

# Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов

УДК 711.62 + 624.042.41

DOI: 10.14529/build190401

## РАСЧЕТ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК С УЧЕТОМ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СКОРОСТИ ВЕТРА В ЗАСТРОЙКЕ

**В.Д. Оленьков, Н.Т. Тазеев**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Объектом исследования является ветровой режим городской застройки как фактор, который необходимо учитывать при расчетах ветровой нагрузки. В процессе исследования проводились эксперименты численного моделирования процесса обтекания воздушным потоком зданий в программном комплексе AnsysFluent. Для получения достоверных сведений о количественной и качественной картинах распределения воздушного потока в застройке исследование проводилось в два этапа.

Были получены данные о значениях скоростей и характере распределения воздушного потока в застройке, разработана общая методика учета локальных увеличений скорости ветра при расчетах ветровой нагрузки на здание. Выведена расчетная формула для определения ветровых нагрузок от трансформированного воздушного потока. В рамках разработанной методики исследования определен важнейший параметр учета локальных изменений скорости – эффективная ширина потока, позволяющий учитывать геометрические параметры застройки.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком уровне влияния трансформированного воздушного потока на здание.

*Ключевые слова:* трансформация воздушного потока, ветровые нагрузки, эффективная ширина потока, логарифмический профиль ветра, численное моделирование, Ansys FLUENT.

### Введение

Современное строительство характеризуется увеличением этажности зданий в рамках тенденции уплотнения застройки и рационального использования территорий. При проектировании высотных (более 75 м) зданий значительное влияние оказывают горизонтальные нагрузки (ветровое давление, сейсмика), для расчета которых существует множество различных методик и рекомендаций [1].

Но при этом существует целый спектр проблем, возникающих в сложных градостроительных ситуациях (восходящие потоки ветра, определение аэродинамических коэффициентов для зданий сложной формы, влияние параметров застройки на скорость ветра и т. д.). Как известно, для плотной застройки характерно снижение скорости ветра по сравнению с открытой местностью приблизительно в 2 раза, что позволяет снизить расчетную ветровую нагрузку при расчетах. Однако в некоторых неблагоприятных случаях может возникнуть «эффект трубы», при котором при прохождении ветра через застройку наблюдается увеличение скорости отдельных потоков, оказывающих значительное воздействие на здания. На сегодняшний день этот вопрос учитывается при помощи экспериментов физического и численного моделирования процесса взаимодействия ветра с застройкой во всех направлениях. Эти мероприятия проводят при проектировании

кварталов с высотной застройкой (более 100 м), однако это не всегда удобно, а также увеличивает стоимость проектных работ [2–4].

Условия, при которых возникают локальные увеличения скоростей ветра, не учитываются при расчете. Частично этот эффект перекрывается коэффициентом надежности по нагрузке  $\gamma_f$ , принимаемым для ветровой нагрузки, равным 1,4. При этом данный коэффициент не предназначен для учета этого явления и, возможно, не удовлетворяет в полной мере условиям обеспечения жесткости и устойчивости здания.

В данном контексте возникает необходимость составления уточненных рекомендаций по проектированию, в которых будет учтено влияние трансформации воздушного потока на ветровые нагрузки и их характер не только по высоте, но и по всей поверхности здания [5, 6].

### 1. Описание методики проведения исследования и исходные данные

Основными параметрами, определяющими значение ветрового давления, являются плотность воздуха  $\gamma$  и скорость ветра  $v$ . Согласно уравнению Бернулли, ветровая нагрузка прямо пропорциональна квадрату скорости ветра [7]:

$$w = \frac{\gamma v^2}{2}. \quad (1)$$

## Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов

В СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» для нормативного значения ветрового давления приведена формула [8]:

$$w_0 = 0,43v_0^2. \quad (2)$$

Здесь  $v_0$  – скорость ветра, соответствующая 10-минутному интервалу осреднения и превышаемая в среднем один раз в 50 лет.

Согласно Еврокоду, базовое значение скоростного напора  $q_b$  (аналог  $w_0$  из СП) определяется из уравнения Бернулли (1) при плотности воздуха  $\gamma = 1,25 \text{ кг/м}^3$  [9].

В ПК Ansys Fluent задаются исходные параметры. Плотность воздуха принимается равной  $1,225 \text{ кг/м}^3$ , вязкость –  $1,789 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , то есть эти параметры соответствуют температуре воздуха  $15,0 \text{ }^\circ\text{C}$  [10–12].

Для получения достоверных результатов и возможности осуществления их проверки исследование было разбито на 2 этапа:

1) определение скоростей трансформированного воздушного потока, прошедшего через разрыв между двумя зданиями (количественная картина);

2) определение характера воздействия трансформированного воздушного потока на здание (качественная картина).

Принципиальная схема проведения исследования изложена на рис. 1.

Исследования первого этапа проводятся для определения изменений скорости в зависимости от ширины разрыва  $S$  и расстояния от разрыва  $d_w$ . Второй этап исследования необходим для определения характера распределения давления по поверхности в зависимости от соотношения ширины разрыва и ширины здания.

Согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», изменение скорости ветра по высоте учитывается при помощи коэффициента  $k(z_e)$ , определяемого по табл. 11.2, либо по формуле 11.4 [8]:

$$k(z_e) = k_{10} \left( \frac{z_e}{10} \right)^{2\alpha}, \quad (3)$$

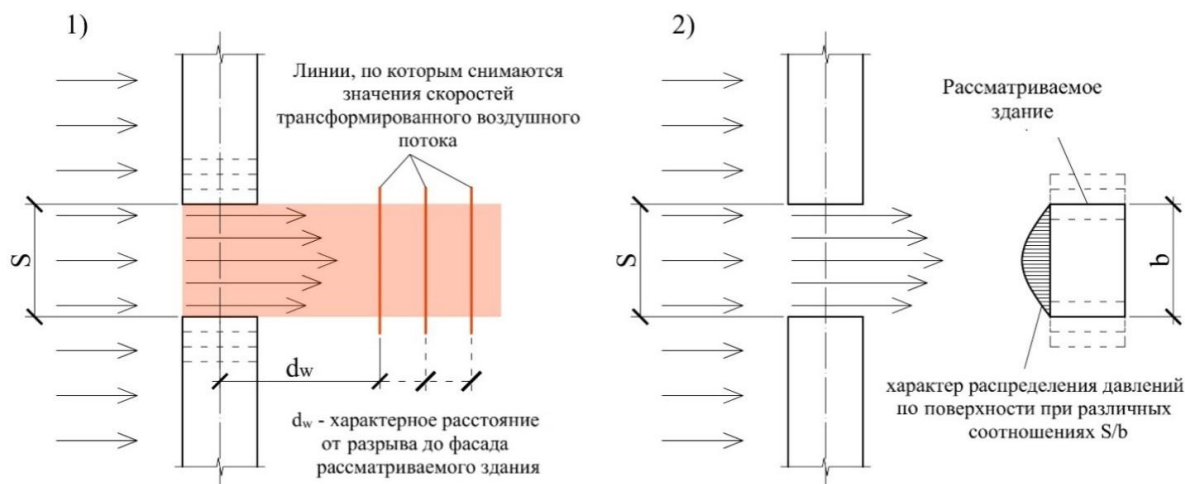


Рис. 1. Принципиальная схема проведения исследования:  
1) первый этап исследования; 2) второй этап исследования

где  $z_e$  – высота над поверхностью земли;  $k_{10}$  и  $\alpha$  – коэффициенты, определяемые по табл. 11.3 СП [8].

