19.51	22.29	25.08	28.19	31.52	34.77	37.51
40	20.67	23.61	26.57	29.86	33.39	36.82	39.74
50	21.61	24.68	27.78	31.22	34.91	38.51	41.55
60	22.42	25.60	28.81	32.38	36.21	39.94	43.09
70	23.12	26.40	29.72	33.40	37.34	41.19	44.44
75	23.44	26.77	30.13	33.86	37.86	41.76	45.06

Значения ветровых скоростей, полученных в табл. 5 переведем в значения ветрового давления по формуле 11.3 [3]. Результаты сведены в таблицу 11.

Таблица 11. Значения ветровых давлений

Ветровой район	I	II	III	IV	V	VI	VII
$z, \text{ м}$	$P(U)$						
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0.106	0.138	0.174	0.220	0.275	0.335	0.390
20	0.139	0.182	0.230	0.291	0.363	0.442	0.515
30	0.164	0.214	0.271	0.342	0.427	0.520	0.605
40	0.184	0.240	0.304	0.383	0.479	0.583	0.679

50	0.201	0.262	0.332	0.419	0.524	0.638	0.742
60	0.216	0.282	0.357	0.451	0.564	0.686	0.799
70	0.230	0.300	0.380	0.480	0.599	0.729	0.849
75	0.236	0.308	0.390	0.493	0.616	0.750	0.873

Как видно из таблицы для III ветрового района на высоте 75,0 метров скорость ветровых потоков составляет 30,13 м/с, данная скорость для других районов составляет:

- Для IV района – около 40,0 метров;
- Для V района – около 30,0 метров;
- Для VI района – около 15,0 метров;
- Для VII района – около 10,0 метров.

Для более точного определения высоты выражается высота z из формулы определения скорости:

$$z = \sqrt[0,15]{\frac{U(z)}{U_0}} \cdot z_0,$$

— Для IV района:

$$z = \sqrt[0,15]{\frac{26,49}{28,28}} \cdot 10,00 = 41,84 \text{ м};$$

— Для V района:

$$z = \sqrt[0,15]{\frac{26,49}{31,62}} \cdot 10,00 = 23,95 \text{ м};$$

— Для VI района:

$$z = \sqrt[0,15]{\frac{26,49}{34,88}} \cdot 10,00 = 14,67 \text{ м};$$

— Для VII района:

$$z = \sqrt[0,15]{\frac{26,49}{37,64}} \cdot 10,00 = 10,03 \text{ м}.$$

6 Выводы

1. По результатам данной работы установлена допустимая высота здания в ветровых районах с применением кровельного решения ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS между собой на клей-пену (таблица 12, 13). Максимальная скорость ветровых потоков, при которой сохраняется целостность конструкции составляет 30,25 м/с – для типа местности А; 31,13 м/с – для типа местности В.

Таблица 12. Допустимая высота здания в ветровых районах для типа местности А

Ветровой район	I	II	III	IV	V	VI	VII
Высота здания, м	75,0	75,0	34,10	15,65	7,44	< 5,0	< 5,0

Таблица 13. Допустимая высота здания в ветровых районах типа местности В

Ветровой район	I	II	III	IV	V	VI	VII
Высота здания, м	75,0	75,0	75,0	41,84	23,95	14,65	10,03

В связи с тем, что расчетные условия для типа местности С благоприятнее условий расчета для типов местности А и В, то допускается распространить выводы, полученные для типа местности В, на аналогичные районы местности типа С.

2. В зданиях высотой выше указанных значений в таблицах 12 и 13 применение клей-пены для приклейки плит XPS между собой в кровельном решении ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ обязательно.

3. Результаты показывают, что увеличение высоты парапета влияет только на распределение ветровых давлений по поверхности покрытия здания и расположение зоны пиковых значений. На применимость кровельного решения ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS между собой на клей-пену высота парапета до 2000 мм не оказывает существенного влияния.

4. Результаты моделирования отличаются от результатов, полученных по формулам действующих нормативных документов [3], так как использовался не инженерный подход, зависящий от нормативного давления, а моделировались само

здание и использовались входные параметры реального ветрового потока для заданного ветрового района, которые при столкновении с исследуемой системой создают на поверхности пиковые нагрузки, что и являлось целью проведения численного исследования.

Список литературы

1. Темам Р. Уравнения Навье – Стокса. Теория и численный анализ / Р. Темам – М.: Мир, 1981. – 2-е изд.– 408с.;
2. ГОСТ Р 56728-2015 Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие здания. – М.: 2016;
3. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07.85* (Изменениями 1,2). [Текст]/ Минстрой России. – М.: 2016;
4. EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: action on structure – Part 1-4: General actions – Wind actions (2010). Building Civil Engineering Sector Board, UK.