

Ветровое воздействие на струи воздушных завес в проемах самолетных ангаров

Ю. Н. Марр, советник генерального директора АО «НПО «Тепломаш»

При защите проемов завесами воздействие ветра принято учитывать, как добавку ветрового давления к гравитационной разности [1]. При этом расчетная скорость ветра, независимо от средних скоростей по [2], принимается не более 5 м/с. Для помещений герметичного типа (в частности, самолетных ангаров) ветровая добавка не учитывается, поскольку, в отличие от гравитационной разности (массовая сила), ветровое давление (поверхностная сила) лишь изменяет внутреннее давление в здании. Физически это изменение происходит добавлением массы воздуха через защищенный проем в замкнутое пространство ангара (повышение давления до наружного) или уходом массы (понижение давления). Принятая в [1] методика была разработана в начале прошлого столетия для небольших по нынешним меркам размеров ворот в сравнении с размерами самого здания, когда неравномерностью ветрового потока в масштабах проема можно было пренебречь, а вся внешняя аэродинамика достаточно точно учитывалась аэродинамическими коэффициентами [3]. Ограничения расчетной скорости ветра были связаны с относительно небольшой высотой середины ворот (2–4 м).

Потребность в струйной защите проемов самолетных ангаров поставила новые задачи в плане аэродинамического взаимодействия ветра со струями завес. Во-первых, большая высота проемов (до 20 м) требует пересмотра расчетной скорости ветра в сторону ее увеличения как минимум до значений по [2] без ограничений. Во-вторых, принимая во внимание значительную высоту и протяженность проема самолетного ангара (до 60 м), приходится учитывать возможность критической деформации струйной преграды при неравномерном распределении давления ветра по площади проема от трехмерной картины обтекания здания воздушными массами.

В-третьих, на передний план при проектировании авиационных ангаров выходит преимущественное направление ветра в данной местности. Если ветер направлен «в лоб», т. е. прямо на стену с воротами, это будет одна картина обтекания и воздействия на защитную структуру. Если ветер направлен с противоположной стороны, то воздействие будет совершенно иным. Ветер может быть направлен параллельно и под некоторым углом к плоскости передней стены (проема). Тогда, в отличие от первых двух случаев, появятся касательные воздействия вдоль размаха проема. Есть основания считать, что при переходе к масштабам проема, сравнимым с масштабами здания, внешняя аэродинамика не может быть вполне учтена только аэродинамическими коэффициентами.

В-четвертых, оказывается необходимым дать оценку возмущениям, вносимым атмосферной турбулентностью, в частности, крупномасштабными вихревыми образованиями порядка размеров ангара. Такие вихри могут создавать порывы ветра со скоростями, превосходящими средние значения по [2]. Временной масштаб подобных возмущений может быть сравним с длительностью периода полностью открытых ворот (например, около 20 минут).

И, наконец, во весь рост встает проблема регулирования завесы при изменении наружной температуры. В [4] было предложено понижать частоту вращения вентиляторов для уменьшения расхода воздуха завесы при повышении наружной температуры против расчетной зимней. В предположении отсутствия влияния ветра на разность давлений в проеме герметичного помещения было показано, что для сохранения надежной защиты может потребоваться уменьшение расхода до двух раз. Это означает, что и скорость струи также уменьшится в два раза. Соответственно, поток импульса струи уменьшится в четыре раза. Однако ветровые характеристики при повышении температуры могут остаться на том же уровне. Возникает вопрос, не окажется ли намеренно ослабленная струйная защита проема при повышенной наружной температуре недостаточной для защиты проема.

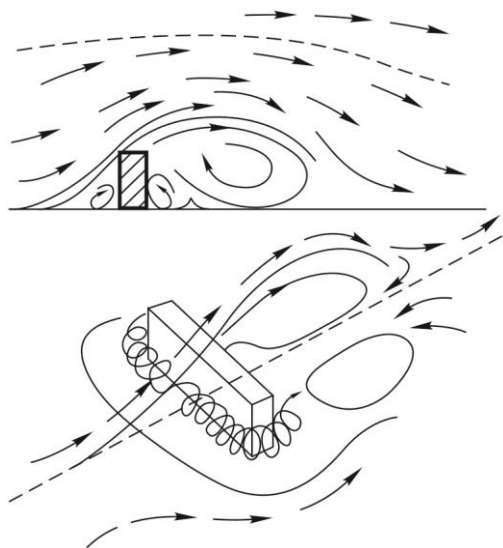


Рис.1 Схема зоны аэродинамического следа при обтекании здания ветром [5]

