Защита воздушными завесами проемов охлаждаемых помещений. Часть 2

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

В части 1 настоящей работы [1] приведены расчетные выражения и сделаны оценки мгновенных конвективных и фазопереходных теплопритоков через защищенные завесами проемы холодильных и морозильных камер. В части 2 рассмотрены возможности, особенности и эффективность защиты дверей кондиционируемых помещений общественного назначения. В [2] эта проблема была лишь обозначена. Поэтому в настоящей работе предпринята попытка сформулировать проектные рекомендации более общего характера.

Отопительный период почти во всех регионах России продолжительнее времени, когда необходимо кондиционирование. Поэтому в первую очередь решается проблема защиты проемов завесами в холодное время года. В зданиях общественного назначения устанавливаются завесы смесительного типа с источниками тепла. В каталогах многих производителей завес можно обнаружить запись, что те же завесы с отключенными источниками или без источника тепла могут защищать проем кондиционируемых помещений. Это утверждение следует понимать так, что летом достаточно отключить источник тепла — и защищай охлаждаемое помещение подобранной и установленной для зимы завесой. Здесь будет показано, в каких случаях такая защита допустима и когда необходимо специальное решение.

Обращение холодной и теплой зон относительно проема делает разность давлений в проеме отрицательной и формально приводит к необходимости переноса завес на внешнюю сторону защищаемого холодного помещения (рис. 1а). Кроме того, в отличие от зимних условий, когда разность давлений в проеме может достигать нескольких десятков Паскалей, летом разность плотностей воздуха будет значительно меньше, а вместе с ней будет меньше и модуль разности давления. Понятно, что при уменьшении разности давления против расчетной, по которой выбрана завеса, режим ее работы может перейти из смесительного в шиберующий. Это означает, что у любой офисной завесы, предназначенной для защиты входных дверей зимой в смесительном режиме, особенно если защита происходила с «мягким» шиберованием [2], сформируется картина полноценного аэродинамического шибера: затекать внутрь проема будет ядро постоянного расхода вместе с частью эжектированных снаружи масс без проникновения под струей неэжектированного наружного потока. С изменением знака разности давления картина аэродинамического шибера изменится на противоположную: ядро постоянного расхода вместе с эжектированными теперь уже изнутри массами будет вытекать из проема на улицу. Такая трансформация режимов течения представляет самостоятельный интерес и будет рассмотрена далее на примерах.

При внешнем расположении завесы (рис. 1а) защитная струя формируется из теплого наружного воздуха, и, если ее мощности достаточно, то струя доходит до пола, где эжектированные изнутри холодные массы отделяются и затекают назад в помещение, а ядро струи отправляется на улицу. Как сформулировано в [1], теплопритоки возникнут в процессе контакта теплой струи и холодных масс и выразятся в турбулентном теплопереносе, повышении температуры эжектированных масс и их поступлении в охлаждаемое помещение. В силу подобия тепловых и влажностных полей, точно так же будет происходить и массоперенос в воздух охлаждаемого помещения. Если условия сложатся, то наряду с конвективными возникнут и фазопереходные теплопритоки.

Расположение завесы на улице проблематично во всех отношениях. Поэтому перенос ее внутрь здания целесообразен, даже если для этого потребуются дополнительные затраты.

Внутренняя установка завесы, как показано на рис. 1б, позволяет осуществлять всасывание наружного воздуха без существенного изменения картины течения в проеме на рис. 1а. Повторимся, основная особенность схем течения на рис. 1 состоит в том, что завеса всасывает наружный воздух и выбрасывает его наружу. Теплопритоки от прямого воздухообмена при этом отсутствуют. Однако и такое расположение завесы, как на рис. 1б, требует сезонного демонтажа и разворота, если завеса изначально предназначалась для защиты отапливаемого помещения. Понятно, что в традиционной установке без разворота всасывающего окна завесы в сторону улицы она будет всасывать внутренний охлажденный воздух и выбрасывать его на улицу, создавая прямые потери холода в воздухообмене.

Здания, в которых поддерживается температура ниже температуры окружающей среды, по своему смыслу должны быть герметичного типа. Именно для них и предназначена в первую очередь схема защиты на рис. 1б, которая при правильной реализации оставляет массу воздуха и его давление внутри помещения неизменными. Попытка защиты герметичного помещения традиционно установленной смесительной завесой приведет к полному разрушению защитной структуры в проеме и неконтролируемым теплопритокам в воздухообмене.

