

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-33-43

^{1,*}Шилов С.С., ²Уртенков А.И., ¹Молева А.А.¹Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет²Компания ТехноНИКОЛЬ

*E-mail: sergey.shilov.1997@mail.ru

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОСКИХ КРЫШ ПРИ ПОМОЩИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. С развитием новых материалов и технологий возникает необходимость создавать новые или модернизировать существующие кровельные системы. Взаимодействие кровельных систем с ветровыми потоками является важным аспектом проектирования, так как повышенная ветровая нагрузка может оказывать значительное давление на крышу и вызывать ее повреждение или даже разрушение в целом или отдельных элементов. Рассмотрены решения крыши ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ без фиксации сборной стяжки в несущее основание и ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки теплоизоляционных и клиновидных плит XPS на клей-пену. Исследование применялось с использованием численного моделирования ветровых потоков в программно-вычислительном комплексе Ansys CFX. В результате итерационного расчета получены данные о распределении ветрового давления по поверхности исследуемых моделей здания, вычислены значения ветровой нагрузки, способствующие подъему кровельных слоев из-за возникновения отрицательного давления, определены предельные высоты зданий и ветровые районы, для которых принятые решения покрытий допустимы. Выявлена максимальная скорость ветровых потоков, при которой сохраняется целостность конструкций ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ и ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ в условиях размещения здания на площадке, относящейся к типу местности В. Установлена допустимая высота здания в различных ветровых районах при применении кровельных решений ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ с возможностью допустимого подъема сборной стяжки из хризотилцементных листов и ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS между собой на клей-пену. Результаты исследований могут быть применены на практике при проектировании зданий и сооружений, имеющих схожие с исследуемой моделью геометрические параметры.

Ключевые слова: кровельные системы, вычислительная гидрогазодинамика, граничные условия, ветровые потоки, CFD-моделирование, аэродинамика зданий.

Введение. С развитием строительного производства, появлением новых материалов и технологий, усовершенствованием расчетных комплексов увеличивается вариативность решений по устройству кровельных систем плоских крыш зданий. На российском рынке одним из лидеров по производству кровельных, гидроизоляционных и теплоизоляционных материалов является компания ТехноНИКОЛЬ. Решения систем плоской кровли компании имеют различные вариации в зависимости от типа здания, степени эксплуатации крыши, ее несущего основания, материала теплоизоляционного слоя (каменная вата, пенополиизоцианурат, экструзионный пенополистирол), требуемого предела огнестойкости и метода укладки кровельных материалов (клеевой метод, механическое крепление, сплошная или частичная приклейка, свободная укладка). Все они должны соответствовать требованиям по пожарной безопасности, долговечности, экономичности, обеспечивать тепло- и гидроизоляцию и быть безопасными в эксплуатации, из-за чего проектирование таких объектов сопровождается решением сложных инженерных задач, одна из которых – прогнозирование взаимодействия покрытия зда-

ния с воздушными потоками. Данная проблематика на протяжении долгих лет изучается как отечественными, так и иностранными специалистами [1–10].

Объект исследования представляет собой прямоугольное в плане здание размерами 56,0×16,0 м высотой до 75,0 м, которое имеет плоскую крышу с уклоном 2,1 % и парапет высотой до 2,0 м. В данном исследовании было условно принято ограничение по высоте в 75 м, которое связано с рекомендациями свода правил СП17.13330.2017 «Кровли», а именно: «На крышах высотных зданий (более 75 м) из-за повышенного воздействия ветровой нагрузки рекомендуется сплошная приклейка водоизоляционного ковра к основанию из плотных малопористых материалов (цементно-песчаной или асфальтовой стяжки и т. п.), теплоизоляционных плит к пароизоляции, а пароизоляционного слоя к несущей конструкции».

Целью исследования являлась проверка возможности применения ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ и ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без фиксации (приклейки) теплоизоляционных и клиновидных плит XPS на клей пену и определение

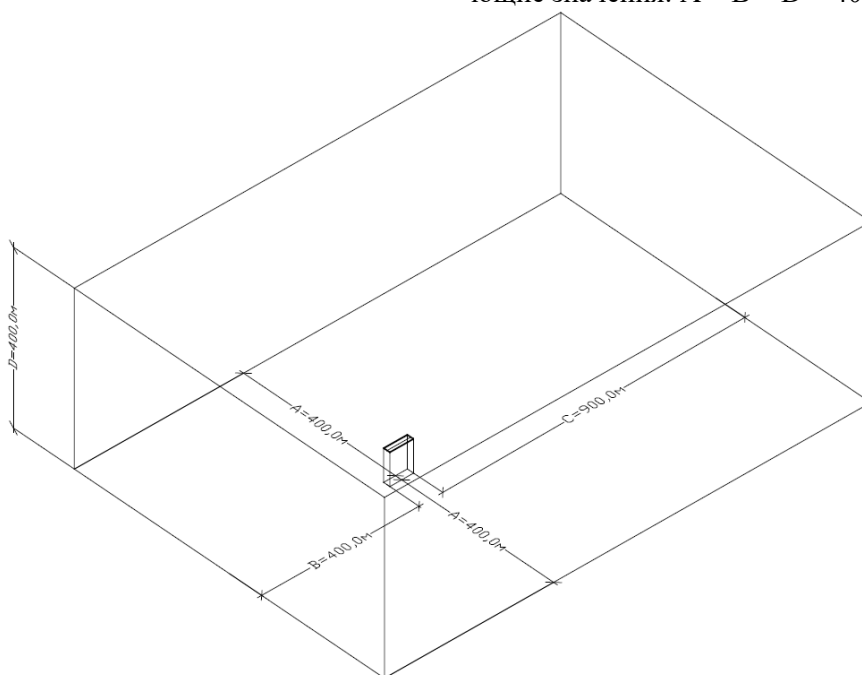
ветровых районов, в которых возможно применять такие решения. Серия вычислительных экспериментов проводилась для типов местности В (городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м) в соответствии с п. 11.1.6 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Вся информация и характеристики исследуемых кровель приняты из альбомов технических решений компании ТехноНИКОЛЬ.