В [3, 5–7] детально рассмотрены вопросы аэродинамики обтекания зданий ветром. Общая картина аэродинамического следа от одиночного здания в виде параллелепипеда на плоскости [5] воспроизведена на рис. 1 и 2. Около трехмерного плохо обтекаемого препятствия как перед ним, так и позади него, а также с боков образуется сложная система взаимосвязанных вихревых циркуляционных зон (рис. 1). Линии тока набегающего потока начинают отклоняться от прямолинейного направления вверх на расстоянии примерно 5–8 высот здания. Из-за трения о землю на ее поверхности образуется пограничный слой, в котором непосредственно перед фасадом возникает отрыв потока от поверхности земли. Вдоль всего фасада формируется зона циркуляции, которая заворачивает на боковые стенки здания, отрывается и переходит в структуру донного следа. Основной поток огибает сверху зону циркуляции перед фасадом. Скорости вдоль уходящих вверх линий тока изменяются мало, но нормальная составляющая к фасаду препятствия уменьшается. В средней части фасада возникает торможение потока и, как следствие, возрастание статического давления. Вблизи верхней передней кромки фасада линии тока сближаются, локальная скорость возрастает и непосредственно от острой верхней кромки поток отрывается. В этой области наветренной стороны статическое давление понижается, причем его понижение зависит как от конфигурации обтекаемого тела, так и от шероховатости подстилающей поверхности. В области пограничного слоя давление также понижается. Для относительно «нормальной» шероховатости поверхности приближенно рассчитанное по данным [6, 7] распределение аэродинамических коэффициентов в средней вертикальной плоскости фасада при лобовом натекании ветра представлено на рис. 3. Видно, что в верхней и нижней частях наветренной стороны аэродинамические коэффициенты заметно снижаются по отношению к области максимума. Возле боковых вертикальных кромок фасада линии тока также сгущаются, скорость возрастает, давление понижается, но в меньшей степени, чем у верхней кромки. Применительно к защищенному струей проему полученная информация вносит следующие коррективы в картину защиты. Во-первых, воздействие на проем герметичного помещения неравномерно распределенного по поверхности проема ветрового давления приведет к установлению внутри помещения среднего по площади фасада давления с добавлением к гравитационной разности давлений в проеме разностей ветровой составляющей — локальной и средней. Проиллюстрируем это для следующих условий: высота ангара 20 м, высота ворот 16 м, наружная температура -40°C и -25°C , внутри $+18^{\circ}\text{C}$, скорость ветра по [2] принята равной 4 м/с и 8 м/с. Максимальное гравитационное давление на нулевой отметке равно 48,6 Па и 32,6 Па, средняя разность гравитационного давления в проеме, соответственно, 24,3 Па и 16,3 Па. Ветровые добавки к гравитационной разности давлений иллюстрирует табл. 1. Верхний створ проема соответствует относительной высоте сечения $\bar{H} = 16/20 = 0,8$, нулевая

отметка (пограничный слой ветрового потока) $\bar{H} \approx 0$. По [6] на отметке $\bar{H} = 0,8$ разность аэродинамических коэффициентов на рис. 3 составляет $\Delta k_{0,8} = k_{0,8} - k_{cp} = 0,86 - 0,74 = +0,12$, в пограничном слое $\Delta k_0 = 0,6 - 0,74 = -0,14$. По [7] эти же разности равны $\Delta k_{0,8} = 0,68 - 0,6 = +0,08$, $\Delta k_0 = 0,55 - 0,6 = -0,05$. В среднем для табл. 1 принято $\Delta k_{0,8} = +0,14$, $\Delta k_0 = -0,1$.

Таблица 1. Влияние неравномерности ветрового давления при лобовом натекании ветра на проем

Наружная температура	-40 °С				-25 °С			
	4		8		4		8	
Скорость ветра, м/с	4		8		4		8	
Динамическое давление ветра, Па	12,2		48,8		11,4		45,6	
Относительная высота сечения \bar{H}	0,8	≈ 0	0,8	≈ 0	0,8	≈ 0	0,8	≈ 0
Ветровая добавка к гравитац. разности давлений, Па	+1,7	-1,2	+6,8	-4,9	+1,6	-1,1	+6,4	-4,6
Доля добавки в средней гравитац. разности давлений, %	+7%	-5%	+28%	-20%	+10%	-7%	+40%	-27%

Из табл. 1 видно, что ветровые добавки к гравитационной разности даже при ветре 8 м/с преобразуют треугольную эпюру в трапецевидную без значительных отклонений от средней расчетной разности давлений. Таким образом, можно считать, что лобовое направление ветра не представляет опасности для защитной струйной структуры.

