

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ НАД КРЫШАМИ СТРОЕНИЙ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

Щукина А.А., студент гр.261402, Скрыт О.Н., студент 261402

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Храмович Е.М. – канд. физ.-мат. наук, доцент

*Качанович А.С. – учитель физики ГУО «Гимназия №42 г.Минска лауреата
Нобелевской премии Ж.И.Алферова»*

Аннотация. В работе приведен обзор исследования потоков воздуха над крышами строений. Установлена зависимость разницы давлений под крышей и у ее поверхности от угла наклона крыши к горизонту. Показана зависимость разницы давлений под крышей и у ее поверхности от рельефа крыши.

Ключевые слова. Ламинарный поток воздуха, закон Бернулли, разность давлений, трубка Пито, двухколенный манометр, материал крыши, угол наклона крыши.

Введение.

Различные уголки планеты Земля существенно отличаются друг от друга по своим природным условиям. В одних - тихо и спокойно, в других - ни один день не обходится без урагана или еще более опасного природного явления.

Республика Беларусь не является исключением. И хотя наша страна находится в умеренных широтах и для неё не характерны ни цунами, ни тайфуны, ни разрушительные землетрясения, ураганы на территории нашей страны (особенно в последние годы) – не редкость. Об этом свидетельствует статистика (по данным метеорологических наблюдений количество ураганов в Беларуси ежегодно увеличивается), опираясь на которую утвердилось мнение, что подобные стихии стали привычными для Беларуси [1].

«Белорусские» ураганы, конечно, не такие разрушительные, как в более жарких экваториальных странах, например, на Кубе или в Индонезии. Однако зачастую они сопровождаются многочисленными разрушениями, особенно в сельской местности.

Например, за 20-летний период, с 1997 по 2023 годы, на страну обрушилось более 20 ураганных ветров. Наибольшее количество повреждений от ураганов пришлось на территорию Минской области. Пострадали леса в районах центральной части – Столбцы (1998 год), Березино (2008 год), Червень (2009 год), Березино (2010 год), Борисов (2010 год), Червень (2010 год), Смолевичи (2010 год), Смолевичи (2016 год), Червень (2016 год), Узденск (2022), Осиповичи (2023), Телядовичи (2023) [1].

Один из ярких примеров ураганов был зафиксирован в январе 2007 года, когда в Беларусь из Европы пришел циклон „Кирилл“ [2]. Тогда по юго-западу страны метеостанции зарегистрировали силу ветра до 27 м/сек. [1].

В июле 2016 года жители Беларуси хорошо запомнили ураган, который в прямом смысле оставил десятки людей без крыши над головой. В Минске проходил фронтальный раздел, а воздух успел прогреться до 30 градусов. При этом метеостанции не фиксировали максимальные порывы ветра. Только в Национальном аэропорту «Минск» было отмечено 25 м/сек. В целом же порывы ветра по стране достигали 21 м/сек. И вновь больше всего от данного урагана потерпела именно Минская область.

Кроме того, в этом регионе документально зафиксирована так называемая „аллея торнадо“ [1].

В марте 2013 года ураган „Хавьер“ [3] парализовал участки нашей страны более, чем на несколько дней.

Ураганы в Беларуси вызваны циклонами. Они, являясь основными погодообразующими агентами влияния общей циркуляции атмосферы во внетропических широтах, транспортируют тепло, влагу и количество движения, модулируя межширотный обмен и конфигурируя синоптические поля. С их прохождением связано резкое изменение погодных условий. Нередко циклоны сопровождаются неблагоприятными и опасными метеорологическими явлениями. Южные циклоны, наряду с циклонами других типов, обуславливают возникновение наиболее сложных погодных условий на территории Беларуси [4].

В осенне-зимний период наиболее неблагоприятными для Беларуси являются южные циклоны, смещающиеся с территории Украины, Черного и Средиземного морей; в летний – циклоны, которые идут почти строго с Запада через Польшу или Литву, с Северного и Балтийского морей [1].

Именно благодаря южным циклонам так называемые ураганы в Беларуси встречаются в период с мая по сентябрь. Но в июне-августе по стране проходят наиболее активные фронты и любое кучево-

дождевое облако может принести сильные ливни и грозы.

Ежегодно ураганы наносят значительный ущерб населению и экономике страны. От ураганов страдают лесные насаждения, сельскохозяйственные культуры, имущество организаций и граждан. Больше всего урона наносится крышам административных и жилых зданий.

