

## ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

**Гидродинамический метод расчета ветровой нагрузки на подветренный склон крыши и способ снижения скачка давления**О. Н. Мельникова<sup>a</sup>, К. В. Показеев<sup>b</sup>*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: <sup>a</sup>olamel@yandex.ru <sup>b</sup>sea@phys.msu.ru*

Статья поступила 17.03.2015, подписана в печать 30.06.2015.

Впервые предложена гидродинамическая модель, позволяющая рассчитать возмущение давления на подветренном скате крыши при ее обдуве горизонтальным потоком воздуха, направленным в скат (при малых углах ската к горизонтали). Модель учитывает процесс образования вихрей в вязком слое замедляющегося в направлении движения потока воздуха. При вылете вихрей из вязкого слоя возникает ускорение потока у подстилающей поверхности, что приводит к значительному падению давления и к срыву крыши. Показано, что отрицательный скачок давления на участке, прилегающем к коньку крыши, может быть снижен на несколько процентов при снижении коэффициента трения и увеличении длины участка безотрывного обтекания крыши воздушным потоком. Предложен способ значительного снижения скачка давления с помощью установки расширяющихся воздухопроводов на крыше, внутри которых возникает компенсирующий скачок давления. Результаты подтверждены в лабораторных исследованиях.

*Ключевые слова:* пограничный слой, ветровая нагрузка, разрушение крыш ветром.

УДК: 532.5.031. PACS: 47.20.Ib, 47.27.N-.

**Введение**

Общая концепция проектирования кровель, устойчивых к воздействию ветра, заключается в том, что проектная предельная ветровая нагрузка (устойчивость к срыву кровли) должна быть больше или равна ветровой нагрузке, действующей на кровлю. Для систем кровли необходимо ввести запас прочности, учитывающий неизбежные вариациями материала и конструкции крыши, старение материала. Общепринятый инженерный подход требует по меньшей мере двукратного превышения проектной ветровой нагрузки над величиной предельной расчетной ветровой нагрузки. Только в этом случае кровля может считаться достаточно устойчивой по отношению к ветру. Значительное превышение расчетной предельной нагрузки приводит к нежелательному удорожанию строительства.

Ветровая нагрузка на скаты крыши обусловлена превышением давления на наветренный склон при ветре в скат и понижением давления на поверхности крыши на подветренном склоне. При ветре в фронтоны на всей крыше давление падает. Срыв и повреждения крыши наблюдаются в зонах максимального понижения давления — за коньком на подветренном склоне при ветре в скат и на передней кромке при ветре в фронтоны. Наиболее опасным оказывается короткий участок подветренного склона, прилегающего к коньку. Расчетное значение средней составляющей ветровой нагрузки  $p$  в зависимости от высоты над поверхностью земли определяется по

эмпирической формуле

$$p = Pck, \quad (1)$$

где  $P$  — значение ветрового давления, определяется по карте приложения в «Изменениях к СНиП 2.01.07-85 от 1993 г.» и учитывает влияние географического положения объекта (максимальное значение, принятое для России — Анадырь, Владивосток,  $P_{\max} = 140$  кгс/м<sup>2</sup>,  $1$  кгс/м<sup>2</sup> = 9.8 Па),  $k$  — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления от высоты, определяется по таблице;  $c$  — аэродинамический коэффициент, учитывающий зону крыши и знак перепада давления, он имеет знак плюс на основной части наветренного склона и знак минус на подветренном склоне, где наблюдается значительное снижение давления (при ветре в скат). Максимальное значение ветровой нагрузки на подветренном склоне крыши по (1) составляет  $p_{\max} = -170$  кгс/м<sup>2</sup>. Срыв крыш наблюдается при скорости ветра  $u > 32.5$  м/с (11–12 баллов по шкале Бофорта, F1 по шкале Фудзиты–Пирсона), эта скорость соответствует указанному выше значению максимальной ветровой нагрузки. Однако выражение (1) не учитывает скорость ветра и конструктивные особенности крыши. Другая методика [1–2] оценивает ветровое давление на конструкции по эмпирической формуле, содержащей скорость ветра  $u$ :

$$P = \beta \rho u^2, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха,  $\beta$  — эмпирический коэффициент, равный 0.5 в России и 0.75 в ряде