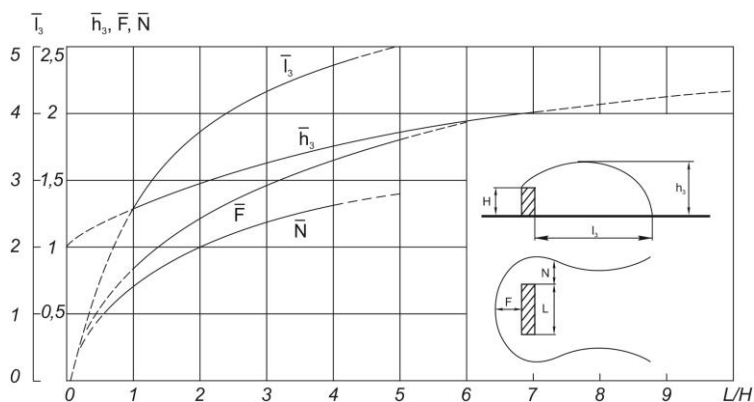


Рис.2 Зависимость размеров зоны аэродинамического следа от габаритных размеров здания [5] (на графике размеры даны в относительных величинах - по отношению к H)

На заветренной стороне здания образуется сложная трехмерная циркуляционная зона, состоящая из нескольких вихрей. Давление в ней заметно ниже, чем с наветренной стороны, а максимальная скорость обратных токов не более половины скорости набегающего потока. Подвижность воздуха вблизи земли на удалении от задней стенки здания очень мала. Давление ветра на заветренную сторону отрицательное (направлено из помещения на улицу) и по [3, 7] значительно более равномерное, чем на наветренной стороне. В этом случае давление в помещении просто понизится на величину отрицательного ветрового напора. Для случая направления ветра вдоль стены с проемом становится актуальным как по распределению нормальных сил вдоль размаха проема, так и по касательному взаимодействию ветрового потока со струями завесы. Распределение нормальных нагрузок на боковой стене из [8] приведено на рис. 4. В части касательных сил в [8] имеется лишь

упоминание, что для боковых стен зданий с выступающими лоджиями аэродинамический коэффициент трения $c_f = 0,1$.

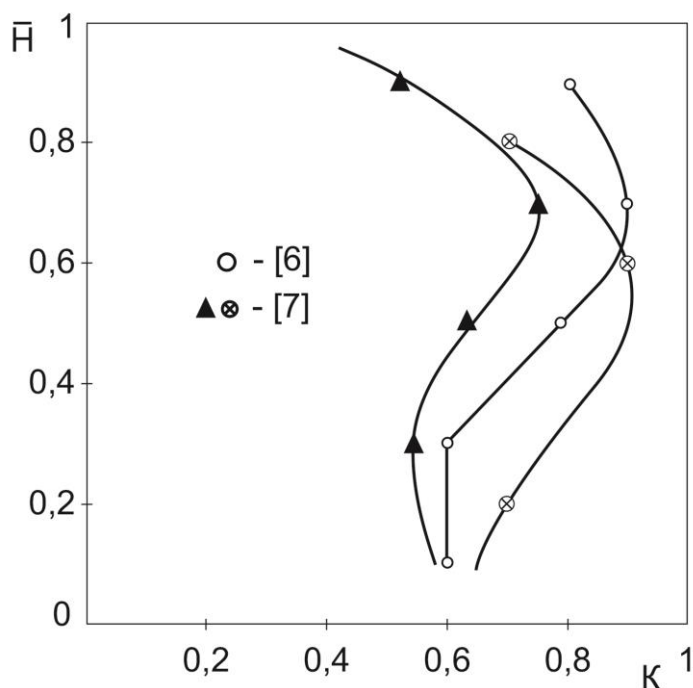


Рис.3. Распределение аэродинамических коэффициентов в средней части фасада при лобовом натекании ветра.

Что касается неравномерности распределения нормальной силы по размаху проема, то изменение ее величины относительно среднего ветрового давления $k_{cp} = -0,67$, согласно аэродинамическим коэффициентам рис. 4, составит по краям проема $\Delta P_A = (-1 + 0,67) \times 12,2 = -4,0$ Па и $\Delta P_C = (-0,5 + 0,67) \times 12,2 = +2,0$ Па для ветра 4 м/с, что можно считать безопасным на расчетном режиме. Однако для ветра 8 м/с добавки ветровых давлений к среднему превратятся в -16 Па и $+8$ Па, а это уже вызывает опасения. Отрицательная величина добавки на переднем краю проема уменьшит разность давлений по отношению к расчетной (гравитационной), и защитная струя из режима полной защиты перейдет в режим выноса струи на улицу. На противоположном краю проема положительная добавка увеличит разность давлений и вместо расчетного режима полной защиты возникнет затекание наружного воздуха внутрь помещения. Вытекание наружу и затекание внутрь быстро сбалансируются — сформируется устойчивое продувание помещения холодным воздухом. Касательные силы по [8] при ветре 4 м/с (-40 °С) равны $\tau = 12,2 \times 0,1 = 1,22$ Па, что составляет лишь 5% от средней разности гравитационного давления в проеме (24,3 Па). Однако при ветре 8 м/с касательное напряжение возрастает почти до 5 Па, и это уже 20% средней разности давлений. Однако величина коэффициента трения в данном случае значительно завышена из-за специфики структуры поверхности стены (лоджии), для которой коэффициент и определен. Касательное омывание ветровым потоком другого воздушного потока (струй завес) не должно приводить к появлению столь значительных сил трения. Когда в специальной литературе говорят об опасности ветра, который может «сдувать» фрагменты защитной структуры и создавать в ней прорехи, обычно имеют в виду псевдокасательные воздействия при обтекании поперечным ветровым потоком выступающих в него фрагментов струйной пелены.