Основные задачи исследования – расчет ветровой нагрузки, способствующей подъему кровельных слоев из-за возникновения отрицательного давления, определение предельной высоты здания, на которой собственный вес материалов крыши будет препятствовать этому подъему, и ветровых районов, для которых принятые решения покрытия допустимы. Практическая значимость исследований заключается в возможности использования результатов при проектировании зданий и сооружений, имеющих схожие геометрические параметры.

Методы, оборудование, материалы. В настоящее время существуют целый ряд про-

граммно-вычислительных комплексов, в которых реализованы процессоры по решению основных уравнений гидрогазодинамики [11], описывающих движения жидких и газообразных сред. Численное моделирование выполнено с использованием рабочей среды программного обеспечения Ansys Workbench и модуля вычислительной гидрогазодинамики Ansys CFX (лицензия Ansys CostumerNumber: 1051709). Данная программа рекомендована как одна из основных и наиболее применяемых в отечественной и зарубежной практике [12, 13].

Построена твердотельная модель объекта, вовлеченного в расчётную область с целью дальнейшего импорта в SpaceClaim рабочей среды Ansys Workbench. Модель представляет собой твердотельный объем Solid, моделирующий воздушное пространство вокруг исследуемого объекта. Данному объему присваиваются свойства воздушной среды. Размеры расчётного пространства были приняты в соответствии с [12] в зависимости от максимального размера объекта: $A \geq 5H_{max}$, $B \geq 5H_{max}$, $C \geq 10 H_{max}$, $D \geq 5H_{max}$ (рис. 1). В данном исследовании были приняты следующие значения: $A = B = D = 400,0$ м, $C = 900,0$ м.



ис. 1. Размеры расчётной области

После создания расчетной области производится формирование расчетной сетки (рис. 2) в препроцессоре *Ansys Meshing*. Так как вблизи здания воздушные потоки терпят сильное изменение, необходимо производить сгущение сетки вблизи здания для более точного решения уравнений гидрогазодинамики и корректности решений в целом. С этой целью в пограничном слое сетки применялся метод *Inflation*, который разделяет пространство вокруг исследуемого объекта.

Выбрана модель турбулентности *SST (Shear Stress Transport)*, как наиболее подходящая для решения задач аэродинамики здания по различным рекомендациям [14].

В качестве характеристик набегающего потока на «входе» (*Inlet*) используется профиль скорости, определяемый на основании действующих нормативных документов по формуле «2» нормативного документа «ГОСТ Р 56728-2015. Здания и сооружения. Методика определения ветровых

нагрузок на ограждающие здания». Также на входе необходимо задать значения интенсивности турбулентности и масштаба длины вихрей. Расчет проводился по своду правил «EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: action on structure», где

а) б)

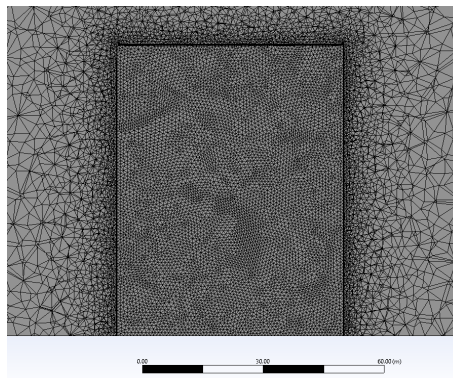
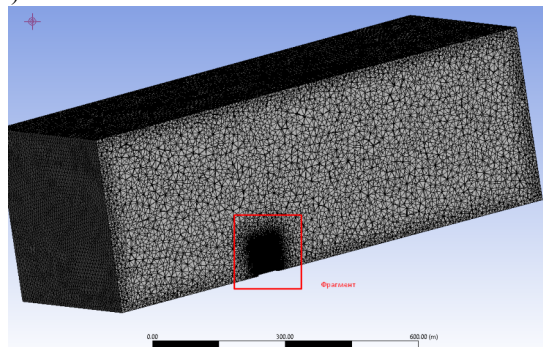


Рис. 2. Расчетная сетка, сформированная в *Ansys Meshing*
(а – общая модель, б – фрагмент пространства в районе исследуемого здания)

Расчет производился в рабочей среде *Ansys CFX-Solver Manager*, в качестве необходимых значений, которые должны быть достигнуты, были заданы среднеквадратичные невязки $RMS=10^{-4}$. При достижении требуемой сходимости решений уравнений возможность производится анализ полученных результатов.

На «выходе» (*Outlet*) задается нормальное атмосферное давление (избыточное давление равно нулю) и такие же параметры 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 и на всех поверхностях зданий и сооружений используется условие «стенки с прилипанием», исключающее проникновение вещества через поверхность.

В результате итерационного расчета были получены данные о распределении ветрового давления по поверхности исследуемых моделей здания для типа местности В.

Основная часть. Первая серия вычислительных экспериментов проведена для ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ.

Исходя из данных таблиц технических решений компании ТехноНИКОЛЬ, определяем нагрузку от собственного веса водоизоляционного ковра и основания, с которой в дальнейшем будем производить сравнение. Результаты сводим в таблицу 1.

Возможными аварийными ситуациями будут являться:

- Отслоение Техноэласт ЭКП – адгезия составляет 0,1 МПа или 100,0 кПа;

интенсивность турбулентности определяется по формуле 4.7, а масштаб длины вихрей определяется по формуле В.1 данного нормативного документа.

- Отслоение Унифлекс ВЕНТ П – адгезия составляет 0,05 МПа или 50,0 кПа;

- Начало подъема сборной стяжки и достижение такого момента, когда один из краев выйдет из-под парапета, что считается недопустимым.