Формула (3) представляет собой уравнение логарифмического профиля ветра, сокращенное на скорость ветра на высоте 10 м.

В общем виде уравнение логарифмического профиля скорости ветра имеет вид [7]:

$$U(z) = U_{10} (Z/10)^\alpha, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – параметр, зависящий от типа местности.

Для задания профиля типа местности «С» в ПК Ansys Fluent необходимо сопоставить функцию распределения давлений по высоте здания (3) и выражение (2), которое представляет собой преобразованное уравнение Бернулли:

$$w_0 \times k(z_e) = 0,43 \times v_{\text{фон}}^2(z_e), \quad (5)$$

$$300 \times 0,4 \times \left( \frac{z_e}{10} \right)^{0,5} = 0,43 \times v_{\text{фон}}^2(z_e),$$

$$279,07 \times \left( \frac{z_e}{10} \right)^{0,5} = v_{\text{фон}}^2(z_e),$$

$$v_{\text{фон}}^2 = \sqrt{279,07 \times \left( \frac{z_e}{10} \right)^{0,5}}.$$

$$v_{\text{фон}} = 16,7 \times \left( \frac{z_e}{10} \right)^{0,25}. \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой функцию распределения скорости ветра по высоте, при которой давления на фасад здания принимают значения в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», для II ветрового района с типом местности «С» (городские районы с плотной застройкой зданиями высотой более 25 м).

Таким образом, получен профиль скорости ветра, который вызывает давление на фасад здания, соответствующее II ветровому району и типу местности «С» (рис. 2).

Затем выражение (6) вводится в ПК Ansys Fluent в виде программного кода.

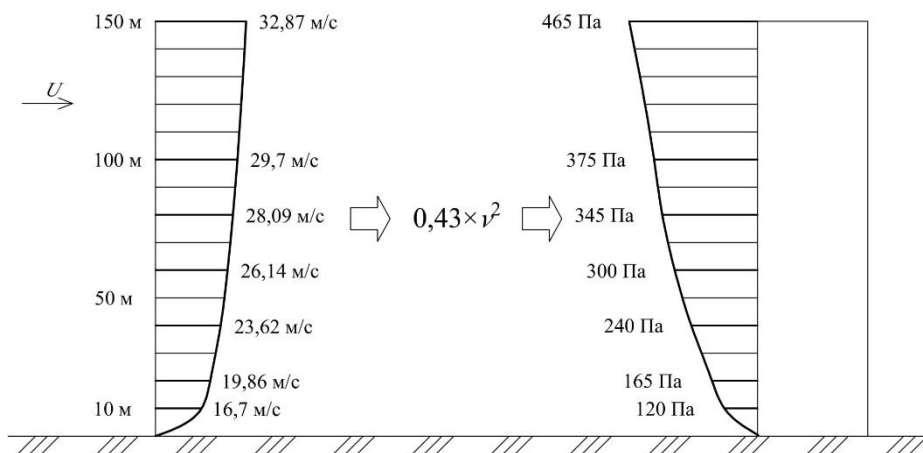


Рис. 2. Искомый логарифмический профиль ветра (слева), вызывающий давление, соответствующее II ветровому району и типу местности «С» (справа)

## 2. Проведение численных экспериментов I этапа исследования

Для первого этапа исследования были проведены эксперименты численного моделирования по определению изменений скоростей ветра в зависимости от ширины разрыва между двумя зданиями. Ширина разрыва варьируется от 10 м до 50 м с шагом 5 м.

Значения скоростей трансформированного воздушного потока определяются при помощи функции Chart постпроцессора CFD Post. На характерных высотах и расстояниях от исследуемого разрыва строится линия, с которой автоматически снимаются значения скоростей и строятся графики (рис. 3).

На рис. 3, а синим цветом выделена линия, с которой снимаются значения графика. Положение этой линии задается вручную. Полученные графики представляют собой распределение значений скорости трансформированного воздушного потока по ширине. Очевидно, что скорости распределены неравномерно, максимальные значения на-

ходятся в центральной части потока, к краям скорость существенно снижается (рис. 3, б).

Далее необходимо осреднить скорости по ширине потока, чтобы получить равномерную картину распределения. Необходимо выделить из графика и рассмотреть только ту его часть, которая превышает значение фоновой скорости ветра. Схема определения осредненной скорости ветра по ширине потока представлена на рис. 4.

Осреднение происходит в 5 этапов:

1. На графике скоростей ветра отмечается значение фоновой скорости ветра ( $v_{\text{фон}}$ ) на высоте, на которой снят этот график.
2. Определяется ширина  $B_1$ , соответствующая длине отрезка, образующегося при пересечении искомого графика и линии  $v_{\text{фон}}$ .
3. Определяется площадь графика  $A_{\text{max}}$  над линией  $v_{\text{фон}}$ .
4. Значение  $A_{\text{max}}$  делится на значение ширины  $B_1$ , в результате чего получается значение  $\Delta v$  – высоты прямоугольника с площадью  $A_{\text{ср}}$ , равной площади  $A_{\text{max}}$ .

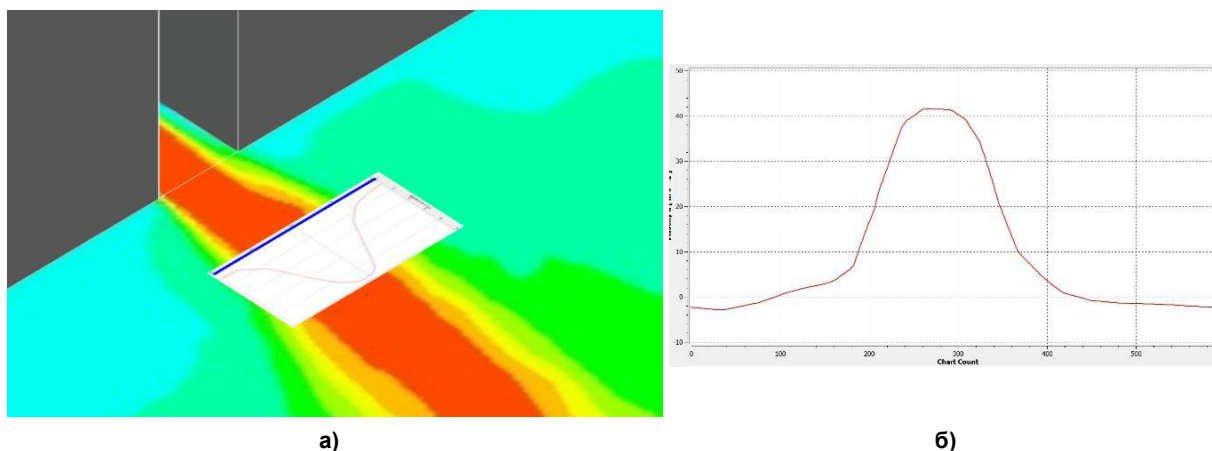


Рис. 3. Графическое представление результатов расчета: а) схема получения графика распределения скоростей ветра по ширине потока; б) пример графика распределения скоростей ветра по ширине трансформированного потока