В действительности многие помещения далеки от герметичности. Поэтому рассмотрим прежде всего трансформацию схем течения в проеме негерметичного помещения от разности давлений в предположении неизменяемой установки завесы с всасыванием внутреннего воздуха. Все результаты получены расчетом по выражениям [2] для верхней завесы. Укажем без выкладок, что исходные уравнения [2] справедливы как при положительной, так и при отрицательной разности давлений в проеме. Характерным параметром режимов, как обычно, является показатель работы завесы

$q = G_з/(G_з + G_н)$, (1)

где $G_з$ — массовый расход воздуха через завесу; $G_н$ — расход наружного воздуха, втекающего в защищенный проем. Первоначально показатель q был введен только для случая обычной шиберующей защиты ворот, при которой его численная величина ограничивалась диапазоном q = 0 – 1. Нулевое значение соответствовало случаю, когда расход наружного воздуха многократно превышал расход завесы, что означало фактически полное отсутствие шиберующей защиты проема (и могло быть интерпретировано как смесительная защита). Равенство единице соответствовало полной защите проема, поскольку расход наружного воздуха был равен нулю.

В широком понимании слагаемое $G_н$ может принимать и отрицательные значения, что физически будет означать вытекание внутреннего воздуха наружу. Например, если при некоторых условиях наружу уходит половина расхода завесы, то $G_н = -0{,}5G_з$ и, согласно (1), q = 2. Но если наружу будет выброшен весь расход завесы $G_н = -G_з$, то знаменатель (1) устремляется к нулю, а показатель q к бесконечности. Однако такой режим наступает уже при отрицательной разности давления.

Дадим представление о связи параметров защиты с разностью давлений в дверях. В [2] для верхней завесы было показано из общих уравнений потока импульса, баланса потоков импульса при растекании струй и расхода, что показатель работы завесы равен

$q = 2[1 + \lambda(\sigma - \sin\alpha)]^{-1}$, (2)

где λ — коэффициент эжекции; $\sigma = (\Delta P_{пр}/\rho v^2)(F_{пр}/F_з)$ — параметр, характеризующий отношение потока импульса от разности давлений к потоку импульса завесы; $F_{пр}/F_з$ — отношение площадей проема и сопел завесы (для выбранной завесы $F_{пр}/F_з = 47{,}0$). Поскольку завесы над дверями обычно устанавливают с нулевым углом струи, то далее всюду принято $\alpha = 0$. В зимнее время при $\Delta P_{пр} > 0$ параметр $\sigma > 0$ и выражение (2) превращается в

$q = 2(1 + \lambda\sigma)^{-1}$. (3)

Летом для режимов кондиционирования $\Delta P_{пр} < 0$ и $\sigma < 0$, поэтому показатель (3) должен иметь вид

$q = 2(1 - \lambda|\sigma|)^{-1}$. (3-1)

Его расчет для обоих случаев можно выполнять по (3), используя знак σ.

Коэффициент эжекции в [2] определялся для $\Delta P_{пр} > 0$ из геометрического соотношения при развороте струи, затекающей в проем,

$$K\lambda^2 + S_2/\bar{v}_2 = \bar{F}, \quad (4)$$

где S_2 — отношение расхода затекающей струи к расходу завесы; $\bar{F} = F_{пр}/F_з$; $K = \xi/0{,}55$; ξ — коэффициент качества струи, в общем случае принимается равным 0,8.

Для случая $\Delta P_{пр} < 0$ коэффициент эжекции определим из соотношения при развороте струи, вытекающей из проема,

$$K\lambda^2 + S_1/\bar{v}_1 = \bar{F}. \quad (4\text{-}1)$$

Подстановка в (4) и (4-1) S_1, S_2, q и преобразования показывают, что в обоих случаях коэффициент эжекции определяется по одинаковой зависимости

$$\lambda = [\bar{F}/(K + 0{,}5(1 + |\sigma|))]^{0,5}. \quad (5)$$

Вычислим параметры защиты для характерных режимов работы по (3) – (5):

1) при $\Delta P_{пр} = 0$, $\sigma = 0$, $q = 2$, $\lambda = [\bar{F}/(K + 0{,}5)]^{0,5}$,

2) предельный режим (затекание струи) при $\Delta P_{пр} > 0$

$S^*_1 = 0$, $S^*_2 = \lambda^*$, $\sigma^* = 1$, $q^* = 2(1 + \lambda^*)^{-1}$, $\lambda^* = [\bar{F}/(K + 1)]^{0,5}$,