Максимальная величина подъема, при которой стяжка выйдет из-под конструкции парапета определяется геометрически (рис. 3).

Таблица 1

Вес кровли ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ

№	Наименование	Толщина, мм	Масса 1 м ² , кг
1	Техноэласт ЭКП	4,2	5,3
2	Унифлекс ВЕНТ ЭПВ	3,0	4
3	Сборная стяжка из хризотилцементных прессованных плоских листов	20,0	36,0
	ВСЕГО:.		45,3

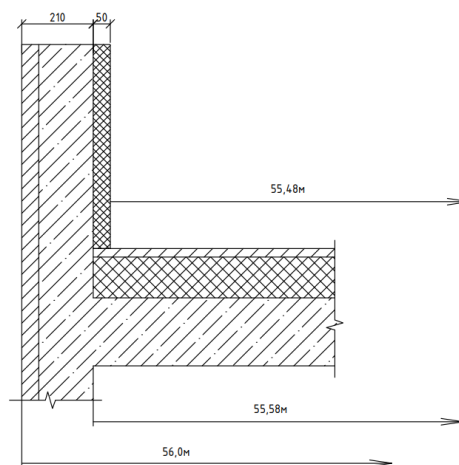


Рис. 3. К определению величины подъема
(прим.: конструкции кровли условно не показаны)

Кровля представляет собой пластину размерами в осях 55,48х15,58 метров, свободно опертую по 4 сторонам. Прогиб пластины от равномерно распределенной нагрузки определяется по формуле:

$$w = k_1 \frac{qa^4}{Et^3}, \quad (1)$$

где: $b/a = 55,58/15,58 = 3,57$ – отношение сторон пластины;

$k_1 = 0,137$ м – коэффициент, зависящий от отношения сторон и принимаемый по табл. III.1 [15];

$q = q_{\text{вет}} - 45,3$ – нагрузка от ветрового воздействия за исключением собственного веса кровли [10];

E – модуль упругости листового асбестоцемента;

t – толщина пластины.

Выразив из формулы значение q , получаем расчетное значение 1,35 кПа. Данное значение соответствует подъему кровли до такого состояния, когда один край сборной стяжки из хризотилцементных листов выйдет из-под парапета.

Проводились расчеты для каждого ветрового района и таким образом находились такие значения ветрового давления, при котором будет невозможно использовать исследуемое покрытие. Далее продемонстрированы значения на границе ветровых районов. Для типа местности В получены значения ветрового давления на покрытие в результате численного моделирования (рис. 4).

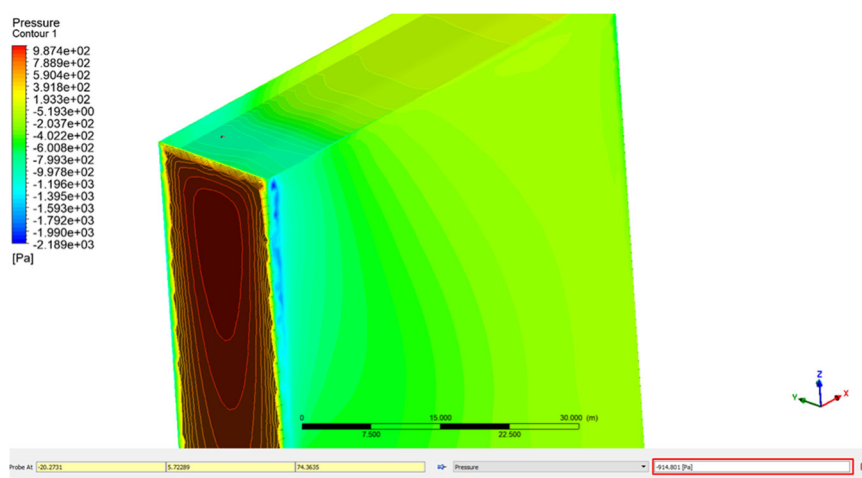


Рис. 4. Значения ветрового давления на покрытие (VI ветровой район)

На основании данных, полученных из рисунка 4, определяем максимальное давление на покрытие здания для VI ветрового района. Данное значение составляет около -915,0 Па. Тогда с учетом коэффициента надежности для ветровой нагрузки 1,4 значение составит 1,28 кПа, что меньше допускаемого 1,35 кПа.

Таким образом имеем, что нагрузка от ветрового воздействия не превышает прочности адгезии битумно-полимерных слоев кровли, а также не достигает нагрузки, при которой будет возникать предельное значение прогиба пластины. Повысив значения скорости до VII ветрового района, проводим повторный расчет с обновленными входными данными (рис. 5).

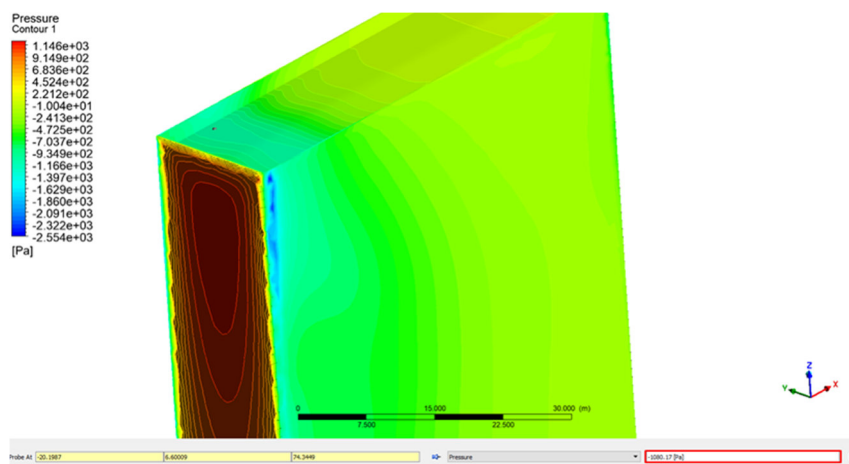


Рис. 5. Значения ветрового давления на покрытие (VII ветровой район)

Максимальное значение составляет около - 1,08 кПа. Тогда с учетом коэффициента надежности для ветровой нагрузки 1,4 значение составит 1,51 кПа, что больше допускаемого 1,35 кПа. Таким образом имеем, что нагрузка от ветрового воздействия превосходит действующий вес покрытия с возможностью допустимого отрыва, что приводит к выходу сборной стяжки из хризотилцементных листов из-под конструкции парапета.