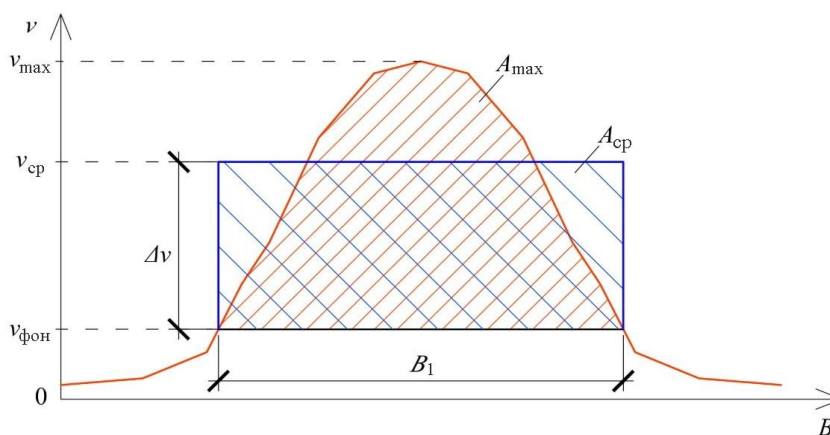


Рис. 4. Схема определения осредненной скорости ветра по ширине потока

5. К значению  $v_{фон}$  прибавляется значение  $\Delta v$ , таким образом получается значение осредненной скорости  $v_{cp}$ .

Формула для вычисления осредненной скорости ветра по потоку выглядит следующим образом:

$$v_{cp} = v_{фон} + \frac{A_{max}}{B_1}. \quad (7)$$

Полученные значения средних скоростей трансформированного потока заносятся в таблицы. Пример такой таблицы приведен в табл. 1.

Также в таблицы заносятся значения эффективной ширины трансформированного воздушного потока  $B_1$  при различных значениях ширины разрыва  $S$  и  $d_w$ . Пример приведен в табл. 2.

Таким образом, получены результаты первого этапа исследований. Дальнейший их анализ позволит получить более явную зависимость изменений скорости ветра от параметров  $S$  и  $d_w$ .

### 3. Анализ результатов численных экспериментов I этапа исследования

Прежде чем преобразовывать полученные значения скоростей в давления, необходимо провести анализ полученных результатов. В первую очередь нужно проверить характер распределения по высоте. Так как функция распределения фоновой скорости ветра по высоте сохраняет постоянный рост с высотой (т. е. возрастает равномерно), а геометрические параметры зданий одинаковы по всей высоте, то предварительно можно сделать

Таблица 1  
Значения осредненных и максимальных по ширине потока значений скорости ветра при ширине разрыва  $S = 20$  м

$z_e$ , м	Значения $v_{cp}$ и $v_{max}$ при различных значениях $d_w$										$v_0$ , м/с
	$d_w = 20$ м		$d_w = 30$ м		$d_w = 40$ м		$d_w = 50$ м		$d_w = 60$ м		
	$v_{cp}$ , м/с	$v_{max}$ , м/с	$v_{cp}$ , м/с	$v_{max}$ , м/с	$v_{cp}$ , м/с	$v_{max}$ , м/с	$v_{cp}$ , м/с	$v_{max}$ , м/с	$v_{cp}$ , м/с	$v_{max}$ , м/с	
5	30,7	39,7	29,0	40,0	28,8	37,8	27,9	36,6	27,5	37,2	14,04
10	35,4	42,0	35,2	42,8	33,7	42,3	32,6	40,2	32,1	39,4	16,7
20	36,3	40,5	36,0	42,3	35,4	42,4	34,9	42,0	33,8	41,7	19,86
40	37,3	41,4	37,0	42,7	36,0	42,7	34,8	41,6	34,4	41,0	23,62
60	37,5	41,6	37,2	42,2	36,9	42,8	36,1	42,2	35,1	40,4	26,14
80	38,2	42,1	38,0	42,6	37,8	42,9	35,9	39,9	34,8	38,1	28,09
100	39,3	42,7	38,7	42,7	38,0	42,3	36,3	41,4	35,6	39,3	29,7
150	41,4	44,4	40,0	43,6	38,8	42,9	36,4	41,3	36,6	40,2	32,87

Таблица 2  
Значения эффективной ширины трансформированного воздушного потока  $B_1$  при ширине разрыва  $S = 20$  м

$z_e$ , м	Значения эффективной ширины потока $B_1$ при различных значениях $d_w$				
	$d_w = 20$ м	$d_w = 30$ м	$d_w = 40$ м	$d_w = 50$ м	$d_w = 60$ м
5	16,63	20,48	26,33	32,61	37,57
10	18,25	20,91	24,38	28,11	30,76
20	16,57	17,86	20,34	22,39	24,05
40	13,61	14,01	14,87	15,88	16,97
60	12,13	11,89	12,33	13,0	13,84
80	11,11	10,93	10,66	11,5	11,46
100	10,81	10,53	9,8	9,74	10,0
150	10,18	9,31	8,2	6,73	6,46

вывод о том, что функция распределения по высоте скоростей трансформированного воздушного потока должна обладать тем же свойством.

Для проверки этого условия необходимо построить графики распределения полученных значений скоростей по высоте. Для этого используется программа Microsoft Office Excel.

В качестве примера на рис. 5 представлен график значений скоростей ветра при ширине разрыва  $S = 10$  м для различных  $d_w$ .

Как видно из рис. 5, характер распределения скоростей по высоте растущий, но неравномерно, а значения скоростей ветра по мере отдаления от разрыва снижаются. Кроме того, интенсивность возрастания снизилась по сравнению с фоновым ветром. Это связано со значительным увеличением скорости ветра вблизи поверхности земли.

Так как свойство равномерного роста значений скорости с высотой не наблюдается, хотя и должно иметь место, можно сделать вывод о том, что неравномерный характер распределения – результат существующей погрешности измерений. Для дальнейших изысканий необходимо привести

полученные результаты к идеальной картине распределения. Для этого средствами Excel выделяются линии тренда для каждого графика, представляющие собой график аппроксимированной функции по значениям графика скоростей. На рис. 6 представлен пример графика с построенной логарифмической линией тренда и аппроксимированной функцией.

Функция линии тренда, представленная на графике, зависит от « $x$ », принимающего значения от 1 до 8 (количество характерных высот  $z_e$ ).

На рис. 7 представлены графики распределения скоростей ветра по высоте (ширина разрыва  $S = 20$  м), приведенные к идеальной картине при помощи линий тренда.