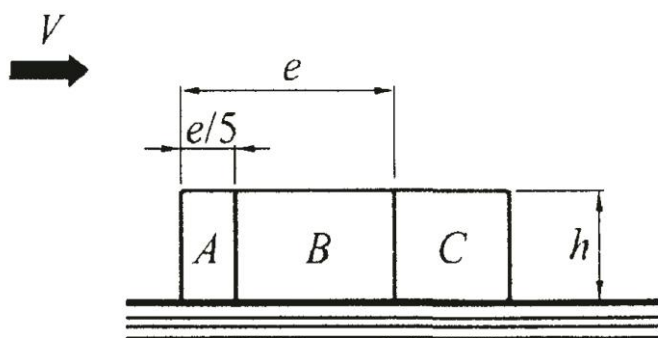


Рис.4 Схема распределения нормальных нагрузок на боковой стенке из [8]. Величина ее ровняется меньшему из b (ширина здания) или $2h$.

В общем случае, проем ангара будет ориентирован под некоторым углом по отношению к основному направлению ветра. Примерный вид обтекания представлен на рис. 5. Набегающий поток направлен под углом α к нормали к проему. При подходе к проему линии тока отклоняются на еще больший угол, огибают зону отрыва перед плоскостью стены с проемом и уходят вверх, отрываясь под углом от верхнего края ангара. Отрыв потока в угловой зоне фасада у проема представляет собой не просто вращающийся вихрь, а структуру со спиральными траекториями, направленными влево вдоль проема. У левого края ангара спиральная структура загибается и уходит в заднюю циркуляционную зону. Такая картина движения потоков может изменить распределение нормальных давлений на противоположное: у правого края сформируется область повышенного давления, тогда как у левого края давление понизится. Устойчивость защитной структуры, особенно при не очень низких температурах, но сильном ветре, снова может оказаться нарушенной.

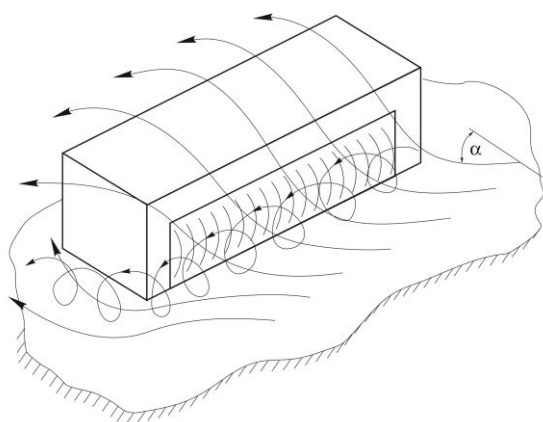


Рис.5 Обтекание ветром фасада по углом α

Рассмотрим воздействия атмосферной турбулентности. Можно выделить три характерных масштаба времени. Во-первых, масштаб существования защитной структуры, он равен продолжительности полностью открытых ворот и исчисляется десятками минут. Второй масштаб — это продолжительность формирования струи на длине от сопла до пола ангара, он характеризует быстроту восстановления защитной структуры после внесенного возмущения. При скорости струи на выходе из сопла около 15 м/с и высоте проема 15 м масштаб имеет порядок 1 с. Третий масштаб — это время воздействия крупного турбулентного образования. Оценим его как отношение высоты ангара к скорости ветра, т. е. около $20/5 = 4$ с. Поскольку два последних масштаба одного порядка и много меньше временного промежутка существования защитной структуры, можно не принимать во внимание такие относительно кратковременные турбулентные воздействия. Возмущения, связанные с отклонением направления и скорости ветра от наиболее вероятного,

продолжительность которых превосходит время полностью открытых ворот, следует рассматривать в контексте влияния произвольного направления ветра.

Последний из поставленных в работе вопросов ветрового воздействия относится к проблеме сохранения надежной защиты в процессе регулирования завесы при повышении наружной температуры. В [4] показано, что при организации защиты проема на расчетную температуру -30°C в диапазоне наружных температур до $+10^{\circ}\text{C}$ может потребоваться уменьшение расхода воздуха и скорости струи более чем в два раза.