обращенный предельный режим (вытекание струи) при $\Delta P_{пр} < 0$

$S^{**}_1 = \lambda^{**}$, $S^{**}_2 = 0$, $\sigma^{**} = -1$, $q^{**} = 2(1 - \lambda^{**})^{-1}$, $\lambda^{**} = [\bar{F}/(K + 1)]^{0,5}$,

3) режим полной защиты при $\Delta P_{пр} > 0$

$q = 1$, $\lambda\sigma = 1$, $\lambda \approx [\bar{F}/(K + 0{,}5)]^{0,5}$, $\sigma \approx [(K + 0{,}5)/\bar{F}]^{0,5}$,

режим обращенной полной защиты при $\Delta P_{пр} < 0$

$S_2 = 0.5(\lambda - 1)$, $q = +/-\infty$, $\lambda\sigma = -1$, $\lambda \approx [\bar{F}/(K + 0{,}5)]^{0,5}$, $\sigma \approx -[(K + 0{,}5)/\bar{F}]^{0,5}$.

Пусть для защиты в зимнее время дверей 2,2x1,5 м без тамбура в двухэтажном здании высотой 6 м установлена завеса КЭВ – 42П3111W с расходом воздуха 2100 м^3/ч. Скорость струи 8,3 м/с. Температуры воздуха: наружного -25 ^{0}С и внутреннего +20 ^{0}С, ветра нет. Через двери проходит 100 чел/час — по данным [3] принято $K_2 = 0{,}05$. Рассмотрим сначала здание негерметичного типа. Для двухэтажного здания расчетная высота равна $h_{расч} = 6 - 2{,}2/2 = 4{,}9$ м, а разность давлений в проеме $\Delta P_{пр} = 10{,}5$ Па. Завеса обеспечивает температуру смеси 10 ^{0}С.

Результаты расчетов для завесы КЭВ – 42П3111W в условиях примера приведены на рис. 2 и 3, а также в табл. 1. Схема А соответствует традиционной смесительной защите отапливаемого помещения. При повышении температуры до +12 ^{0}С возникает предельный режим шиберующей защиты (схема В). С дальнейшим ростом температуры шиберующий режим проходит через полную защиту (схема С, q = 1) и переходит в симметричное растекание струи при $\Delta P = 0$ (схема D). С этого момента начинается режим кондиционирования — наружная температура становится больше внутренней, а разность давлений изменяет знак. Нарушается симметрия растекания струи около пола, и показатель защиты становится q > 2.

Нарастание модуля разности давлений приводит к убыванию знаменателя (1) и неограниченному возрастанию показателя q. Следует отметить режим с бесконечным значением показателя q (схема Е). Поскольку наружу уходит весь расход завесы, т. е. ядро постоянного расхода струи, а эжектированные изнутри массы отделяются от струи и остаются в помещении, то это есть не что иное, как аналог режима полной защиты (схема С). Мы его назовем «обращенным режимом полной защиты».

Если отрицательная разность давления еще увеличится по модулю, то эжектированные изнутри массы (сначала их часть) также будут выброшены из проема на улицу. Показатель q изменит значение с плюс бесконечности до минус бесконечности (разрыв функции) и начнет в отрицательной области расти по модулю. Его рост имеет смысл рассматривать только до режима, при котором вся струя целиком вместе с эжектированными изнутри массами выбрасывается на улицу (схема F). Это будет аналог предельного режима, который назовем

«обращенным предельным режимом». Дальнейшее нарастание модуля отрицательной разности давления приведет к выбросу из помещения вместе со струей большой части внутреннего воздуха и $q \to 0$.

Таблица 1. Изменение параметров защиты дверей негерметичного помещения при повышении наружной температуры

Параметр	Величина параметра					
Обозначение схемы	A	B	C	D	E	F
$t_н$, ^{0}C	-25	+ 12	+ 18	+ 20	+ 22	+ 30
$\Delta P_{пр}$, Па	10,5	1,7	0,43	0	- 0,35	-1,87
q	--	0,4	1,0	2,0	+/-∞	-0,7
Режим защиты	Смеситель-ный	Предельный	Полная защита	Симмет-ричный	Обращенная полная защита	Обращенный предельный