Также необходимо исследовать зависимость значений скорости от расстояния  $d_w$ , для чего средствами Excel строятся графики по значениям  $v_{cp}$  при различных  $d_w$ . Пример такого графика для высоты представлен на рис. 8.

Как видно из рис. 8, распределение значений средних скоростей трансформированного воздушного потока в зависимости от расстояния  $d_w$  близко к линейному. Подобная картина наблюдается

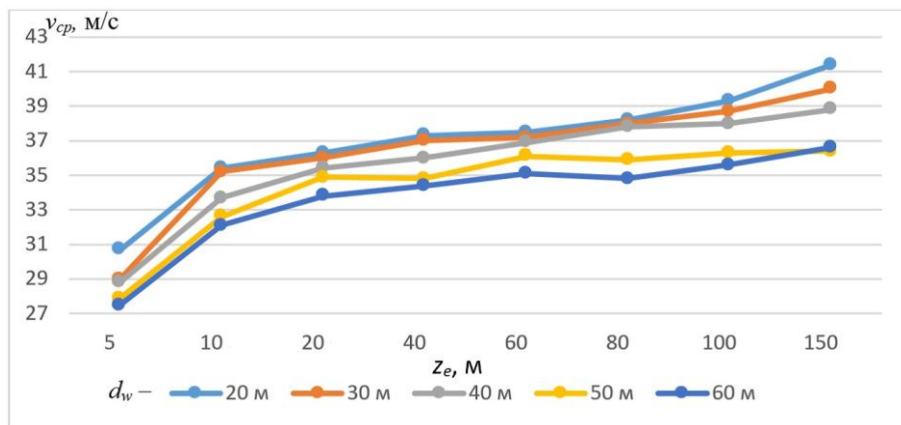


Рис. 5. График значений скоростей ветра при ширине разрыва  $S = 10$  м для различных  $d_w$

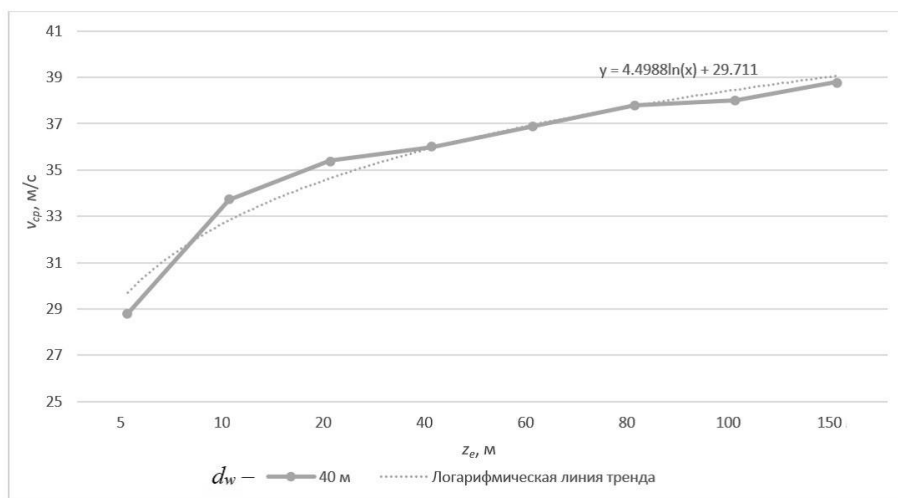


Рис. 6. График значений скоростей ветра при ширине разрыва  $S = 10$  м и  $d_w = 40$  м с построенной линией тренда

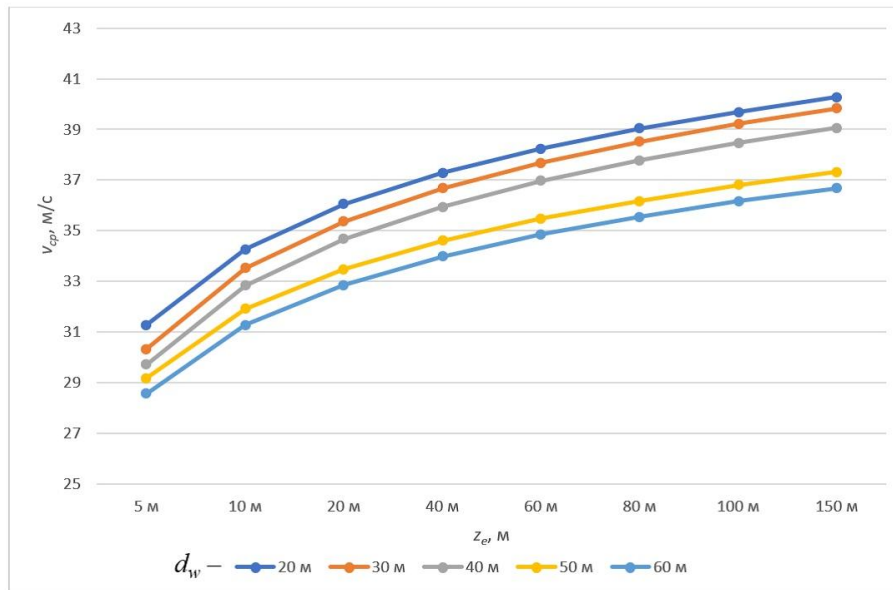


Рис. 7. Графики аппроксимированной функции распределения значений скоростей ветра по высоте при ширине разрыва  $S = 20$  м для различных  $d_w$

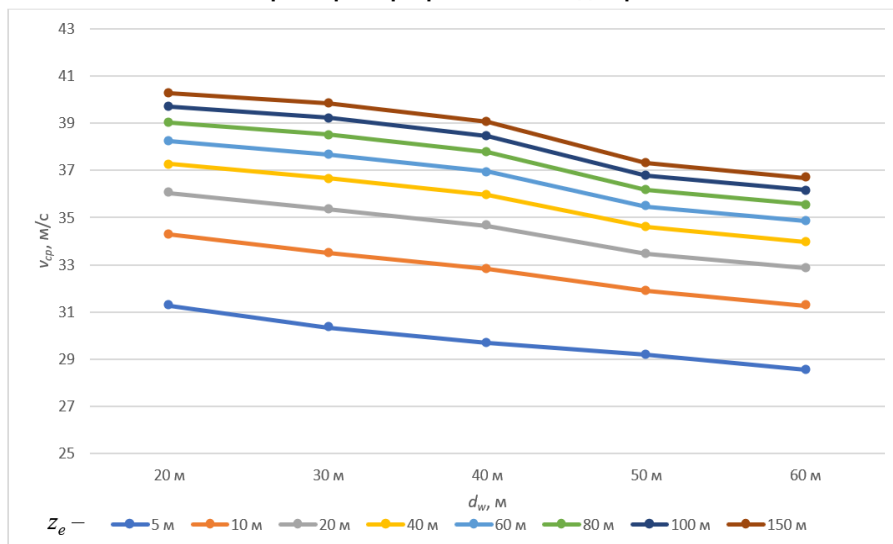


Рис. 8. Графики распределения значений скоростей ветра на различных высотах в зависимости от расстояния  $d_w$  при ширине разрыва  $S = 20$  м

при всех  $S$ . Наблюдаемые отклонения в достаточной степени не влияют на общую картину распределения. Таким образом, можно сделать вывод о линейном уменьшении скорости с увеличением расстояния  $d_w$ .