Опишем, как происходит данный процесс.

На крыше строения, когда воздух движется быстро сверху вниз по скату, давление сверху становится меньше, чем внутри здания. Этот эффект может привести к поднятию крыши вверх под воздействием разницы давлений. Попробуем простыми словами описать принцип, в результате действия которого наносится ущерб строениям, в частности, крышам.

Возьмем лист бумаги, разместим его на ладони, приблизим к губам и начнем дуть над ним сверху. Мы увидим, что лист поднимается.

Еще одним примером могут являться крылья самолетов, спроектированные таким образом, чтобы воздух сверху крыла двигался быстрее, чем снизу, что создает разницу давлений и приводит к подъемной силе.

Этот эффект связан с принципом Бернулли, названном в честь швейцарского физика Даниила Бернулли, который первым открыл его в 1738 году: когда жидкость или газ движутся на высокой скорости, давление падает [5].

В данной работе авторами будет рассмотрен процесс, который возникает при повреждении крыш строений от ураганов и описан метод минимизации ущерба для крыш строений, расположенных на территории нашей страны.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СВЕДЕНИЯ.

1.1 Ламинарное и турбулентное течение [6].

Наблюдается два вида течения жидкости (или газа). В одних случаях жидкость как бы разделяется на слои, которые скользят друг относительно друга, не перемешиваясь. Такое течение называется ламинарным или слоистым (от лат. *lamina* означает пластинку, полоску). Если в ламинарный поток ввести подкрашенную струйку, то она сохраняется, не размываясь, на всей длине потока, так как частицы жидкости в ламинарном потоке не переходят из одного слоя в другой. Ламинарное течение стационарно.

При увеличении скорости или поперечных размеров потока характер течения существенным образом изменяется. Возникает энергичное перемешивание жидкости. Такое течение называется турбулентным. При турбулентном течении скорость частиц в каждом данном месте все время изменяется беспорядочным образом - течение нестационарное. Если в турбулентный поток ввести окрашенную струйку, то уже на небольшом расстоянии от места ее введения окрашенная жидкость равномерно распределяется по всему сечению потока.

При турбулентном течении можно говорить о среднем (по времени) значении скорости в каждой точке сечения трубы. „Профиль“ средних скоростей при турбулентном течении изображен на рисунке 1. Вблизи стенок трубы скорость изменяется гораздо сильнее, чем при ламинарном течении, но в остальной части сечения скорость изменяется меньше.

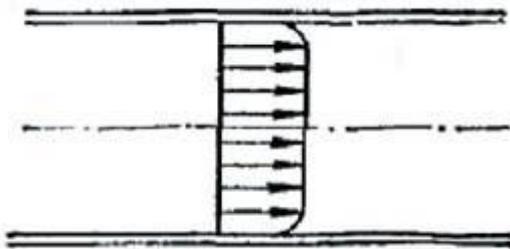


Рисунок 1 - „Профиль“ средних скоростей при турбулентном течении

1.2 Стационарное течение жидкости и газа [7].

Рассмотрим ламинарный поток жидкости или газа по трубке переменного сечения (рис. 2)



Рисунок 2 - Ламинарный поток жидкости или газа по трубке переменного сечения

Пусть количество газа, входящее в трубку за единицу времени и выходящее из нее постоянно. Такое движение называют ламинарным (стационарным).

При стационарном течении скорость может быть неодинакова в разных точках, но во всех точках она не меняется со временем, то есть постоянна.

Так как жидкость, текущая по отдельным трубкам тока, не перемешивается, то трубки тока в узких местах сжимаются, а в более широких - расширяются.

Скорости жидкости в двух любых сечениях трубки обратно пропорциональны площадям сечений. Таким образом, в более узких местах трубки скорость больше, а в более широких меньше.

1.3 Давление в движущихся жидкостях и газах [7].

В неподвижной жидкости величина давления в точках, расположенных на одной и той же высоте, одинакова. Если точки расположены на разных высотах - давление различно.

Так как точки выбираются произвольно, то сумма давления и плотности потенциальной энергии во всех точках жидкости одинакова.

При течении воды в трубке давление в разных точках неодинаково, и разность давления тем больше, чем больше скорость течения.