Поскольку при наружной температуре +30 ^{0}C и разности давлений — 1,87 Па получается величина параметра $\sigma \approx -1$, то это означает, что в данных условиях завеса КЭВ – 42П3111W способна работать в обращенном предельном режиме (т. е. полного вытекания струи внутреннего охлажденного воздуха). Возникает вопрос, можно ли считать такую работу защитой охлаждаемого помещения. Для ответа необходимо сравнить холодопотери при работе завесы с теми, которые имели бы место при всасывании наружного воздуха по рис. 1б, т. е. сравнить холодопотери от организованного завесой воздухообмена с потерями от организованного контакта теплой струи с холодными массами. Кроме того, оба варианта следует сравнить с теплопритоком от воздухообмена через незащищенную завесой дверь. Примем дополнительно влажность воздуха при +30 ^{0}C равной 60%, соответственно энтальпия воздуха 71 кДж/кг. Энтальпия внутреннего воздуха при +20 ^{0}C и влажности 60% будет 39,2 кДж/кг.

При коэффициенте эжекции 3,9 расход потока, вытекающего из дверей (расход завесы плюс внутренняя эжекция), равен 6174 кг/ч. С учетом $K_2 = 0,05$ расход составит 309 кг/ч. При этом теплоприток, как произведение расхода на разность энтальпий, будет $Q_з = 2,73$ кВт. В незащищенном проеме негерметичного помещения при той же разности давлений $\Delta P_{пр} = -1,87$ Па, коэффициенте расхода $\mu = 0,7$ и проходе 100 чел/час ($K_2 = 0,05$) потери холода составят $Q_{б/з} = 0,05 \times 0,7 \times 2,2 \times 1,5 \times (71 - 39,2) \times (2 \times 1,16 \times 1,87)^{0,5} = 7,62$ кВт. Как видно, даже в обращенном предельном режиме эффективность защиты составит

$Э = (Q_{б/з} - Q_з)/Q_{б/з} = (7,62 - 2,73)/7,62 = 0,64$. (6)

Как предполагалось, для сравнительной оценки определим эффективность воображаемого варианта установки завесы, при которой она могла бы всасывать наружный воздух. При этом будем считать, что независимо от способа установки структура струи остается неизменной. Меняются только температуры составляющих струи. При всасывании наружного воздуха на улицу выбрасываются только эжектированные изнутри массы с расходом 183 кг/ч (с учетом $K_2 = 0,05$). Соответственно потери холода составят 1,62 кВт, а эффективность по отношению к внутреннему всасыванию будет $Э = (2,73 - 1,62)/2,73 = 0,40$, а по отношению к незащищенному проему $Э = (7,62 - 1,62)/7,62 = 0,79$.

Приведенные оценки показывают, что для кондиционируемых помещений негерметичного типа возможна защита завесами, выбранными и установленными для смесительной защиты в зимнее время с всасыванием внутреннего воздуха. Переустановка завесы на наружное всасывание повышает эффективность защиты, но не до такой степени, чтобы оправдать усилия и затраты на сезонный демонтаж и переворот завесы.

Иначе обстоит дело в герметичных помещениях. Рассмотрим то же помещение в варианте герметичного типа. В проеме герметичного отапливаемого помещения (температуры -25 ^{0}С и + 20 ^{0}С) при защите смесительного типа разность давлений принимается пропорциональной 0,25 $H_{пр}$ и равна 1,18 Па. Расход втекающего воздуха в этом случае определяется по половине площади проема с коэффициентом расхода 0,6 и будет 6525 кг/час или с учетом K_2 = 0,05, расход 326 кг/час. По нему подбирается завеса, обеспечивающая в зимнее время температуру смеси 12 ^{0}С. Понятно, что меньшей разности давления в проеме герметичного помещения будет соответствовать значительно более слабая завеса, чем в предыдущем случае, например, можно установить завесу КЭВ-4П1154Е с расходом 500 м^3/ч. Длина этой завесы всего 800 мм. Для смесительной защиты этого достаточно, но для защиты кондиционируемого помещения требуется завеса длиной в ширину проема. Поэтому в перспективе летней работы следует установить пусть даже с большим запасом завесу КЭВ-6П1264Е длиной 1500 мм с расходом 1000 м^3/ч. В зимнее время такая завеса будет чаще отключаться термостатом.