Для приведения полученной картины распределения необходимо воспользоваться линией тренда, только в данном случае линейным преобразованием. Пример такого графика для разрыва шириной  $S = 20$  м приведен на рис. 9.

При этом характер распределения скоростей по высоте остается неизменным и представляет собой логарифмический профиль (рис. 10).

Полученные значения скоростей заносятся в таблицы. Пример приведен в табл. 3. Для наглядности ячейки в таблицах выделены цветом

в соответствии с величиной скорости – красным цветом выделены максимальные значения, зеленым – минимальные.

Для проверки достоверности аппроксимации значений необходимо вычислить среднюю ошибку аппроксимации по каждой таблице, которая вычисляется по формуле:

$$\bar{A} = \frac{\sum |v_{cp,i} - v_{cp,appр,i}|}{n} \times 100\% \quad (8)$$

где  $v_{cp,i}$  – значение средней скорости, полученное по результатам эксперимента;  $v_{cp,appр,i}$  – значение средней скорости, рассчитанное по аппроксимированному уравнению;  $n = 5$  – количество рассматриваемых значений в строке (по количеству  $d_w$ ).

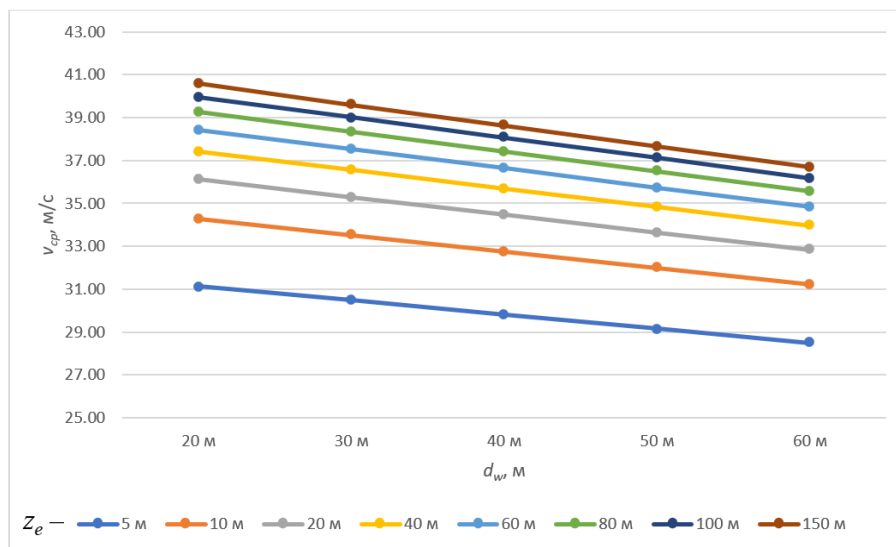


Рис. 9. Графики распределения значений скоростей ветра на различных высотах в зависимости от расстояния  $d_w$  при ширине разрыва  $S = 20$  м, приведенного к линейной зависимости

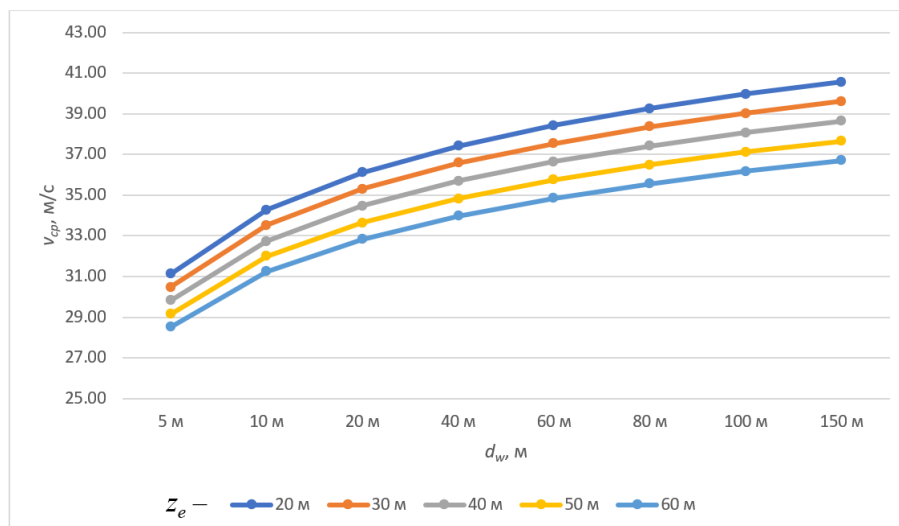


Рис. 10. Графики распределения значений скоростей ветра в зависимости от высоты для различных  $d_w$  при ширине разрыва  $S = 20$  м

Полученные значения средних ошибок аппроксимаций по каждому графику занесены в табл. 4.

Значение средней ошибки аппроксимации менее 15% свидетельствует о качественном подборе уравнения тренда. Как видно из табл. 4, максимальное значение средней ошибки составляет 11,65%, что удовлетворяет условию достоверности подбора.

Таким же образом необходимо аппроксимировать значения эффективной ширины потока. Пример приведен в табл. 5.

Цветовое условное форматирование ячеек таблиц наглядно отражает неравномерное распределение значений эффективной ширины потока  $B_1$ . Внизу, с увеличением расстояния  $d_w$  ширина потока возрастает, а наверху снижается. При этом

можно сказать, что в средней части поток примерно равен по ширине на всем пути. Этот эффект возникает из-за неравномерности распределения скоростей по высоте.

Давления от трансформированного воздушного потока действуют только по эффективной ширине потока  $B_1$ . При этом на фасад действует также нормативное ветровое давление  $w_0$ , поскольку расчет осредненных по ширине потока значений скорости ветра производился с учетом величины скорости набегающего потока за пределами эффективной ширины потока  $B_1$ . Это иллюстрирует приведенная на рис. 11 схема ветрового воздействия от трансформированного воздушного потока.