Таким образом распределение давления при стационарном течении жидкости таково: давление меньше в местах, где больше скорость течения, и, наоборот, давление больше там, где скорость меньше. Отсюда следует, что при

1.4 Закон Бернулли [8].

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (1)$$

где p_1 и p_2 – давление в начале и конце трубы соответственно; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; h_1 и h_2 – высоты начала и конца трубы соответственно; v_1 и v_2 – скорости потока в начале и конце трубы соответственно.

Сумма давления и плотностей потенциальной и кинетической энергий вдоль трубки тока при стационарном течении идеальной жидкости остается постоянной.

Закон Бернулли является прямым следствием закона сохранения энергии. Частные случаи закона Бернулли:

-Жидкость неподвижна. Тогда скорости v_1, v_2 будут равны нулю, и уравнение Бернулли (1) упрощается и принимает вид:

$$p_1 + \rho gh_1 = p_2 + \rho gh_2 \quad (2)$$

-Высоты одинаковы, то есть $h_1 = h_2$. При этом условии уравнение Бернулли (1) упрощается и принимает вид:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (3)$$

Из формулы (3), что давление больше в тех местах трубки тока, в которых скорость меньше, и наоборот.

Закон Бернулли строго справедлив лишь для каждой отдельной трубки тока. Однако если скорости при переходе от одной трубки тока к другой вдоль одного и того же сечения всей трубы меняются не очень сильно, то закон Бернулли можно приближенно применять и для всей жидкости. В этом случае под p_1, v_1 и p_2, v_2 следует понимать средние давления и скорости по сечениям жидкости. Используя закон Бернулли, можно решить ряд интересных явлений и многие задачи.

Закон Бернулли справедлив и для газов, если скорость течения достаточно мала, так как при этом условии можно пренебречь их сжимаемостью.

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Ход эксперимента:

2.1 Исследование зависимость разницы давлений под крышей и у ее поверхности от угла наклона крыши к горизонту.

2.1.1 Построили модель домика, у которого мы могли изменять угол наклона крыши (рис. 3);

Модель домика была выполнена из потолочных плит подвесного потолка, которые были соединены с помощью уголков на саморезах. Конек крыши модели был выполнен из двух деревянных досок, к которым был прикреплен мягкий уголок, с помощью которого стало возможным изменять угол наклона крыши.

2.1.2 Закрепили двухколенный манометр на модель домика (рис. 3);

2.1.3 Установили пылесос для обдува модели домика (рис. 4);

2.1.4 Зафиксировали разницу высот столбиков жидкости в двухколенном манометре (рис. 3);



Рисунок 3 – Модель домика



Рисунок 4 – Устройство для обдува модели домика (пылесос)

Для измерения разности давлений при обдувании модели ламинарным потоком воздуха авторы использовали двухколенный манометр. Один из его концов был установлен внутри модели под крышей, второй мы перемещали над крышей для измерения разницы давлений в различных точках. Давление было зафиксировано при помощи разницы высот столбиков воды в манометре.

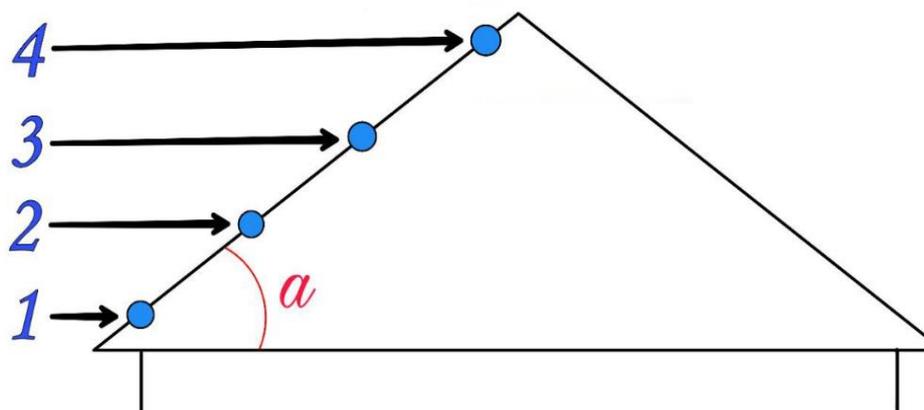


Рисунок 5 – Схематическая модель крыши домика с иллюстрацией изменяемого угла и точек, в которых проводились измерения

На рисунке 5 α - угол наклона крыши к горизонту; 1, 2, 3, 4 – точки на крыше, в которых проводились измерения.