других стран [2]. Максимальному значению ветровой нагрузки, рассчитанной по методике (1) для подветренного ската крыши  $p_{\max} = -170$  кгс/м<sup>2</sup>, соответствует скорость ветра  $u = 45$  м/с, рассчитанная по (2). Различия и неточности расчетов по (1), (2) могут быть уменьшены, если расчеты по эмпирическим формулам заменить непосредственными измерениями падения давления на подветренном склоне крыш при обдуве моделей строений в аэродинамических трубах, что многократно увеличивает стоимость объектов и применяется крайне редко. Кроме того, возникает проблема пересчета полученных данных на реальные строения. Решение проблемы требует создания гидродинамических методов расчета ветровой нагрузки на подветренных скатах крыш при заданной скорости ветра с учетом параметров материала и конструкции крыши. Это возможно, если модель учитывает физические механизмы обтекания крыши потоком воздуха. Создание такой модели и разработка метода снижения ветровой нагрузки на подветренный скат крыш является целью настоящего исследования.

### 1. Расчет поля давления на подветренном скате крыши

Пусть крышу высотой  $h$  с длиной ската  $L$  с малым углом ската к горизонту  $\alpha < 15^\circ$  обтекает горизонтальный поток воздуха  $u$ , направленный в скат (рис. 1). Левый скат на рисунке является наветренным, а правый — подветренным. Направим ось  $x$  вдоль подветренного ската крыши, ось  $y$  — по нормали к нему, поместив начало координат непосредственно на вершине крыши. В вязком слое тормозящегося потока жидкости скорость течения может быть записана в виде  $u(y) = u_s + \chi y$  ( $\chi = \text{const}$ ,  $u_s = u(0)$ ) [3, 4]. Если предположить, что на линии тока у поверхности крыши выполняется условие прилипания  $u_s = 0$ , то давление на крышу сверху и снизу будет равно атмосферному давлению. Однако практика показывает, что на подветренном склоне происходит существенное понижение давления на верхней поверхности крыши, что и приводит к ее разрушению при резких порывах ветра. При обтекании крыши на наветренном склоне поток воздуха сужается — скорость растет вдоль склона, а на подветренном расширяется — скорость падает вдоль склона. В работах [3, 4] экспериментально показано, что в замедляющемся в направлении движения стационарном потоке воздуха происходит периодическая остановка вязкого слоя толщиной  $\delta$ . Слой тормозится за счет действия силы трения на подстилающей поверхности и обратного градиента давления на верхней границе слоя. При торможении в вязком слое периодически формируется цепочка равноудаленных цилиндрических вихрей, вращающихся как твердое тело, с горизонтальной осью, направленной перпендикулярно оси потока [4, рис. 1]. Вихри сворачиваются у верхней границы вязкого слоя, остаются в зоне формирования, так как

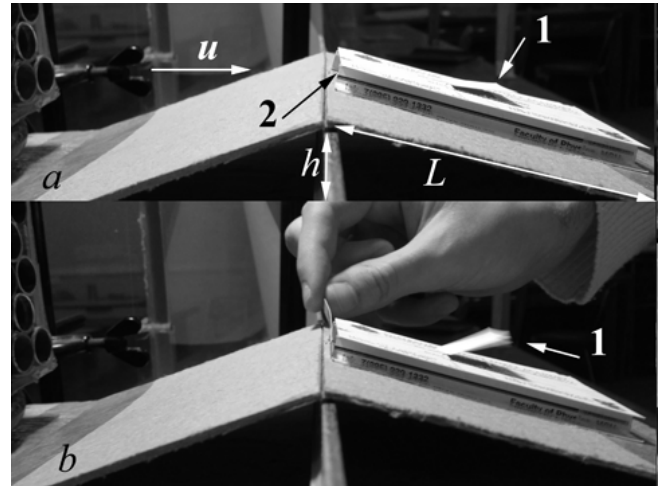


Рис. 1. Обдув крыши горизонтальным потоком воздуха, направленным в скат: 1 — крышка на отверстии в верхней пластине воздуховода; 2 — заборное отверстие воздуховода на коньке крыши. Кадр а — заборное отверстие открыто, кадр б — заборное отверстие закрыто