В предположении равномерного и стационарного набегающего ветрового потока на стену с проемом можно не учитывать ветровой напор в разности давлений в проеме герметичного помещения. В этом случае повышение наружной температуры связано с требуемым понижением частоты вращения вентиляторов и соответствующим уменьшением расхода воздуха через завесу простой зависимостью [4]

$$n/n_0 = [(\theta - 1)/(\theta_0 - 1)]^{0,5}. \quad (1)$$

Здесь $\theta = T_v/T_n$ — отношение абсолютных температур, внутренней к наружной, индекс 0 относится к расчетным зимним параметрам.

Уменьшение потока импульса завесы с повышением наружной температуры равно

$$I/I_0 = (n/n_0)^2 = (\theta - 1)/(\theta_0 - 1). \quad (2)$$

В диапазоне от -30°C до $+10^{\circ}\text{C}$ это означает расчетное преднамеренное ослабление защитной структуры почти в 7 раз. Покажем на конкретном примере границы безопасного ослабления защиты при регулировании завес. Рассмотрим ангар с проемом высотой 17 м. Расчетная наружная температура -35°C , внутренняя $+18^{\circ}\text{C}$. Проем защищен верхней завесой с удельным расходом воздуха (на единицу длины по размаху проема) $82\,000\text{ м}^3/\text{час}/\text{м}$. Ширина сопла 1,3 м, скорость струи на выходе 16,3 м/с. Угол струи к плоскости проема 30° . По методике [4] разность гравитационных давлений в проеме 22,5 Па, коэффициент эжекции $\lambda = 2,27$, показатель защиты $q = 1,0$ — полная защита проема, температура смеси $10,2^{\circ}\text{C}$. Расчет аэродинамических и тепловых параметров защиты по мере повышения наружной температуры, обеспечивающих режим полной защиты в соответствии с выражением (1), представлен в табл. 2.

Таблица 2. Параметры защиты проема при повышении наружной температуры ($q = 1,0$)

Наружная температура, $^{\circ}\text{C}$	-35	-25	-15	-5	+5
Разность гравитационного давления, $\Delta P_{\text{гр}}$, Па	22,5	17,5	12,9	8,7	4,7
Удельная сила давления, $I_{\text{пр}}$, Н/м	383	298	219	148	80
n/n_0 по (1)	1	0,88	0,76	0,62	0,46
Удельный расход завесы, $\text{м}^3/\text{с}/\text{м}$	21,2	18,6	16,1	13,1	9,8
Удельный поток импульса завесы, I_3 , Н/м	415	321	239	159	88
Отношение $I_3/I_{\text{пр}}$	1,08	1,08	1,09	1,08	1,09
Температура смеси в отсутствие ветра, $^{\circ}\text{C}$	10,2	11,7	13,1	14,6	16,0
Динамическое давление ветра, Па при 8 м/с	47,5	45,5	43,8	42,1	40,6
Ветровая добавка к $\Delta P_{\text{пр}}$ при лобовом ветре, Па					
- верх проема	+ 6,7	+6,4	+6,1	+5,9	+5,7
- пограничный слой	-4,8	-4,6	-4,4	-4,2	-4,1
Доля от $\Delta P_{\text{пр}}$, % (лобовой ветер)					
- верх проема	+30	+36	+47	+68	+121

- пограничный слой	-21	-26	-34	-48	-87
Ветровая добавка к $\Delta P_{пр}$ при продольном ветре, Па					
- начало проема	-15,7	-15,0	-14,5	-13,9	-13,4
- конец проема	+8,1	+7,7	+7,4	+7,2	+6,9
Доля от $\Delta P_{пр}$, % (продольный ветер)					
- начало проема	-70,0	-6,0	-112,0	-160,0	-285,0
- конец проема	+36,0	+44,0	+57,4	+82,7	+146,8

Как видно из табл. 2, при ветре 8 м/с по мере повышения наружной температуры и соответствующего ослабления защиты возможна критическая деформация струи при лобовом направлении ветра и, особенно, при продольном его направлении. Возможно, что ослабление лобового ветра до 4 м/с сдвинет границу устойчивости структуры в область более высоких наружных температур, чего нельзя сказать о продольном ветре. При продольном ветре разрушение структуры гарантировано. Примерно так же будет складываться ситуация и при направлении ветра под углом к стене с проемом.