Точки 1 и 4 были выбраны примерно у края и ближе к коньку крыши, соответственно. А точки 2 и 3 - произвольно между ними (рис. 5). Углы наклона крыши к горизонту изменялись в процессе работы и измерялись с помощью инженерного транспорта.

Для измерения разности давлений при обдувании модели ламинарным потоком воздуха мы использовали двухколенный манометр (рис. 6).

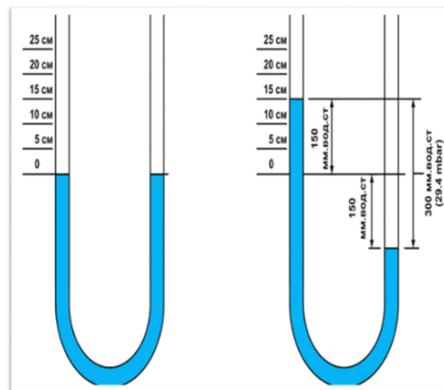


Рисунок 6 – Двухколенный манометр

Было проведено по три измерения разницы высот столбиков воды и рассчитаны их средние значения для каждой из точек, в которых проводились измерения (рис. 5).

Для угла 26° в точке измерения 1 (рис. 5) приведем пример расчета Δh_{cp} :

$$\Delta h_{cp} = \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3}{3} = \frac{10 + 10 + 9}{3} = 9,67(\text{мм})$$

2.1.5 По формуле $\Delta p = \rho g h_{cp}$ нашли разницу давлений внутри дома и у поверхности крыши, взяв $g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, $\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, где Δp – разница давлений внутри дома и у поверхности крыши, ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения;

Для угла 26° в точке измерения 1 (рис. 5) приведен пример расчета разницы давлений внутри дома и у поверхности крыши Δp :

$$\Delta p = \rho g h_{cp} = 1000 * 9,8 * 9,67 * 10^{-3} = 94,73 (\text{Па})$$

2.1.6 Данные трех измерений разниц высот столбиков воды, их средние значения и разницы давлений внутри дома и у поверхности крыши занесли в таблицу 1;

Таблица 1 – Таблица измерений

$\alpha, ^\circ$	Точки	1 измерение $\Delta h_1, \text{мм}$	2 измерение $\Delta h_2, \text{мм}$	3 измерение $\Delta h_3, \text{мм}$	Среднее значение $\Delta h_{cp}, \text{мм}$	$\Delta p, \text{Па}$
26	1	10	10	9	9,67	94,73
	2	11	8	9	9,33	91,47
	3	7	6	6	6,33	62,07
	4	6	6	5	5,67	55,53
31	1	4	5	4	4,33	42,47
	2	4	5	4	4,33	42,47
	3	3	4	3	3,33	32,67
	4	3	4	3	3,33	32,67
36	1	1	1	2	1,33	13,07
	2	5	6	5	5,33	52,27
	3	6	7	7	6,67	65,33
	4	7	7	6	6,67	65,33
45	1	6	8	7	7,00	68,60
	2	5	6	5	5,33	52,27
	3	6	7	6	6,33	62,07
	4	5	7	6	6,00	58,80
53	1	1	1	0	0,67	6,53
	2	4	3	3	3,33	32,67
	3	3	2	3	2,67	26,13
	4	3	2	2	2,33	22,87

2.1.7 На основании данных из таблицы построили графики зависимости разницы давлений внутри дома и у поверхности крыши от угла наклона крыши к горизонту (рис. 7) в четырех точках измерения (рис. 5);