скорость цепочки вихрей близка по модулю скорости фоновому потоку воздуха, но направлена вверх по течению. Когда скорость у подстилающей поверхности достигает минимума, а толщина вязкого слоя — максимума, вихри вылетают вверх, что приводит к резкому росту скорости течения во всем вязком слое [3, рис. 4]. В результате осредненная по времени скорость течения на приповерхностной линии тока  $u_s \neq 0$ . На месте вылетевших вихрей формируются новые, которые практически не смещаются в фазе торможения вязкого слоя. Процесс формирования и вылета вихрей в вязком слое тормозящегося потока воздуха над песчаной поверхностью показан на рис. 2. Фаза ускорения вязкого слоя при вылете вихрей составляет примерно две десятых периода вылета вихрей  $T$ :  $\Delta t_{\text{ac}} = 0.2T$ . Период может быть рассчитан по формуле [2–3]

$$T = \left( \frac{2\delta}{5u_s|u_x|C_f} \right)^{1/2} \arctg \left( \sqrt{\frac{2u_sC_f}{5|u_x|\delta}} \right), \quad u_x = \frac{\partial u_{\max}}{\partial x}, \quad (3)$$

где  $u_{\max}$  — скорость потока на внешней границе пограничного слоя,  $C_f$  — коэффициент трения скольжения воздуха по подстилающей поверхности (безразмерный). По данным экспериментов [3, 4], если скорость потока вне пограничного слоя  $u_{\max} > 3$  м/с, то  $u_s = u_{\max}/10$ , а толщина вязкого слоя  $\delta$  на порядок превышает размер шероховатости подстилающей поверхности.

Для расчета  $u_x$  в (3) необходимо оценить перепад скорости вдоль подветренного ската крыши. Пусть на наветренный склон крыши натекает однородный горизонтальный поток воздуха со скоростью  $u$ . На вершине крыши скорость потока возрастет до значения  $u_{\max}$  на внешней границе погранслоя. Над вершиной крыши скорость потока будет убывать по вертикали от  $u_{\max}$  до скорости набегающего