Отсюда следует, что для зданий высотой до 75,0 метров можно применять решение ТН-

КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ, если строение располагается в VI ветровом районе при типе местности В. 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 2).

Таблица 2

Значения скорости ветра для ветровых районов

Ветровой район	Ia	I	II	III	IV	V	VI	VII
U_0 , м/с	16,83	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	0,00
10	13,47	15,66	17,89	20,14	22,63	25,30	27,91	30,11
20	15,47	17,99	20,55	23,13	26,00	29,06	32,06	34,59
30	16,78	19,51	22,29	25,08	28,19	31,52	34,77	37,51
40	17,77	20,67	23,61	26,57	29,86	33,39	36,82	39,74
50	18,58	21,61	24,68	27,78	31,22	34,91	38,51	41,55
60	19,27	22,42	25,60	28,81	32,38	36,21	39,94	43,09
70	19,88	23,12	26,40	29,72	33,40	37,34	41,19	44,44
75	20,15	23,44	26,77	30,13	33,86	37,86	41,76	45,06

Как видно из таблицы 2, для VI ветрового района на высоте 75,0 метров скорость ветровых потоков составляет 41,76 м/с, данная скорость для VII района составляет около 50,0 метров.

Вторая серия вычислительных экспериментов проведена для ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS на клей пену. Выделена расчётная полоса шириной 1,0 м, на которой имеются наибольшие давления, затем такая полоса рассчитана как двухшарнирная балка с приложенными на нее нагрузками. Исходя из данных таблицы 2, определяем действующую нагрузку от собственного веса состава покрытия, с которой в дальнейшем будем производить сравнение. Результаты сводим в таблицу 3.

Таблица 3

Вес покрытия ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ

№	Наименование	Толщина, мм	Масса 1 м ² , кг
1	Техноэласт ЭКП	4,2	5,3
2	Унифлекс ВЕНТ ЭПВ	3,0	4
3	Сэндвич ТЕХНОНИКОЛЬ Ц-XPS	60	21,9
	ВСЕГО:		31,2

Возможными аварийными ситуациями будут являться:

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

Результаты аэродинамических испытаний для здания, расположенного в III ветровом районе представлены на рисунке 6.

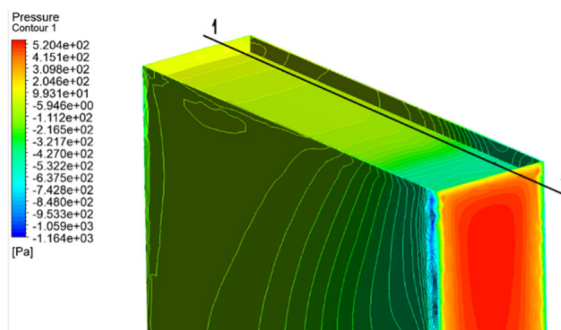


Рис. 6. Значения ветрового давления на покрытие (III ветровой район)

Как говорилось ранее, в качестве расчетной схемы принимается двухшарнирная балка шириной 1,0 м. Схема приложения нагрузки приведена на рисунке 7.

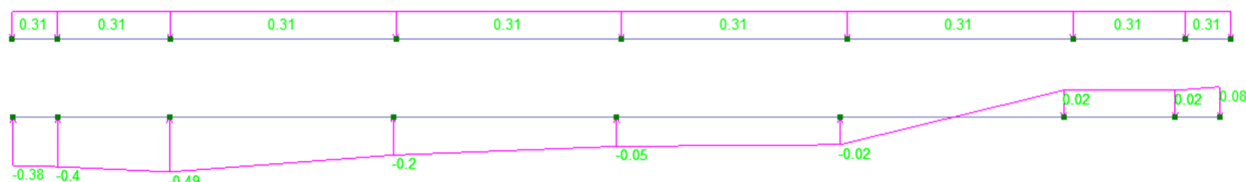


Рис. 7. Схема приложения нагрузки на балку: верх – нагрузка от собственного веса кровли, низ – ветровая нагрузка

От действующих нагрузок составляется комбинация загрузок, строится эпюра изгибающих моментов (рис. 8).

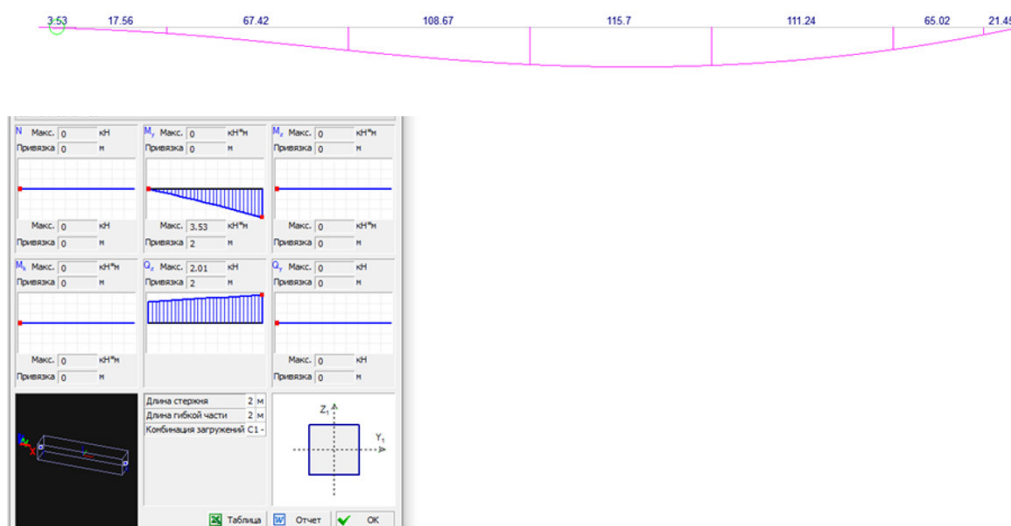


Рис. 8. Эпюра изгибающих моментов (III ветровой район)