Выводы

1. При проектировании самолетных ангаров следует учитывать розу ветров места расположения ангара (наиболее вероятное направление и скорость ветра по [2] без каких-либо ограничений).
2. Предпочтительная ориентация ангара к направлению ветра — расположение стены с проемом на наветренной или заветренной сторонах.
3. Ориентация стены с проемом параллельно направлению ветра или под острым углом (менее 45°) к направлению ветра опасна нарушением сплошности защитной струйной структуры нормальными силами, неравномерно распределенными по размаху проема. Для удержания режима полной защиты по всей ширине проема потребуется локализованная вариация расхода по группам модулей завесы в зависимости от величины избыточных давлений по размаху проема, создаваемых ветровыми потоками. В связи с этим может потребоваться установка в конце проема относительно направления ветра более мощных завес в сравнении со средней и начальной частью проема.
4. Регулирование работы завесы уменьшением расхода воздуха при повышении наружной температуры против расчетной зимней не нарушит режима полной защиты, если проем расположен на наветренной или заветренной сторонах ангара.
5. При ориентации стены с проемом параллельно или под острым углом к направлению ветра удержание режима полной защиты по всей ширине проема при всех наружных температурах потребует тонкого и дифференцированного локализованного регулирования расхода по группам модулей в зависимости от локального распределения избыточного давления вдоль размаха проема, наряду с общим уменьшением расхода при повышении наружной температуры.
6. Атмосферная турбулентность с вихрями масштаба размеров ангара может привести к кратковременному разрушению защитной структуры (порядка нескольких секунд) с быстрым ее восстановлением.
7. Сильные ветровые возмущения с масштабами, превышающими продолжительность защиты открытых ворот, могут полностью разрушить структуру завесы.

Литература

1. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Книга 1. / В. Н. Богословский, А. И. Перумов, В. Н. Посохин и др. 4-е издание. М.: Стройиздат. 1992.
2. Свод правил СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* (с изменением № 2). Москва. 2012.
- 3 Реттер Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика. — М.;Стройиздат,1984. — 294 с.
4. Марр Ю. Н. Воздушно-тепловые завесы. Расчет и проектирование завес для защиты проемов промышленных и общественных зданий. — СПб: АО «НПО «Тепломаш», 2017.
5. Отопление и вентиляция. В двух частях. Часть II. Вентиляция. Под ред. д. т. н. проф. В. Н. Богословского. М.: Стройиздат. 1976.
6. Реттер Э. И., Серебровский Ф. Л. Аэродинамическая характеристика жилых зданий // АВОК. № 5. 2008.
7. Э. Симмиу, Р. Сканлан. Воздействие ветра на здания и сооружения. Пер. с английского Б. Е. Маслова, А. В. Швецовой. Под ред. к. т. н. Б. Е. Маслова. М.:Стройиздат. 1984.
8. Свод правил СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*.

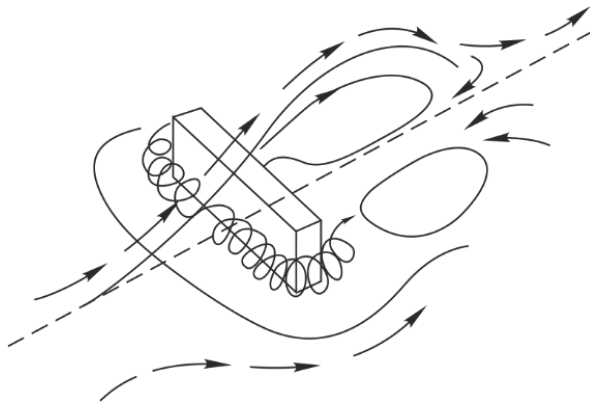
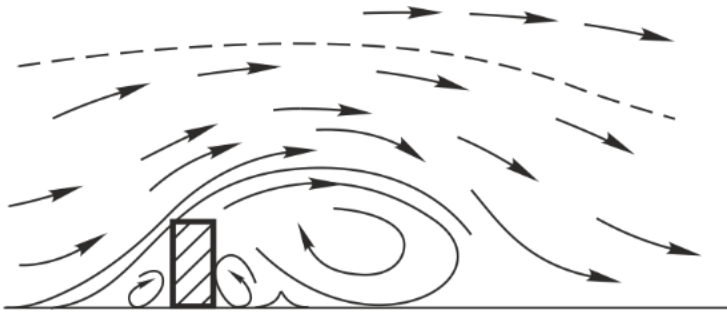


Рис. 1. Схема зоны аэродинамического следа при обтекании здания ветром [5]