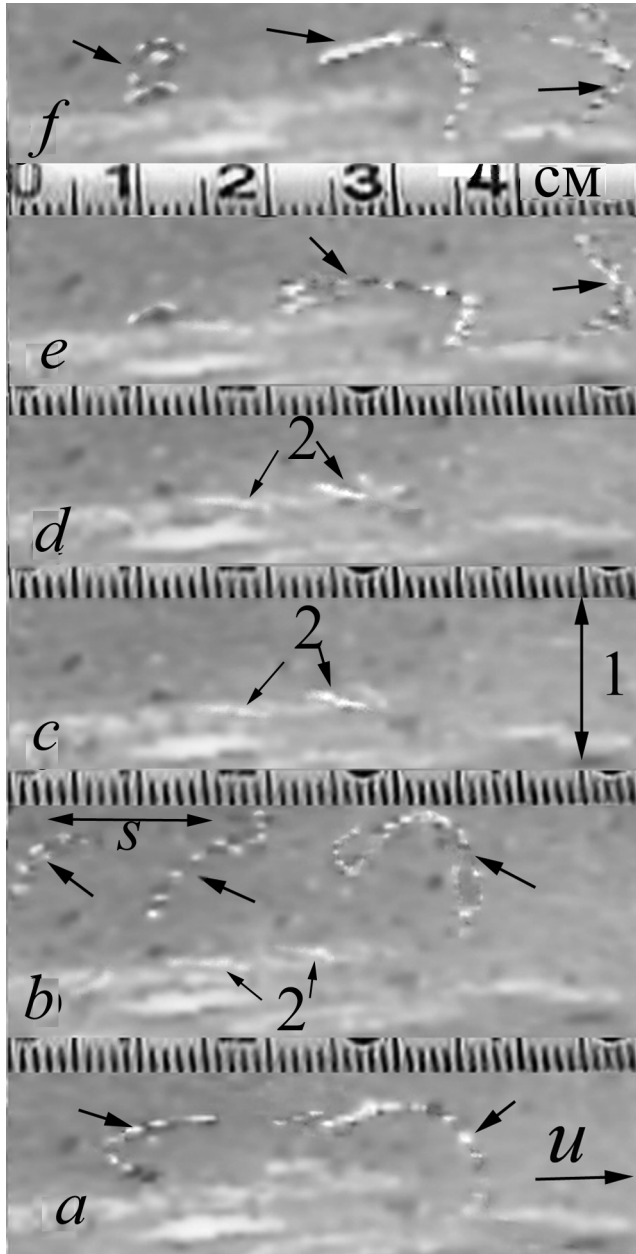


Рис. 2. Последовательные кадры видеозаписи процесса образования вихрей в вязком слое замедляющегося в направлении движения воздушного потока над песчаной поверхностью: 1 — песчаная поверхность; 2 — цилиндрические вихри у поверхности песка, стрелками показаны вихри, поднявшиеся над поверхностью песка,  $s$  — расстояние между вихрями. Камера направлена под  $45^\circ$  к горизонтали

исходного потока  $u$ , которая достигается на некоторой высоте  $h_1$ . Высота  $h_1$  зависит от угла  $\alpha$  и определяется экспериментально. Для  $\alpha = 15^\circ$  значение  $h_1 \approx 3h$ . Для малых  $\alpha$  можно считать, что на подветренном скате крыши поток не отрывается от поверхности. Тогда можно записать равенство потоков скорости в поперечном сечении расширяющегося слоя потока воздуха, имеющего толщину  $h_1$  над вершиной крыши и толщину  $h + h_1$  в конце подветренного ската (толщиной вязкого слоя прене-

брегаем):

$$u(h + h_1) = \frac{u + u_{\max}}{2} h, \quad (4)$$

$$h_1 = 3h, \quad u_{\max} = \frac{5u}{3}, \quad \frac{\partial u_{\max}}{\partial x} = -\frac{2u}{3h} \sin \alpha.$$

Соотношение (4) проверялось в лабораторном эксперименте на оборудовании, описанном в [4]. Для крыши с длиной ската  $L = 12$  см,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $u = 700$  см/с получено значение  $u_x = -38$  с $^{-1}$ , которое очень близко расчету по (4):  $-38.9$  с $^{-1}$ .

Для получения оценочных соотношений перепада давления будем считать, что изменение скорости ветра у поверхности раздела в фазе ускорения течения является линейной функцией времени, скорость возрастает от 0 до  $u_s$  за время  $\Delta t_{ac} = 0.2T$ , тогда ускорение для  $u_{\max} > 3$  м/с определим как

$$\dot{u}(0) = \frac{u_{\max}}{2T}. \quad (5)$$

Будем считать, что в фазе ускорения вязкого слоя после вылета вихря скорость потока в слое не меняется по вертикали. Возмущение давления относительно атмосферного на линии тока у подстилающей поверхности будет определяться уравнением Коши-Лагранжа [5]:

$$p = -\rho \left[ \dot{u}X + \frac{1}{2}(u_s)^2 + gy \cos \alpha \right], \quad (6)$$

где  $X$  — расстояние, на котором рассчитывается возмущение давления;  $\rho$  — плотность воздуха;  $g$  — ускорение свободного падения. Система (3)–(6) позволяет рассчитать перепад давления на подветренном склоне крыши вблизи вершины, где в основном наблюдается срыв крыши при сильных порывах ветра. Расчеты проводились для скорости ветра 33 м/с (скорость ветра, при которой возникают срывы крыши),  $\alpha = 15^\circ$ ,  $\delta = 0.001$  м,  $C_f = 0.05$ . Давление рассчитывалось на метр квадратный (в (6)  $X = 1$  м). Величины второго и третьего слагаемых в (6) оказываются на 2–3 порядка меньше первого и могут не учитываться. Для этого случая получается простая формула для расчетов

$$P \approx -\rho \frac{u_{\max}^2}{2} \frac{X}{2F}, \quad (7)$$

$$F = \sqrt{q \frac{\delta}{C_f}} \arctg \left( \frac{1}{5} \sqrt{q \frac{C_f}{\delta}} \right), \quad q = \frac{3L}{2}.$$