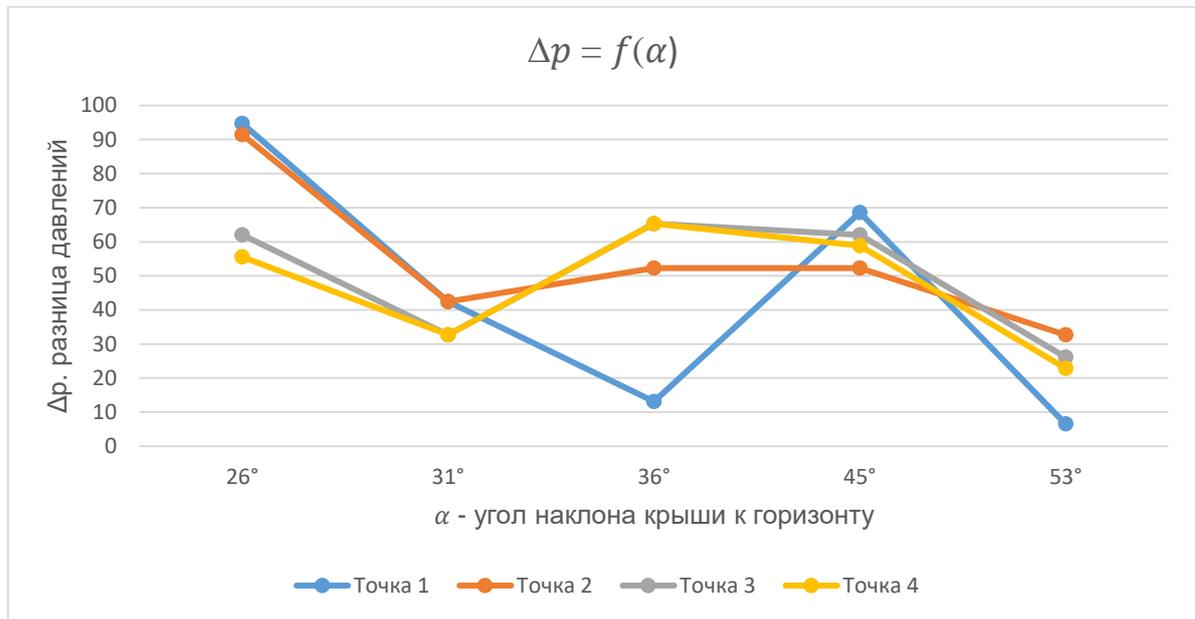


Рисунок 7 – График зависимости разницы давлений внутри дома и у поверхности крыши от угла наклона крыши к горизонту в четырех точках измерения

Из рисунка 7 и таблицы 1 видно, что наименьшее значение разницы давлений $\Delta p = 6,53$ (Па) получилось при наибольшем угле наклона крыши (в нашем случае 53°) к горизонту.

2.1.8 На основании таблицы 1 построили график разницы давлений Δp в точках измерения (рис. 5) при различных углах наклона крыши к горизонту (рис. 8).

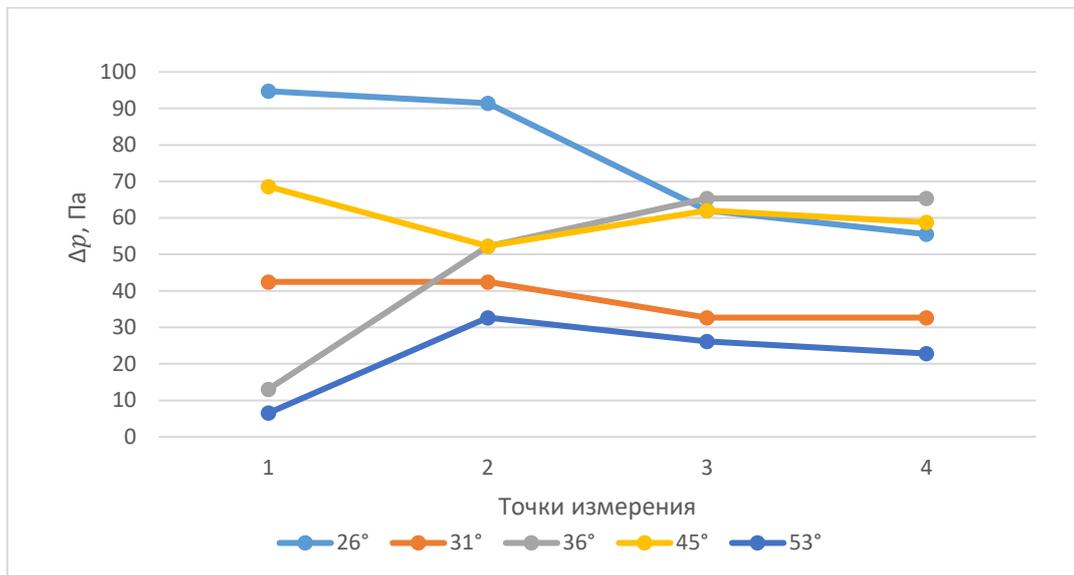


Рисунок 8 – Разница давлений внутри дома и у поверхности крыши в четырех точках измерения (рис. 5)

Из рисунка 8 видно, что в большинстве случаев самое большое значение разницы давлений возникает на краю крыши в точке 1 (рис. 5).