Как видно из рис. 12, при  $b > B_1$  полное ветровое давление на здание  $w_{m, sum}$  (выделено фиолетово-

# Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов

Таблица 3

Значения осредненных по ширине скоростей трансформированного воздушного потока на различных высотах в зависимости от расстояния  $d_w$  при ширине разрыва  $S = 20$  м

$z_e, \text{ м}$	Значения $v_{cp}$ при различных значениях $d_w$					$v_0, \text{ м/с}$
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м	
5 м	31,13	30,47	29,81	29,16	28,50	14,04
10 м	34,28	33,52	32,75	31,99	31,23	16,7
20 м	36,12	35,30	34,47	33,65	32,83	19,86
40 м	37,43	36,56	35,69	34,83	33,96	23,62
60 м	38,44	37,54	36,64	35,74	34,84	26,14
80 м	39,27	38,34	37,41	36,48	35,56	28,09
100 м	39,97	39,02	38,07	37,12	36,16	29,7
150 м	40,57	39,60	38,63	37,66	36,69	32,87

Таблица 4

Значения средних ошибок аппроксимации

$z_e, \text{ м}$	Значения средних ошибок аппроксимаций, %					
	$S = 10$ м	$S = 20$ м	$S = 30$ м	$S = 40$ м	$S = 50$ м	$S = 60$ м
5 м	3,24	3,49	2,00	7,26	2,01	11,65
10 м	3,52	3,18	3,10	1,11	0,67	8,74
20 м	1,82	2,37	2,68	6,01	3,05	6,29
40 м	0,65	0,75	2,29	4,88	1,34	2,46
60 м	0,71	1,16	1,51	1,63	2,33	1,22
80 м	0,99	1,67	3,19	1,07	3,16	0,49
100 м	2,95	1,28	3,90	2,23	2,20	1,24
150 м	4,58	1,41	5,49	4,15	1,19	5,50

Таблица 5

Аппроксимированные значения эффективной ширины потока  $B_1$  на различных высотах в зависимости от расстояния  $d_w$  при ширине разрыва  $S = 20$  м

$z_e, \text{ м}$	Значения $B_1$ при различных значениях $d_w$				
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м
5 м	13,28	17,47	21,67	25,86	30,06
10 м	10,59	12,89	15,20	17,50	19,81
20 м	9,01	10,21	11,41	12,61	13,82
40 м	7,90	8,31	8,73	9,15	9,56
60 м	7,03	6,84	6,65	6,45	6,26
80 м	6,32	5,63	4,94	4,26	3,57
100 м	5,73	4,62	3,51	2,40	1,29
150 м	5,04	3,73	2,43	1,12	0,00

вым) определяется как сумма нормативного ветрового давления  $w_m$  (выделено синим) и ветрового давления от трансформированного воздушного потока  $w_{m,tr}$  (выделено красным) шириной  $B_1$  с учетом аэродинамического коэффициента  $c = 0,8$ . Предварительно формула для вычисления  $w_{m,sum}$  на конкретной высоте  $z_e$  выглядит следующим образом:

$$w_{m,sum}(z_e) = \frac{w_m(z_e) \times b + (w_{m,tr}(z_e) - w_m(z_e)) \times B_1}{b}, \quad (9)$$

или более развернуто:

$$w_{m,sum} = \frac{w_0 \times k(z_e) \times c \times b + ((v_{tr}(z_e))^2 \times 0,43 - w_0 \times k(z_e)) \times c \times B_1}{b}. \quad (10)$$

Все значения, необходимые для расчета по формуле (10), определяются по таблицам с результатами исследований и по табл. 11.2 СП 20.13330.2016. При этом  $v_{tr}$  равно  $v_{cp}$ .

При  $b \leq B_1$  не учитывается нормативное ветровое давление  $w_0$ , рассчитанное по СП. Формула выглядит следующим образом:

$$w_{m,sum} = (v_{tr}(z_e))^2 \times 0,43 \times c. \quad (11)$$



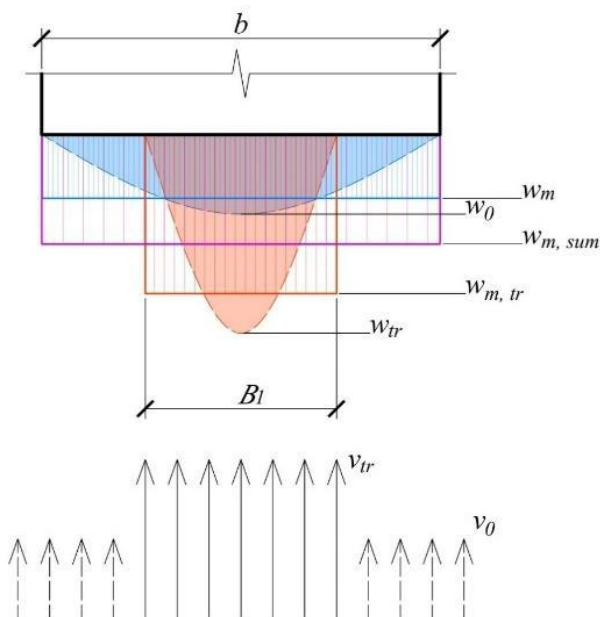


Рис. 11. Схема полного ветрового воздействия на здание от трансформированного воздушного потока

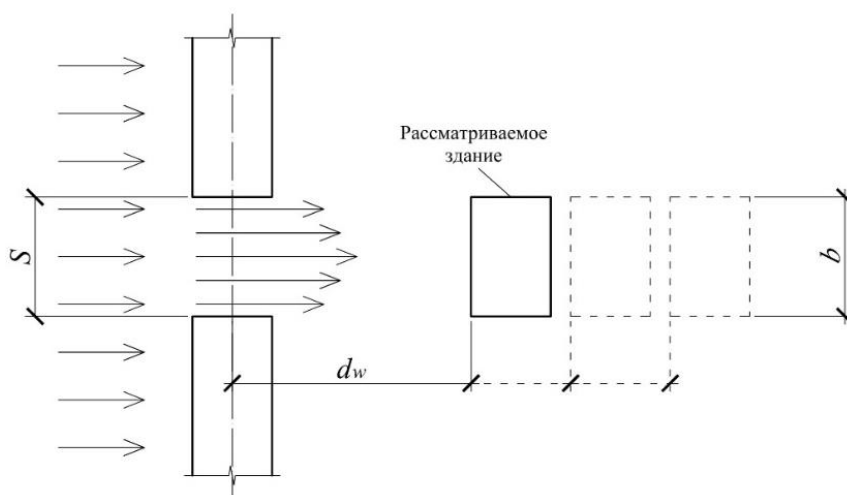


Рис. 12. Схема расчетной ситуации

#### 4. Проведение численных экспериментов

##### II этап исследования

Этот этап исследования нужен для того, чтобы выявить некоторые закономерности, связанные с расположением здания относительно разрыва, и связь между такими параметрами, как ширина разрыва  $S$  и ширина здания  $b$ . Также необходимо исследовать характер распределения скоростей трансформированного воздушного потока в зависимости от расстояния от разрыва до здания  $d_w$ . Для этого проводится серия экспериментов численного моделирования с теми же входными параметрами, что и в экспериментах I этапа, но в модели присутствует само рассматриваемое здание.

В первую очередь необходимо провести серию экспериментов при одинаковых значениях

ширины разрыва  $S$  и ширины здания  $b$  при различных значениях расстояния  $d_w$  (рис. 12).

По результатам серии экспериментов был сделан вывод о том, что на расстоянии  $d_w = 60$  м при  $S = b$ , где  $S \leq 30$  м, трансформированный воздушный поток начинает отклоняться в сторону (рис. 13), вследствие чего ветровое давление на фасад рассматриваемого здания значительно снижается. В этом случае методика неприменима и можно рассчитывать ветровое давление по СП. Таким образом, максимальное расстояние  $d_w$ , при котором наблюдается увеличение ветрового давления, составляет 50 м.

На рис. 14 представлена картина распределения трансформированного воздушного потока, прошедшего через разрыв шириной  $S = 60$  м, при ширине рассматриваемого здания  $b = 20$  м.