Расчеты, выполненные по (7) для длины ската 4, 5, 6 м, дают следующие значения понижения давления на подветренном склоне:

| Длина ската, м                                                                                | 4    | 5    | 6    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|
| Скачок давления относительно атмосферного, кгс/м <sup>2</sup> (1 кгс/м <sup>2</sup> = 9.8 Па) | –199 | –174 | –156 |

Полученная оценка близка максимальным значениям, которые предлагают эмпирические мето-

ды (для крыш со средней длиной ската 5 м) — 170 кгс/м<sup>2</sup>, что подтверждает справедливость решения (7).

## 2. Влияние параметров конструкции крыши на возмущение давления

В отличие от эмпирических методик решение (7) учитывает конструктивные особенности крыши (угол, длину ската, шероховатость поверхности), которые существенно меняют результат для одной и той же скорости ветра. Для  $L = 5$  м и  $C_f = 0.05$ , 0.06 и 0.07 (остальные параметры не меняются) понижение давления составит:

| Коэффициент трения $C_f$                                                                      | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|
| Скачок давления относительно атмосферного, кгс/м <sup>2</sup> (1 кгс/м <sup>2</sup> = 9.8 Па) | –174 | –188 | –200 |

Полученные данные показывают, что уменьшение шероховатости поверхности приводит к снижению скачка давления на верхней поверхности крыши на подветренном склоне на несколько процентов. Однако для скорости ветра  $u > 33$  м/с такое снижение скачка давления не сможет предотвратить разрушение кровли.

Для решения задачи следует понизить скачок давления между верхней и нижней поверхностями кровли. Этого можно добиться, если понизить давление воздуха на нижнюю поверхность кровли. Такой скачок возникнет, если вдоль нижней поверхности организовать замедляющийся в направлении движения поток воздуха. Тогда на нижней поверхности крыши будет возникать отрицательный скачок давления, компенсирующий скачок на верхней поверхности. Стоит отметить, что такой поток достаточно осуществить на коротком участке рядом с вершиной крыши — не более одной пятой длины ската, на котором обычно и наблюдается первичные разрушения. Это легко сделать, если кровлю изготовить в виде расширяющихся воздухопроводов, открытых с двух сторон. Короткую сторону диффузора надо разместить вдоль конька, через него воздушный поток будет попадать в воздухопровод (рис. 1), формируя замедляющийся поток внутри расширяющегося воздуховода. На кафедре физики моря и вод суши физического факультета МГУ был проведен ряд экспериментов для проверки сделанного предположения. На крышу с длиной ската  $L = 12$  см был установлен расширяющийся воздухопровод, забирающий воздушный поток у конька крыши. На верхней поверхности воздуховода сделано прямоугольное отверстие, закрытое легкой крышкой. Крышка вставлялась в паз воздуховода так, что выступов на поверхности воздуховода не имелось. Верхняя кромка крышки крепилась к поверхности воздуховода, остальные кромки оставались свобод-

ными так, что крышка могла подниматься вверх. Угол подъема крышки будет определяться перепадом давления на верхней и нижней поверхности. Горизонтальный поток воздуха направлялся в скат крыши. На рис. 2, а отверстие воздуховода у конька крыши открыто, воздух свободно проходит через диффузор. Видно, что крышка на воздуховоде отклоняется от его поверхности на малый угол, что возможно только в том случае, если на верхней и нижней поверхности крышки давление почти одинаково. Это условие выполняется, так как над крышкой и под крышкой существуют замедляющиеся потоки воздуха, отрицательные возмущения давления почти уравнивают друг друга. На рис. 2, б отверстие воздуховода перекрыто, воздух внутрь не попадает. В этом случае крышка резко поднимается вверх. Она не срывается с крыши только потому, что закреплена вдоль верхней кромки. Эксперимент показывает, что установка диффузоров на крыше позволяет значительно снизить перепад давления на верхнюю и нижнюю поверхности кровли на подветренном склоне.