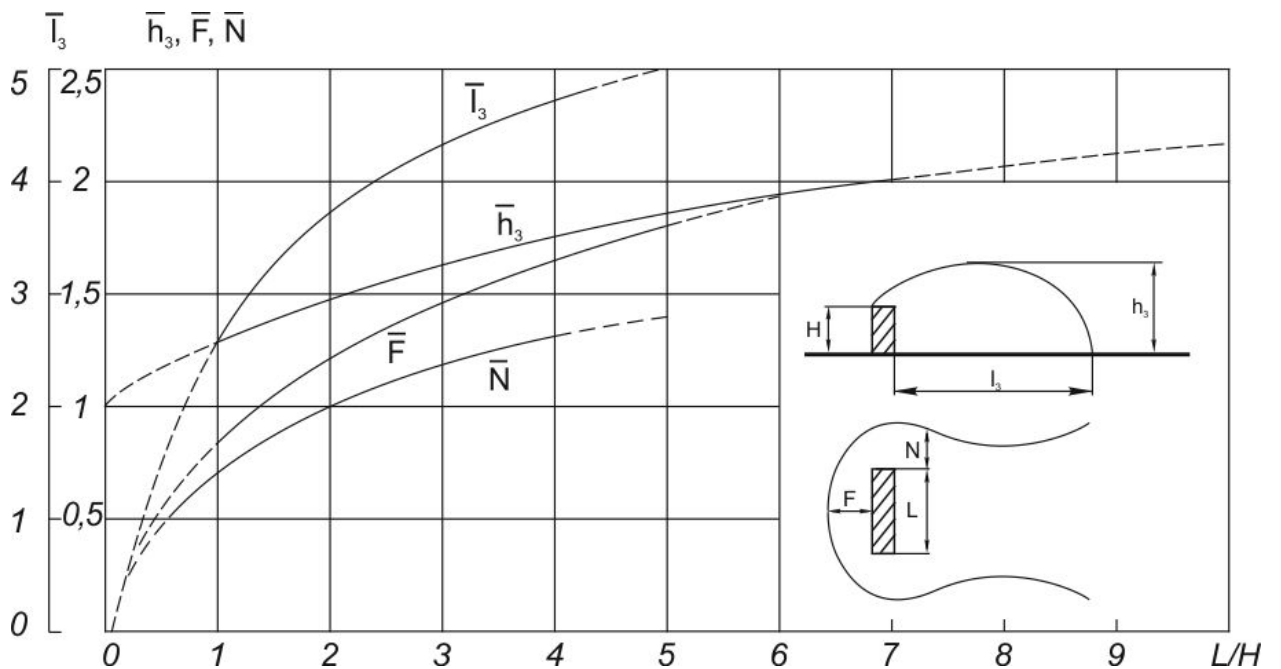


Рис. 2. Зависимость размеров зоны аэродинамического следа от габаритных размеров здания [5] (на графике размеры даны в относительных величинах — по отношению к H)

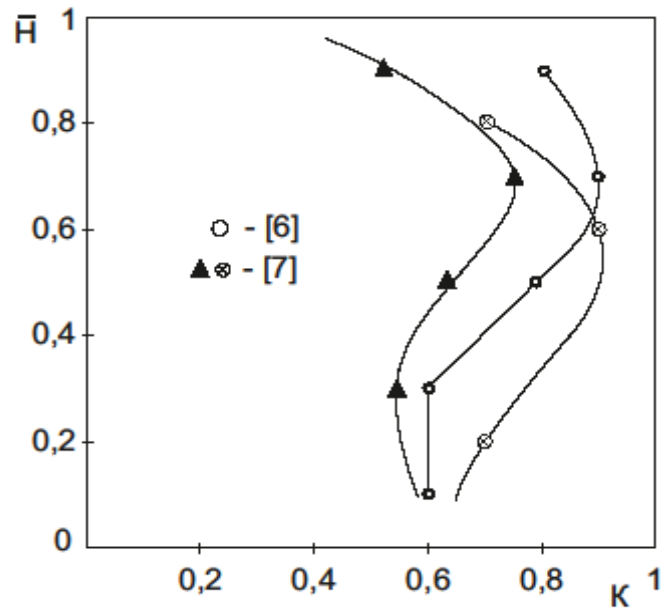


Рис. 3. Распределение аэродинамических коэффициентов в средней части фасада при лобовом натекании ветра