Видно, что при заданной комбинации загрузок не возникает подъем покрытия, следовательно, нет ограничений по применению решения кровли ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS на клей пену в III ветровом районе для типа местности B.

Следует повысить ветровой район до IV района, для которого нормативное значение ветрового давления 480,0 Па. Результаты аэродинамических испытаний для здания, расположенного в IV ветровом районе представлены на рисунке 9.

Действующие на двухшарнирную балку нагрузки приведены на рисунке 10.

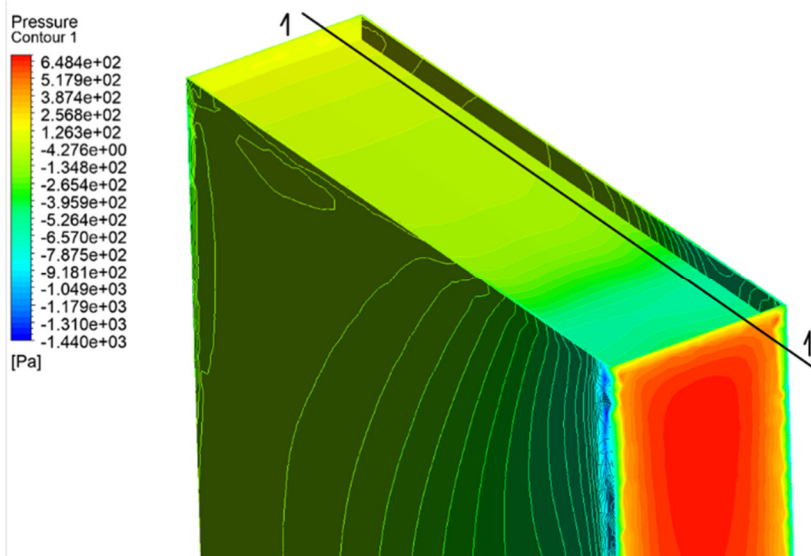


Рис. 9. Значения ветрового давления на покрытие (IV ветровой район)

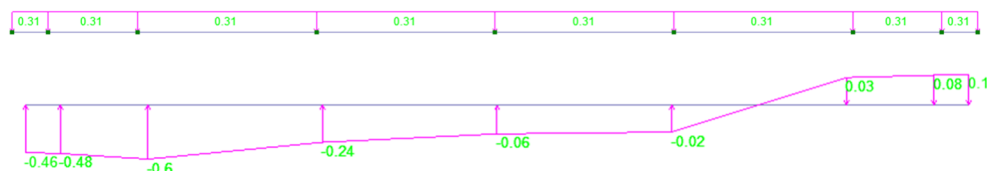


Рис. 10. Схема приложения нагрузка на балку: верх – нагрузка от собственного веса кровли, низ – ветровая нагрузка

От действующих нагрузок составляется комбинация загрузок, и строится эпюра изгибающих моментов (рис. 11).

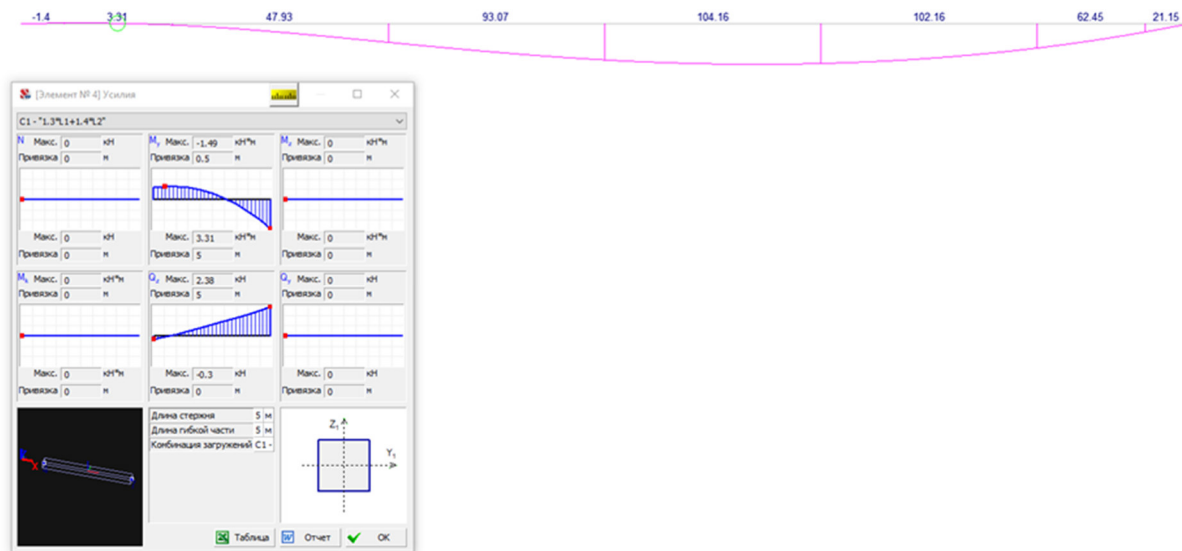


Рис. 11. Эпюра изгибающих моментов (IV ветровой район)

Как видно из рис. 10, от действующей ветровой нагрузки возникают отрицательные изгибающие моменты, что приводит к подъему кровли. Следовательно, необходимо определить возникающие в сечении напряжения и сравнить с допускаемыми.