Такие воздуховоды могут быть установлены на обоих скатах крыши, предохраняя ее от разрушения при ураганных ветрах двух направлений. На подветренном склоне поток воздуха в воздуховоде будет замедляющимся (отрицательное возмущение давления на нижней поверхности крыши), а на наветренном склоне — ускоряющимся (отсутствие возмущения давления).

## Заключение

Впервые предложена гидродинамическая модель, позволяющая оценить возмущение давления на подветренном скате крыши при обдуве горизонтальным потоком воздуха, направленным в скат. На наветренном скате в ускоряющемся потоке воздуха на верхней и нижней поверхности крыши скорость потока на линии тока, прилегающей к поверхности, равна нулю. На подветренном скате в замедляющемся потоке воздуха в вязком слое формируются вихри, которые периодически вылетают вверх, что приводит к резкому ускорению потока и снижению давления на внешней поверхности крыши. Показано, что отрицательный скачок давления может быть снижен на несколько процентов при снижении коэффициента трения и увеличении длины участка безотрывного обтекания крыши воздушным потоком. Предложен способ значительного снижения скачка давления с помощью установки расширяющихся воздухопроводов на крыше, забирающих воздух вблизи конька. Результаты проверены в лабораторных условиях.

## Список литературы

1. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. М., 1972.
2. Standards ASCE/SEI 7-05. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (7-05). International Building Code. 2006.



3. Волков П.Ю., Достовалова К.В., Еречнев Д.А. и др. // Изв. РАН. Физ. атмосферы и океана. 2001. **37**, № 6. С. 834. (*Volkov P.Yu., Dostovalova K.V., Erechnev D.A. et al. // Izvestiya. Atmos. and Oceanic Phys.* 2001. **37**, N 6. P. 769.)
4. Иванова И.Н., Мельникова О.Н., Нивина Т.А., Показеев К.В. // Изв. РАН. Физ. атмосферы и океана. 2006. **42**, № 5. С. 703. (*Ivanova I.N., Mel'nikova O.N., Nivina T.A., Pokazeev K.V. // Izvestiya. Atmos. and Oceanic Phys.* 2006. **42**, N 5. P. 646.)
5. Ламб Г. Гидродинамика. М.: 2003. (*Lamb H. Hydrodynamics. Cambridge, 1932.*)

### **A hydrodynamic method for calculating the wind load on the leeward slope of a roof and for reducing the pressure jump**

**O. N. Melnikova<sup>a</sup>, K. V. Pokazeev<sup>b</sup>**

*Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

*E-mail: <sup>a</sup>olamel@yandex.ru <sup>b</sup>sea@phys.msu.ru.*

A hydrodynamic model for calculating the pressure jump on the leeward slope of a roof during a horizontal air flow that is directed to its slope is proposed for the first time. The model takes the formation of vortices in a viscous layer of an air flow that decelerates in the flow direction into account. When a vortex departs from the viscous layer, flow acceleration occurs at the underlying surface, leading to a considerable pressure drop and to tearing the roof off. It is shown that the negative pressure jump at a site that is adjacent to the roof ridge can be decelerated by several percent with a decreased friction factor and an increased length of the portion of the roof where air flows without separation. A method for considerably reducing the pressure drop is proposed for the first time, viz., the installation of expanding air ducts on the roof, within which a compensatory pressure jump occurs. The results are verified by laboratory studies.

*Keywords:* boundary layer, wind load, destruction of a roof by wind.

*PACS:* 47.20.Ib, 47.27.N-.

*Received 17 March 2015.*

*English version: Moscow University Physics Bulletin 5(2015).*

### **Сведения об авторах**

1. Мельникова Ольга Николаевна — доктор физ.-мат. наук, доцент, доцент; e-mail: olamel@yandex.ru.
2. Показеев Константин Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (495) 939-16-77, e-mail: sea@phys.msu.ru.