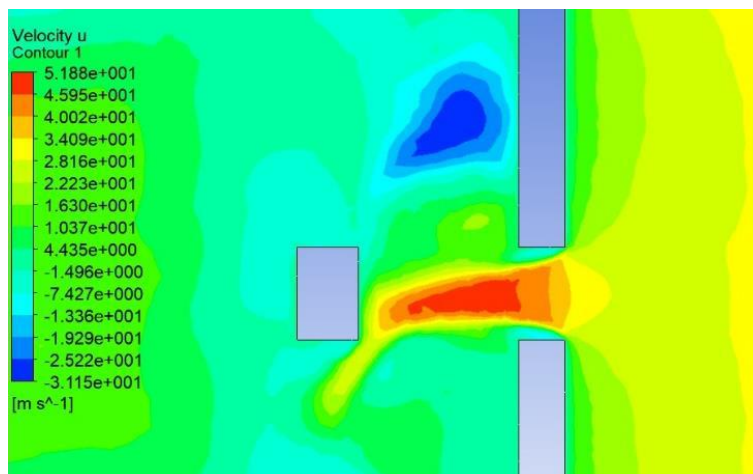


Рис. 13. Изополя скоростей трансформированного воздушного потока, прошедшего через разрыв шириной  $S = 30$  м, при ширине рассматриваемого здания  $b = 20$  м на расстоянии  $d_w = 60$  м

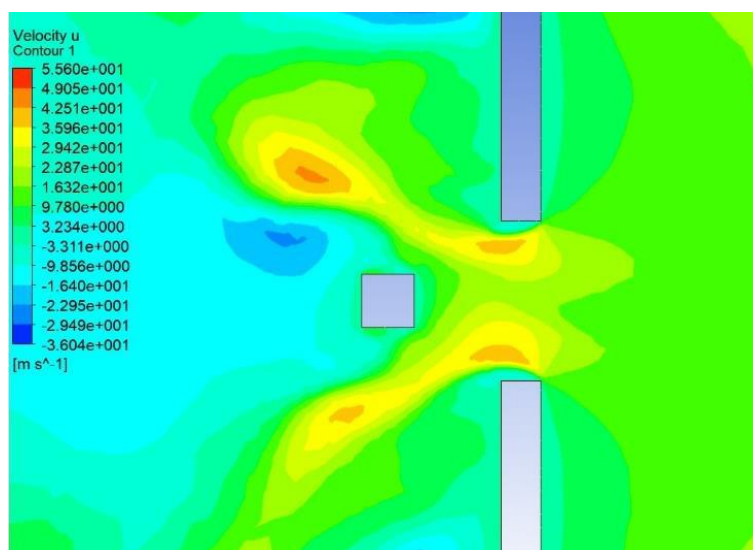


Рис. 14. Изополя скоростей трансформированного воздушного потока, прошедшего через разрыв шириной  $S = 60$  м, при ширине рассматриваемого здания  $b = 20$  м на высоте  $z_e = 40$  м

По результатам эксперимента сделан вывод о границах применимости методики: при  $S \geq 3b$ , где  $S \leq 50$  м – ветровое давление от трансформированного воздушного потока не учитывается, так как ветровой поток свободно обходит здание, не оказывая существенного влияния. В этом случае ветровое давление рассчитывается по СП. Во всех остальных случаях методика применима.

Учет особенностей распределения давлений по поверхности здания производится таким же образом, как и в общем случае, – при помощи системы аэродинамических коэффициентов, приведенной в СП.

## 5. Сравнение результатов расчета ветровых нагрузок

Для сравнения результатов построим вертикальные профили ветрового давления, действующего

на здание высотой 150 м, рассчитанные по СП и по разработанной методике.

Исходные данные:  $S = 20$  м,  $b = 30$  м,  $d_w = 30$  м.

Результаты расчета внесены в табл. 6.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что профили ветрового давления, рассчитанного по СП и по разработанной методике учета локальных увеличений скорости, приближаются друг к другу с высотой. Это связано с уменьшением с высотой значений эффективной ширины потока  $B_1$ . Внизу здания давление с учетом трансформации воздушного потока превышает рассчитанное по СП более чем в 2 раза.

Очевидно, что влияние исследуемого эффекта значительно, однако для более высоких зданий оно может быть перекрыто коэффициентом надежности по нагрузке. При этом влияние, оказы-

Таблица 6

Сравнение результатов расчета ветрового давления с учетом локальных увеличений скорости и по СП

$z_e, \text{ м}$	$v_{tr}, \text{ м/с}$	$B_1, \text{ м}$	$w_m, \text{ Па}$	$w_{m, sum}, \text{ Па}$	$w_{m, sum} / w_m$
5	27,55	23,55	96	225,6	2,35
10	30,23	18,94	96	233,9	2,44
20	31,79	16,24	132	248,7	1,88
40	32,9	14,33	192	278,1	1,45
60	33,76	12,85	240	305,1	1,27
80	34,47	11,63	276	327,5	1,19
100	35,06	10,61	300	343,4	1,14
150	35,58	9,72	372	392,6	1,06

ваемое на здания средней этажности (15–50 м), является более опасным.

### Заключение

Основной вывод, полученный по результатам исследований, заключается в том, что локальные увеличения скорости ветра оказались настолько значительными, что трансформированный воздушный поток в некоторых случаях оказывает на рассматриваемое здание давление, в несколько раз превышающее нормативное, рассчитанное по СП.

Полученные давления действуют только в пределах соответствующих значений эффективной ширины потока  $B_1$ . Очевидно, что с высотой эти значения снижаются, а значит эффект, оказываемый на здание, также снижается. То есть значения скоростей трансформированного воздушного потока приближаются к фоновым. Таким образом, результирующее нормативное давление на здание в значительной степени зависит от значений  $B_1$ , а значит, и от  $S$ .

Исследования качественной картины распределения трансформированного воздушного потока (II этап исследований) позволили определить границы применимости разработанной методики. В рамках этого исследования был сделан вывод о том, что на расстоянии  $d_w = 60$  м трансформированный поток теряет часть скорости и не оказывает на здание значительного эффекта. Также при большом отношении ширины разрыва  $S$  к ширине рассматриваемого здания  $b$  (3 и более) влияние трансформированного потока значительно снижается и методика в этом случае не применима. То же происходит при ширине разрыва более 60 м – разрыв не оказывает значительного влияния на воздушный поток.

Сравнение результатов расчета ветровых давлений с учетом методики и без ее учета показало значительное увеличение ветрового давления при локальных увеличениях скорости ветра. В нижней части здания давление, рассчитанное по методике, более чем в 2 раза превышает давление, рассчитанное по СП.