Расчет производится по формулам балок, работающих на изгиб:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_x} \leq [\sigma] \quad (2)$$

где $M_{\max} = 1,49$ кНм – максимальный изгибающий момент;

W_x – момент сопротивления сечения (утеплитель толщиной 60,0 мм);

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

Следовательно, в IV ветровом районе не рекомендуется к применению на высоте 75,0 метров решение кровли ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS на клей пену.

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.

Как видно из таблицы 2, 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 – $z = 41,84$ м;

Для V района – $z = 23,95$ м;

Для VI района – $z = 14,67$ м;

Для VII района – $z = 10,03$ м.

Выводы.

1) Установлена допустимая высота здания в ветровых районах при типе местности В с применением кровельных решений ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ с возможностью допустимого подъема сборной стяжки из хризотилцементных листов (таблица 4) и ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ без приклейки плит XPS между собой на клей-пену (таблица 5).

2) Максимальная скорость ветровых потоков, при которой сохраняется целостность конструкции ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ составляет 41,76 м/с для типа местности В.

Таблица 4

Допустимая высота здания в ветровых районах для типа местности В в применении кровельного решения ТН-КРОВЛЯ УНИВЕРСАЛ

Ветровой район	I	II	III	IV	V	VI	VII
Высота здания, м	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	51,27

Таблица 5

Допустимая высота здания в ветровых районах типа местности В с применением кровельного решения ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ

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

3) Максимальная скорость ветровых потоков, при которой сохраняется целостность конструкции ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ составляет 31,13 м/с для типа местности В. Для зданий большей высоты применение клей-пены для приклейки плит XPS между собой в кровельном решении ТН-КРОВЛЯ СОЛИД ПРОФ является обязательным.

3) Результаты численного моделирования ветровых потоков отличаются от результатов, полученных по формулам действующих нормативных документов, использующие подходы, которые учитывают усредненные значения ветра и предполагаемые аэродинамические коэффициенты. Компьютерное моделирование позволяет учитывать реальные условия окружающей среды, включая турбулентность, особенности формы объекта исследования, а также выявить локальные максимумы давления и напряжения, возникающие в отдельных точках зданий.

4) В связи с тем, что расчетные условия для типа местности С благоприятнее условий расчета для типа местности В, допускается распространять выводы, полученные для типа местности В, на аналогичные районы местности типа С.

5) Современные методы вычислительных исследований предоставляют уникальные возможности для проектирования и анализа строительных конструкций и сооружений или отдельных их элементов. Вместо трудоемких испытаний реальных прототипов, инженеры могут создавать виртуальные модели и тестировать различные сценарии поведения здания, что существенно сокращает сроки разработки проектов. Исследования показывают, что численное моделирование обеспечивает достоверные выходные данные, соответствующие результатам натурных испытаний [16–22], что даёт возможность использовать результаты численных экспериментов при проектировании, а также потенциально при составлении или корректировке сводов правил по проектированию и строительству.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поддаева О.И., Дуничкин И.В. Архитектурно-строительная аэродинамика // Вестник МГСУ. 2017. Т.12, №6. С. 602–609. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.602-609.
2. Реттер, Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика: монография. М.: Изд-во Стройиздат, 1984. 294 с.
3. Chen B., Shang L., Qin M., Chen X., Yang O. Wind interference effects of high-rise building on low-rise building with flat roof, Wind interference effects of high-rise building on low-rise building with flat roof // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.10.019.
4. Gerhardt H.J., Krämer C., Bofah K.K. Wind loading on loosely laid pavers and insulation boards for flat roofs // Journal of Structural Engineering. 2020. Vol. 146(8). 04020151. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002707.
5. Оленьков В.Д., Колмогорова А.О., Замула М.Д. Учет ветрового режима при проектировании жилой застройки // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2023. Т. 23, № 3. С. 5–13. DOI: 10.14529/build230301.
6. Aly A.M., Khaled F. Aerodynamics of Low-Rise Buildings: Challenges and Recent Advances in Experimental and Computational Methods. 2020. DOI:10.5772/intechopen.92794.
7. Mooneghi M.A., Kargarmoakhar R. Aerodynamic Mitigation and Shape Optimization of Buildings: Review // Journal of Building Engineering. 2016. Vol. 6. Pp. 225–235. DOI: 10.1016/j.jobee.2016.01.009.
8. Rajasekarababu K.B., Vinayagamurthy G., Rajan S.S. Experimental and computational investigation of outdoor wind flow around a setback building // Build Simul. 2019. Vol. 12. Pp. 891–904. DOI: 10.1007/s12273-019-0514-8.
9. Anirwar R.A. Experimental study of wind-induced pressures on tall buildings of different

shapes // Wind and Structures. 202. Vol. 31(5). Pp. 441–453. DOI:10.12989/was.2020.31.5.441.

10. Zhang Y., Yu Z., Chen X., Cao R., Zhu F.R. An investigation on external airflow around low-rise building with various roof types: PIV measurements and LES simulations // Building and Environment. 2020. Vol. 169(3). 106583. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106583.

11. Темам Р. Уравнения Навье – Стокса. Теория и численный анализ. М.: Изд-во Мир, 1981. 2-е изд. 408с.

12. Al-Chalabi R., Elshaer A. Aerodynamic mitigation of low-rise buildings roofs // CSCE 2021 Annual Conference. 2021. Pp. 713.1–713.10.

13. Платонов В.В., Минаков А.В., Дектерев А.А., Харламов Е.Б. Сравнительный анализ CFD-пакетов Sigmaflow и Ansys Fluent на примере решения ламинарных тестовых задач // Вестник томского государственного университета. 2013. Т.1, №21. С. 84–94.

14. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Т. 32, №8. С. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.

15. Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Расчет пластин. Киев.: Изд-во Будильник, 1970. 436 с.

16. Хазов П.А., Анущенко А.М., Онищук Е.А., Щелокова Ю.Д. Численное и экспериментальное исследование распределения ветровой нагрузки на криволинейное большепролетное покрытие // Приволжский научный журнал. 2020. Т.53, № 1. С. 16–21.

17. Саиян С.Г., Ефимова А.М. Расчетные аэродинамические исследования комплекса

Московского международного делового центра «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий // Вестник МГСУ. 2024. Т.19, №6. С. 906–941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941;

18. Лампси Б.Б., Шилов С. С., Хазов П.А. Численное и физическое моделирование ветровых потоков на большепролетное покрытие // Вестник МГСУ. 2022. Т.17, № 1. С. 21–31. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.21-31.

19. Айрапетов А.Б., Вышинский В.В., Катунин А.В. Расчетные и экспериментальные исследования обтекания высотных зданий и сооружений атмосферным ветром в условиях городской застройки // Труды Московского физико-технического института. 2017. Т. 9, № 2. С. 5–12.

20. Kumar A., Verma A. CFD Analysis of The Wind Loads on the ‘+’ Plan Building Structure Including Interference Condition Using ANSYS CFX // Journal of Xidian University. 2023. Vol.17(10). Pp. 50–63. DOI: 10.37896/jxu17.10/004;

21. Verma A., Neeraj C., Singh P.K., Kadian V., Suraj R. Evaluation of Wind Effects on High-Rise Buildings Using Ansys CFX // Journal of Engineering Research and Application. 2023. Vol. 2. Pp. 1–11. DOI:10.55953/jera.2023.2101.

22. Xin L., Zhou X., Gu M. Wind tunnel test and CFD simulation of the near-roof wind speed and friction velocity on gable roofs // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2022. Vol. 225(9). DOI: 10.1016/j.jweia.2022.105009

Информация об авторах

Шилов Сергей Сергеевич, аспирант кафедры Теории сооружений и технической механики. E-mail: sergey.shilov.1997@mail.ru. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. 603950, г. Н. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65;

Уртенков Антон Игоревич, ведущий технический специалист. E-mail: urtenkov@tn.ru. Компания ТехноНИКОЛЬ. 129110, г. Москва, ул. Гиляровского, д. 47, стр. 5;

Молева Алина Александровна, студент. E-mail: alina.moleva52@yandex.ru. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. 603950, г. Н. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65;

Поступила 13.05.2025 г.

© Шилов С.С., Уртенков А.И., Молева А.А., 2025

^{1,*}Shilov S.S., ²Urtenkov A.I., ¹Moleva A.A.

¹Nizhny Novgorod State University of architecture and civil engineering

²Company TECHNOMICOL

*E-mail: sergey.shilov.1997@mail.ru

AERODYNAMIC STUDY OF FLAT ROOFS USING NUMERICAL MODELING

Abstract. With the development of new materials and technologies, it becomes necessary to create new or modernize existing roofing systems. The interaction of roofing systems with wind currents is an important

aspect of design, since increased wind load can exert significant pressure on the roof and cause it to damage or even collapse as a whole or individual elements. The solutions of the roof are TN-UNIVERSAL ROOF without fixing the prefabricated screed into the supporting base and TN-SOLID PROF ROOF without gluing thermal insulation and wedge-shaped XPS plates onto adhesive foam. The study was applied using numerical simulation of wind flows in the Ansys CFX software and computing complex. As a result of the iterative calculation, data on the distribution of wind pressure over the surface of the studied building models were obtained, wind load values were calculated that contribute to the rise of roof layers due to the occurrence of negative wind pressure, the maximum heights of buildings and wind areas for which the coating solutions are acceptable were determined. The maximum speed of wind flows has been revealed, at which the integrity of the TN-UNIVERSAL ROOF and TN-SOLID PROF ROOF structures is maintained in the conditions of building placement on a site belonging to type B terrain. The permissible height of the building has been established in various wind areas when using roofing solutions TN-UNIVERSAL ROOF with the possibility of permissible lifting of a composite screed made of chrysotile cement sheets and TN-SOLID PROF ROOF without gluing XPS plates together on adhesive foam. The research results can be applied in practice in the design of buildings and structures with geometric parameters similar to the model under study.

Keywords: roofing systems, computational fluid dynamics, boundary conditions, wind flows, CFD-modeling, aerodynamics of buildings.