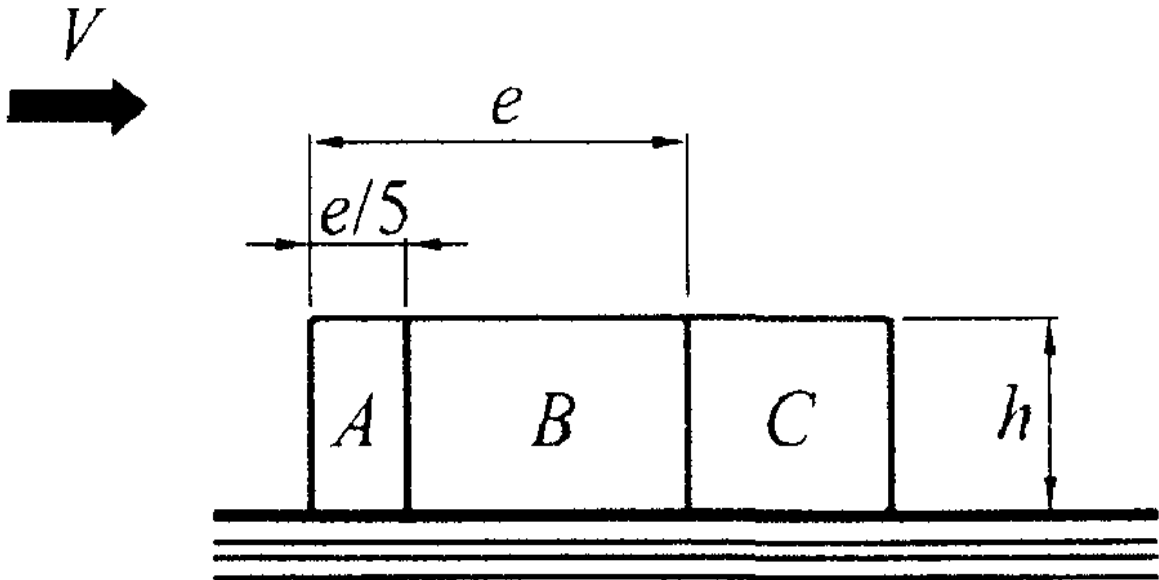


Рис. 4. Схема распределения нормальных нагрузок на боковой стенке из [8]. Величина e равняется меньшему из b (ширина здания) или $2h$. Аэродинамические коэффициенты c_e равны: $c_e(A) = -1$, $c_e(B) = -0.8$, $c_e(C) = -0.5$

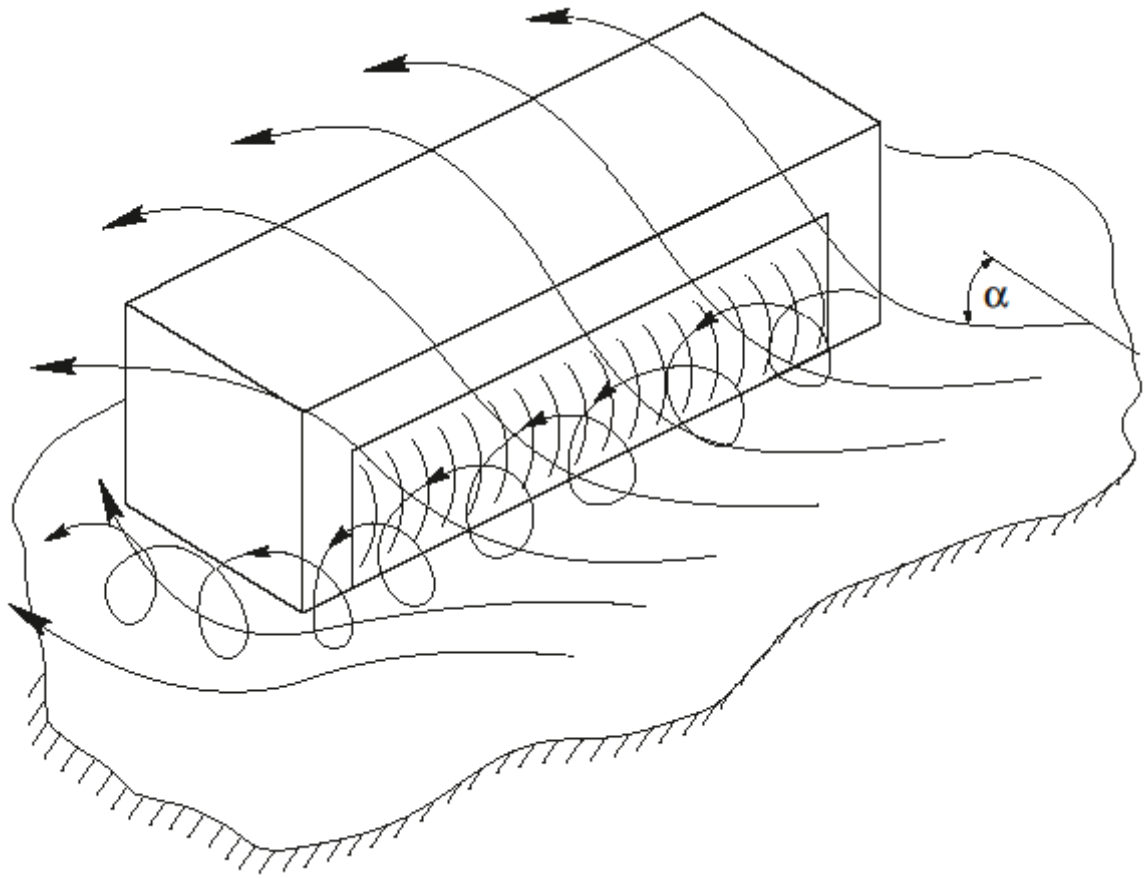


Рис. 5. Обтекание ветром фасада под углом α