2.2 Исследование зависимости разницы давлений под крышей и у ее поверхности от рельефа крыши.

2.2.1 Положили на крышу модели домика тонкий лист оргстекла (рис. 9);

Для установления зависимости разницы давлений от рельефа поверхности крыши мы положили на крышу нашей модели тонкий лист оргстекла для получения совершенно гладкой поверхности (рис. 9). При гладкой поверхности отсутствуют множественные завихрения и уменьшается турбулентность потока.



Рисунок 9 – Модель домика с тонким листом оргстекла на крыше

2.2.2 Установили планку на край крыши (рис. 10 и рис. 11);

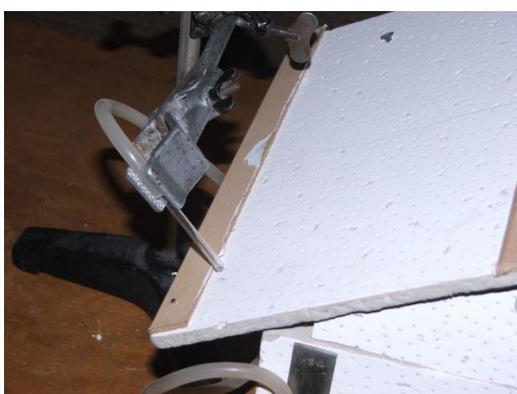


Рисунок 10 – Модель домика с установленной планкой на краю крыши (вид сверху)

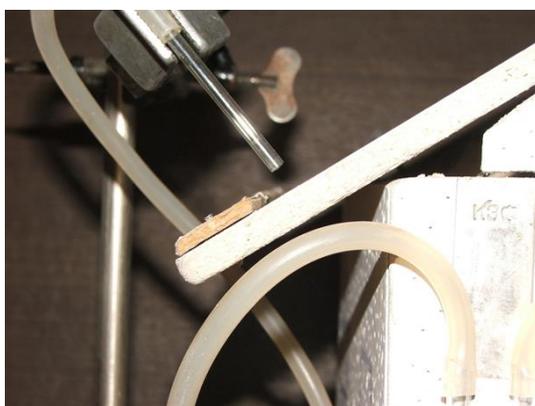


Рисунок 11 – Модель домика с установленной планкой на краю крыши (вид сбоку)

2.2.3 Данные измерений разницы давлений внутри дома и у поверхности крыши в условиях крыши без изменения первоначального рельефа (в таблице 2 - „чистая крыша“), крыши с оргстеклом и с планкой на краю крыши занесли в таблицу 2. Построили график зависимости разницы давлений Δp внутри дома и у поверхности крыши от рельефа крыши в четырех точках измерения (рис. 5).

Таблица 2 – Таблица расчетов и измерений

Параметр	Точки	1 измерение Δh_1 , мм	2 измерение Δh_2 , мм	3 измерение Δh_3 , мм	Среднее значение Δh_{cp} , мм	Δp , Па
чистая крыша	1	5	7	6	6,00	58,80
	2	6	5	6	5,67	55,53
	3	6	6	4	5,33	52,27
	4	4	5	5	4,67	45,73
оргстекло	1	2	3	3	2,67	26,13

	2	3	3	4	3,33	32,67
	3	4	3	4	3,67	35,93
	4	2	2	1	1,67	16,33
планка	1	3	4	3	3,33	32,67
	2	5	6	7	6,00	58,80
	3	5	5	6	5,33	52,27
	4	4	4	5	4,33	42,47