REFERENCES

1. Poddaeva O.I. Architectural-building aerodynamics [Arhitekturno-stroitel'naya aerodinamika]. Vestnik MGSU. 2017. Vol.12, No. 6. Pp. 602-609. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.602-609 (rus).
2. Retter E.I. Architectural-building aerodynamics. Monograph [Arhitekturno-stroitel'naya aerodinamika: monografiya]. Moscow: Strojizdat, 1984. 294 p. (rus)
3. Chen B., Shang L., Qin M., Chen X., Yang O. Wind interference effects of high-rise building on low-rise building with flat roof, Wind interference effects of high-rise building on low-rise building with flat roof. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.10.019.
4. Gerhardt H.J., Krämer C., Bofah K.K. Wind loading on loosely laid pavers and insulation boards for flat roofs. Journal of Structural Engineering. 2020. Vol. 146, No. 8. 04020151. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002707.
5. Olenkov V.D., Kolmogorova A.O., Zamula M.D. Consideration of wind conditions in the design of residential buildings [Uchet vetrovogo rezhima pri proektirovanii zhiloy zastrojki]. Bulltin SUSU. Series «Construction Engineering and Architecture». 2023. Vol. 23, No 3. Pp. 5–13. DOI: 10.14529/build230301 (rus).
6. Aly A.M., Khaled F. Aerodynamics of Low-Rise Buildings: Challenges and Recent Advances in Experimental and Computational Methods. 2020. DOI:10.5772/intechopen.92794.
7. Mooneghi M.A., Kargarmoakhar R. Aerodynamic Mitigation and Shape Optimization of Buildings: Review. Journal of Building Engineering. 2016. Vol.6. Pp. 225–235. DOI: 10.1016/j.jobbe.2016.01.009.
8. Rajasekarababu K.B., Vinayagamurthy G., Rajan S.S. Experimental and computational investigation of outdoor wind flow around a setback building. Build Simul. 2019. Vol. 12. Pp. 891–904. DOI:10.1007/s12273-019-0514-8.
9. Anirwar R.A. Experimental study of wind-induced pressures on tall buildings of different shapes. Wind and Structures. 202. Vol. 31, No. 5. Pp. 441–453. DOI:10.12989/was.2020.31.5.441.
10. Zhang Y., Yu Z., Chen X., Cao R., Zhu F.R. An investigation on external airflow around low-rise building with various roof types: PIV measurements and LES simulations. Building and Environment. 2020. Vol. 169, No. 3. 106583. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106583.
11. Temam R. The Navier-Stokes equations. Theory and numerical analysis [Uravneniya Nav'e – Stoksa. Teoriya i chislennyj analiz]. Moscow: Mir, 1981. 408 p. (rus).
12. Al-Chalabi R., Elshaer A. Aerodynamic mitigation of low-rise buildings roofs. CSCE 2021 Annual Conference. 2021. Pp. 713.1–713.10.
13. Platonov V.V., Minakov A.V., Dekterev A.A., Harlamov E.B. Comparative analysis if CFD Sigmaflow and Fluent Packages by the example of solving laminar test problems [Sravnitel'nyj analiz CFD-paketov Sigmaflow i Ansys Fluent na primere resheniya laminarnyh testovyh zadach]. Tomsk State University Journals. 2013. Vol. 1, No. 21. Pp. 84–94. (rus).
14. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal. 1994. Vol. 32, No. 8. Pp. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
15. Vajnberg D.V., Vajnberg E.D. Plate calculation [Raschet plastin]. Kiev: Budil'nik, 1970. 436p. (rus).
16. Khazov P.A., Anuschenko A.M., Onischuk E.A., Schyolokova Y.D. Numerical and experimental study of the distribution of the wind

load in the curvilinear large-span covering [Chislennoe i eksperimental'noe issledovanie raspredeleniya vetrovoj nagruzki na krivolinejnoe bol'sheproletnoe pokrytie]. The Privolzhsky Scientific Journal. 2020. Vol. 53, No. 1. Pp. 16–21. (rus).

17. Saiyan S.G., Efimova A.M. Computational aerodynamic studies of the MIBC “Moscow-City” complex during sequential construction of buildings [Raschetnyye aerodinamicheskiye issledovaniya kompleksa Moskovskogo mezhdunarodnogo delovogo tsentra «Moskva-Siti» pri posledovatel'nom vozvedenii zdaniy]. Vestnik MGSU. 2024. Vol. 19, No. 6. Pp. 906–941. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941 (rus).

18. Lampsi B.B., Shilov S.S., Khaxov P.A., Numerical and physical modeling of wind loads on long-span shell structures [Chislennoe i fizicheskoe modelirovanie vetrovykh potokov na bol'sheproletnoe pokrytie]. Vestnik MGSU. 2022. Vol. 17, No 1. Pp. 21–31. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.21-31. (rus).

19. Ajrapetov A.V., Vyshinskij V.V., Katunin A.V. Numerical and experimental research of high-

rise buildings and structures aerodynamics in the presence of environmental building [Raschetnye i eksperimental'nye issledovaniya obtekaniya vysotnyh zdaniy i sooruzhenij atmosferynym vetrom v usloviyah gorodskoj zastrojki]. Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta. 2017. Vol. 9, No. 2. Pp. 5-12. (rus).

20. Kumar A., Verma A. CFD Analysis of The Wind Loads on the ‘+’ Plan Building Structure Including Interference Condition Using ANSYS CFX. Journal of Xidian University. 2023. Vol. 17, No. 10. Pp. 50–63. DOI: 10.37896/jxu17.10/004.

21. Verma A., Neeraj C., Singh P.K., Kadian V., Suraj R. Evaluation of Wind Effects on High-Rise Buildings Using Ansys CFX // Journal of Engineering Research and Application. 2023. Vol. 2. Pp. 1-11. DOI:10.55953/jera.2023.2101.

22. Xin L., Zhou X., Gu M. Wind tunnel test and CFD simulation of the near-roof wind speed and friction velocity on gable roofs. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2022. Vol. 225, No. 9. DOI: 10.1016/j.jweia.2022.105009.

Information about the authors

Shilov, Sergey S. Post graduate student of the Department of Theory of structures and technical mechanics E-mail: sergey.shilov.1997@mail.ru. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering 603950, Nizhny Novgorod, 65, Il'inskaya St.

Urtencov, Anton Ig. Leading technical specialist. E-mail: urtenkov@tn.ru. company TECHNOMICOL, Moscow, 47, Gilyarovskogo St.

Moleva, Alina Al. Student E-mail: alina.moleva52@yandex.ru. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering 603950, Nizhny Novgorod, 65, Il'inskaya St.

Received 13.05.2025

Для цитирования:

Шилов С.С., Уртенков А.И., Молева А.А. Аэродинамические исследования плоских крыш при помощи численного моделирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 33–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-33-43

For citation:

Shilov S.S., Urtencov A.I., Moleva A.A. Aerodynamic study of flat roofs using numerical modeling. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No.7. Pp. 33–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-33-43