### Литература

1. Дубинский, С.И. Расчеты высотных сооружений при ветровом воздействии / С.И. Дубинский // САПР и графика. – 2005. – № 10.
2. Белостоцкий, А.М. Сравнительный анализ программных комплексов при экспертизе состояния системы «ребристая оболочка – колонна со связями» / А.М. Белостоцкий, С.И. Дубинский, И.Ж. Мсхалая // Труды XXI международной конференции «Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов». «ВЕМ&FEM-2005». – СПб., 2006.
3. Серебровский, Ф.Л. Аэрация жилой застройки / Ф.Л. Серебровский. – М.: Стройиздат, 1971. – 112 с.
4. Оленьков, В.Д. Аэрационный режим города и его учет в градостроительном проектировании / В.Д. Оленьков, Д.С. Колбин // Строительство и образование. – Екатеринбург, 2011. – С. 71–74.
5. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Ляценок, В.А. Пашинский и др. – М.: ИАСВ, 2007.
6. Горохов, Е.В. Воздействие ветра на высотные здания и их комплексы / Е.В. Горохов, С.Г. Кузнецов, В.Н. Васильев // Сборник научных трудов. – М.: МГСУ, 2008.
7. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р.Сканлан; пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецовою; под ред. Б.Е. Маслова. – М.: Стройиздат, 1984.
8. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*/ Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2016.
9. Eurocode 1: Basis design and action on structures. Part 2-4: "Wind action". ENV 1991-2-4. – CEN, 1994.
10. Дубинский, С.И. Программный комплекс ANSYS LS-DYNA 8.0 / С.И. Дубинский // САПР и графика. – 2004. – № 3.
11. Дубинский, С.И. ANSYS и ANSYS/CivilFEM в строительстве / С.И. Дубинский // САПР и графика. – 2004. – № 12.
12. Поддаева, О.И. Архитектурно-строительная аэродинамика: учебное пособие / О.И. Поддаева, А.С. Кубенин, П.С. Чурин. – 2-е изд. – М.: МГСУ, 2017. – 88 с.

**Оленьков Валентин Данилович**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Градостроительство, инженерные сети и системы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), olenkovvd@susu.ru, centernasledie@mail.ru

**Тазеев Наиль Тимурович**, аспирант кафедры «Строительное производство и теория сооружений», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), tazeev.nail@gmail.com

Поступила в редакцию 11 сентября 2019 г.

DOI: 10.14529/build190401

## CALCULATION OF WIND LOADS TAKING INTO ACCOUNT LOCAL CHANGES IN WIND SPEED IN URBAN DEVELOPMENT AREA

**V.D. Olenkov**, olenkovvd@susu.ru, centernasledie@mail.ru

**N.T. Tazeev**, tazeev.nail@gmail.com

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The object of research is the wind regime of urban development area as a factor that must be taken into account when calculating the wind load. In the process of research, a number of experiments on numerical simulation of the airflow around buildings have been carried out in Ansys Fluent software application. In order to obtain reliable data about the quantitative and qualitative patterns of airflow distribution throughout the urban development area, the research was carried out in two stages.

Data on the speed values and the nature of airflow distribution throughout the urban development area have been obtained; general methodology for taking into account the local increases in wind speed when calculating the wind load on a building has been developed. A calculation formula to determine wind loads out of a transformed air flow has been determined. Within the framework of the developed research methodology, the most important parameter for consideration of local changes in speed has been determined: it is the effective flow width which allows taking into account the geometric parameters of urban development area.

The obtained results indicate a high level of influence of the transformed air flow on a building.

*Keywords:* airflow transformation, wind loads, effective flow width, logarithmic wind profile, numerical simulation, Ansys Fluent.

### References

1. Dubinskiy S.I. [Calculation of High-Rise Structures with Wind Exposure]. SAPR i grafika, 2005, no. 10, pp. 32–34. (in Russ.)
2. Belostotskiy A.M., Dubinskiy S.I., Mskhalaya I.Zh. [Comparative Analysis of Software Systems in the Examination of the State of the System “Ribbed Shell-Column with Connections”]. *Trudy XXI mezhdunarodnoy konferentsii “Matematicheskoye modelirovaniye v mekhanike sploshnykh sred na osnove metodov granichnykh i konechnykh elementov” – “BEM&FEM – 2005”* [Proceedings of the XXI International Conference “Mathematical Modeling in Continuum Mechanics Based on Boundary and Finite Element Methods” – “BEM & FEM–2005”]. St. Petersburg, 2006, pp. 93–101. (in Russ.)
3. Serebrovskiy F.L. *Aeratsiya zhiloy zastroyki* [Residential Aeration]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971. 112 p.
4. Olen'kov V.D., Kolbin D.S. [Aeration Regime of the City and its Accounting in Urban Planning]. *Stroitel'stvo i obrazovaniye* [Construction and Education]. Ekaterinburg, 2011, pp. 71–74. (in Russ.)
5. Gordeyev V.N., Lantukh-Lyashchenko A.I., Pashinskiy V.A., Perel'muter A.V., Pichugin S.F. *Nagruzki i vozdeystviya na zdaniya i sooruzheniya* [Loads and Impacts on Buildings and Structures]. Moscow, IASV Publ., 2007. 481 p.
6. Gorokhov E.V., Kuznetsov S.G., Vasylev V.N. [The Effect of Wind on High-Rise Buildings and their Complexes]. *Sbornik nauchnykh trudov* [Collection of Scientific Papers]. Moscow, MGSU Publ., 2008, pp. 86–90. (in Russ.)
7. Simiu E., Skanlan R. *Vozdeystviye vetra na zdaniya i sooruzheniya* [The Impact of Wind on Buildings and Structures]. Moscow, Stroyizdat publ., 1984.

8. SP 20.13330.2016 *Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.01.07-85\** [Load and Impact. Updated Edition of SNIp 2.01.07-85 \*]. Moscow, GUP TSPP Publ., 2016.
9. [Eurocode 1: Basis design and action on structures. Part 2-4: "Wind action"]. [ENV 1991 – 2 – 4]. CEN, 1994.
10. Dubinskiy S.I. *Programmnyy kompleks ANSYS LS-DYNA 8.0*. [Software Package ANSYS LS-DYNA 8.0.]. *SAPR i grafika* [SAPR and Graphics], 2004, no. 3, pp. 34–38. (in Russ.)
11. Dubinskiy S.I. *ANSYS i ANSYS/CivilFEM v stroitel'stve* [ANSYS and ANSYS / CivilFEM in Construction]. *SAPR i grafika* [SAPR and Graphics]. 2004, no. 12, pp. 75–77. (in Russ.)
12. Poddayeva O.I., Kubenin A.S., Churin P.S. *Arkhitekturno-stroitel'naya aerodinamika: uchebnoye posobie* [Architectural and Construction Aerodynamics: Tutorial]. Moscow, MGSU Publ., 2017. 88 p.

Received 11 September 2019

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Оленьков, В.Д. Расчет ветровых нагрузок с учетом локальных изменений скорости ветра в застройке / В.Д. Оленьков, Н.Т. Тазеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 5–17. DOI: 10.14529/build190401

**FOR CITATION**

Olenkov V.D., Tazeev N.T. Calculation of Wind Loads Taking into Account Local Changes in Wind Speed In Urban Development Area. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2019, vol. 19, no. 4, pp. 5–17. (in Russ.). DOI: 10.14529/build190401

---