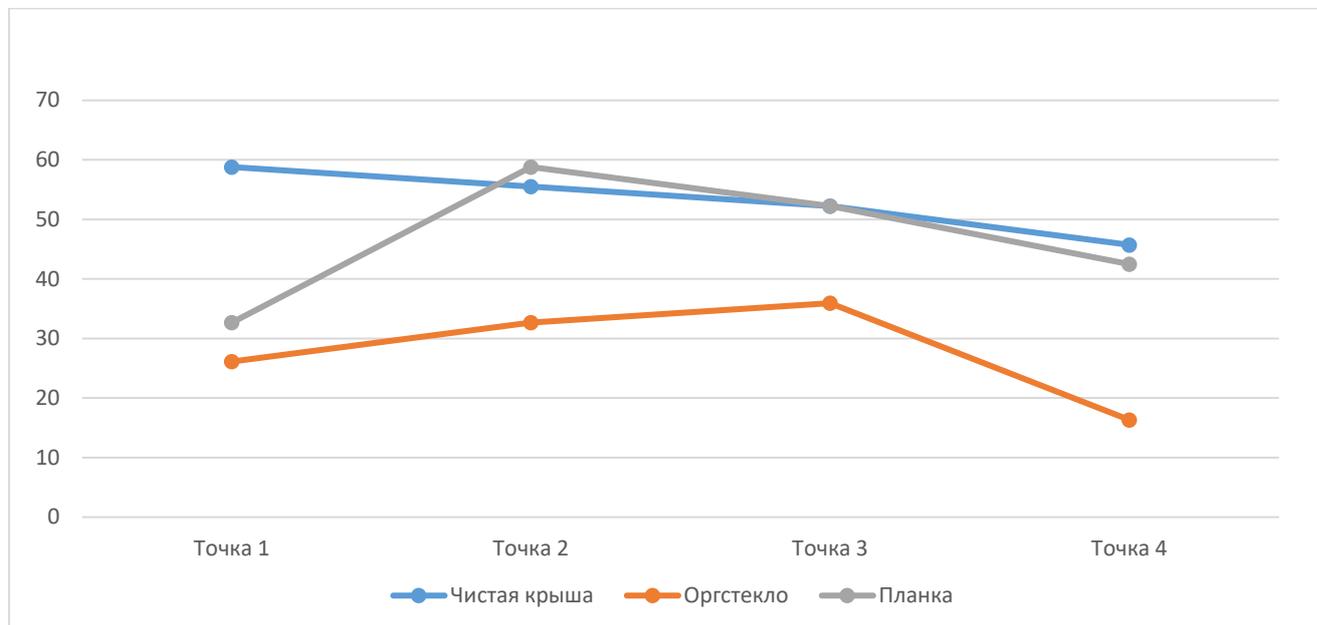


Рисунок 12 – Разница давлений внутри дома и у поверхности крыши в четырех точках измерения (рис. 5)

Как можно видеть из сравнения результатов измерений (рис.12), при гладкой крыше (крыша с тонким листом оргстекла) разница давлений меньше, чем если крыша сделана из материала с более переменным рельефом.

Из рисунка 11 следует, что турбулентность повышает разницу давлений, то есть давление в турбулентном потоке выше, чем в ламинарном.

Планка на краю крыши разбивает воздушный поток, что приближает давление снизу за планкой к давлению внутри дома. Однако разница давлений понижается только сразу за планкой, а в середине и возле конька крыши ничего не изменяется.

2.3 Изучение процесса движения потоков воздуха над крышами строений для определения точке возможных завихрений (турбулентности).

2.3.1 Обклеили нашу модель узкими полосками тонкой фольги (рис. 13, рис. 14, рис. 15);

В завершение эксперимента мы обклеили нашу модель узкими полосками тонкой фольги для наблюдения за направлением потоков воздуха над крышей и возле стенок модели домика.

2.3.2 Провели наблюдение за потоками воздуха.

Наблюдение показало, что завихрения возникают возле края крыши и на стороне крыши, противоположной потоку воздуха (рис. 13, рис. 14). Также завихрения возникают под напуском крыши (рис. 15).



Рисунок 13 – Модель домика, обклеенная полосками фольги (вид спереди)



Рисунок 14 – Модель домика, обклеенная полосками фольги (вид сзади)



Рисунок 15 – Модель домика, обклеенная полосками фольги (вид под напуском крыши)

Заключение.

Задачей исследования было найти угол наклона крыши к горизонту, при котором возникает наименьшая разница давлений внутри дома и у поверхности крыши.

Авторами была построена модель дома для исследования зависимости разницы давлений в четырёх точках измерения (рис. 5):

- при разном угле наклона крыши к горизонту (рис. 7, рис. 8);
- от рельефа крыши (рис. 12).

В ходе исследования были сделаны выводы об оптимальном угле наклона крыши к горизонту и рельефе крыши для уменьшения рисков разрушений и обвалов при ураганах.

По результатам проведенного исследования был сделан вывод о том, что наименьшее значение разницы давлений $\Delta p = 6,53$ (Па) возникает при наибольшем угле наклона крыши (в нашем случае 53°) к горизонту. Такая крыша является наиболее затратной по стоимости, так как на нее уходит наибольшее количество материала.

Кроме того, при увеличении угла увеличивается боковое давление, которое может достигать больших значений в условиях повышения скорости ветра. Для наших широт при ураганах скорость ветра может достигать 15 – 30 м/с, поэтому целесообразно увеличивать угол наклона крыши к горизонту для строений, находящихся в сельской местности.

В ходе исследования было выявлено, что при гладкой крыше разница давлений меньше, чем если крыша сделана из материала с более переменным рельефом. Использование планки на краю крыши приводит к разделению воздушного потока, что приближает давление снизу за планкой к давлению внутри дома. Однако разница давлений понижается только сразу за планкой, а в середине и возле конька крыши ничего не изменяется.

В качестве рекомендации приведем следующее:

- при штормовом предупреждении необходимо открывать вентиляционные окна на фронтонах для уменьшения перепадов давления;
- рекомендуется использовать для строительства крыши более гладкие материалы типа металлочерепицы, так как при более гладком рельефе крыши разница давлений меньше;
- рекомендуется использовать декоративные карнизы или водозаборники на краях крыш (они

разбивают поток воздуха, что позволяет уменьшить разницу давлений). В ходе проведения исследования было установлено, что наибольшая разница давлений возникает именно на краю крыши (рис. 5, точка 1). Именно поэтому карнизы имеют достаточно важное значение.

Список использованных источников:

1. Снесенные ветром: откуда в Беларусь приходят ураганы и как защитить леса от них? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://1prof.by/news/obshhestvo-i-profsoyuzy/snesennye-vetrom-otkuda-v-belarus-pr/>. – Дата доступа: 07.10.2023
2. Cyclone Kyrril. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclone_Kyrril#Notable_buildings. – Дата доступа: 07.10.2023
3. Хавьер (циклон). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B0%D0%B2%D1%8C%D0%B5%D1%80_\(%D1%86%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%BE%D0%BD](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B0%D0%B2%D1%8C%D0%B5%D1%80_(%D1%86%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%BE%D0%BD). – Дата доступа: 07.10.2023
4. Влияние южных циклонов на формирование погодных условий в осенне-зимний период на территории Беларуси / Географический факультет, кафедра общего землеведения и гидрометеорологии. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/229198>. – Дата доступа: 07.10.2023.
5. Почему ураган так легко снес крыши и остановки. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://college36.ru/water/pochemu-uragan-tak-legko-snes-kryshi-i-ostanovki-nbsp-pochemu-uragan-snosit/>. – Дата доступа: 07.10.2023
6. Савельев И.В. Курс общей физики, том I [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://edu.tltsu.ru/en/book_view.php?book_id=4b6&page_id=3839. – Дата доступа: 07.10.2023
7. Элементарный учебник физики: Учеб. пособие. В 3 т. Т. 1. Механика. Теплота. Молекулярная физика / Под ред. Г.С. Ландсберга. — 14-е изд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 612 с. — ISBN 978-5-9221-1256-7
8. Условия неразрывности, несжимаемости жидкости, уравнение Бернулли [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://interneturok.ru/lesson/physics/10-klass/bmehnika-sistemy-telb/osnovnye-ponyatiya-gidrodinamiki-liniya-toka-trubka-toka-usloviya-nerazryvnosti-neszhimaemosti-zhidkosti-uravnenie-bernulli>. – Дата доступа: 09.10.2023

STUDY OF AIRFLOW OVER BUILDING ROOFS UNDER VARIOUS FACTORS

Shchukina A.A., Skryt O.N.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Khramovich E.M. – PhD in Physics and Mathematics, associate professor

Kachanovich A.S – teacher of physics of the State Educational Institution «Gymnasium No. 42 of Minsk Nobel Prize Lauret Zh.I. Alferov»

Annotation. The paper provides a review of airflow studies over building roofs. It establishes the relationship between the pressure difference below the roof and at its surface with the roof slope angle to the horizon. It demonstrates the dependence of the pressure difference below the roof and at its surface on the roof's relief.

Keywords. Laminar airflow, Bernoulli's principle, pressure difference, Pitot tube, U-tube manometer, roof material, roof slope angle.