Как уже было сказано, независимо ни от каких условий завеса в традиционной установке для отапливаемого помещения не может защищать герметичное помещение в режиме кондиционирования. Однако даже если представить себе, что на летнее время осуществили разворот завесы всасывающим окном в сторону улицы для работы по схеме рис. 1б, то оказывается, что мощности завесы КЭВ-6П1264Е не хватит даже для работы в обращенном предельном режиме. Так, при +30 ^{0}С разность давлений (для герметичного помещения по половине высоты проема) будет — 0,42 Па. При скорости струи 4,8 м/с параметр σ = -0,87. Это означает, что режим работы лежит между обращенными полным и предельным ближе к обращенному предельному (σ^{**} = -1). Но для защиты герметичного кондиционируемого помещения подходит только один режим — обращенный полной защиты, когда ядро постоянного расхода, взятого с улицы, уходит на улицу, а эжектированные изнутри массы отделяются и остаются в помещении.

Этому требованию соответствует та же, что и в предыдущем случае, завеса или холодная КЭВ-П3111А с расходом 2200 м^3/час и скоростью струи 9,2 м/с. Для нее имеем σ = -0,2, λ = 4,29 и q = 14,1, что очень близко к режиму обращенной полной защиты. Потери холода в этом случае обусловлены только контактом теплого ядра постоянного расхода с внутренними массами и составляют при учете K_2 = 0,05 всего 0,14 кВт. Проверка на наличие фазопереходных теплопритоков показала, что они отсутствуют.

Расход охлажденного воздуха, вытекающего через незащищенные двери, составляет 2570 кг/час, или с учетом K_2 = 0,05, расход 128,5 кг/час. Потери холода незащищенного проема (по разности энтальпий) равны 1,14 кВт, эффективность защиты Э = (1,14 – 0,14)/1,14 = 0,88.

Вместе с тем можно представить себе развитие аэродинамической структуры в проеме герметичного помещения по совершенно иному сценарию, если над дверью останется подобранная для зимней защиты завеса КЭВ-6П1264Е. При повышении наружной температуры до 17,7 ^{0}С разность давлений опустится до 0,104 Па и в дверях сформируется режим полной шиберующей защиты. Дальнейшее повышение температуры должно привести к изменению знака разности давления и выбросу части струи на улицу. Это, в свою очередь, приведет к понижению давления воздуха в помещении, соответствующему уменьшению разности давления и восстановлению до некоторого момента режима полной защиты. Однако дальнейший рост модуля разности давлений с ростом наружной температуры опрокинет режим полной защиты и в помещение ворвется порция наружного воздуха. Давление в помещении восстановится, струя снова начнет вытекать на улицу, понижая давление и готовя новый импульсный прорыв наружного воздуха. В сочетании с периодически открывающимися и закрывающимися дверями при проходе посетителей возникнет воздухообмен, который мы приближенно оценим для +30 ^{0}С как расход при обращенном предельном режиме с учетом K_2 = 0,05 — расход 0,0445 кг/с. Теплоприток по

разности энтальпий составит 1,42 кВт, что одного порядка с теплопритоком просто через незащищенные двери.

Таким образом, теплопритоки через двери герметичных помещений значительно меньше, чем негерметичных, а эффективность защиты их проемов весьма высока. Однако летняя работа завес, подобранных для зимней смесительной защиты, невозможна по трем причинам:

1) работа такой завесы приведет к теплопритокам того же порядка, как в случае незащищенной двери;

2) для поддержания постоянного давления в помещении необходимы демонтаж и разворот завесы всасывающими окнами к улице для забора наружного воздуха с выбросом его на улицу;

3) единственно возможный для эффективной работы режим полной защиты требует завесу существенно большего расхода, чем смесительная защита в зимнее время.

Анализ показал, что важнейшим моментом в защите проемов кондиционируемых помещений обоих типов является забор наружного воздуха расположенной внутри помещения завесой. Наиболее близкое решение этой проблемы возможно с помощью завесы потолочного типа, у которой окна всасывания и сопло расположены в одной плоскости на нижней стенке корпуса. У потолочных завес эта стенка заделывается заподлицо с подвесным потолком. В кондиционируемых помещениях стенка с окном и соплом должна располагаться непосредственно над верхним створом дверей всасывающим окном в сторону двери. В этом случае реализуется схема течения по рис. 1б. Для работы такой завесы в зимнее время всасывание холодного наружного воздуха следует заменить всасыванием теплого внутреннего воздуха. Это возможно, если в верхней стенке корпуса завесы устроить второе окно всасывания, а нижнее окно перекрыть внутренним перекидным экраном.

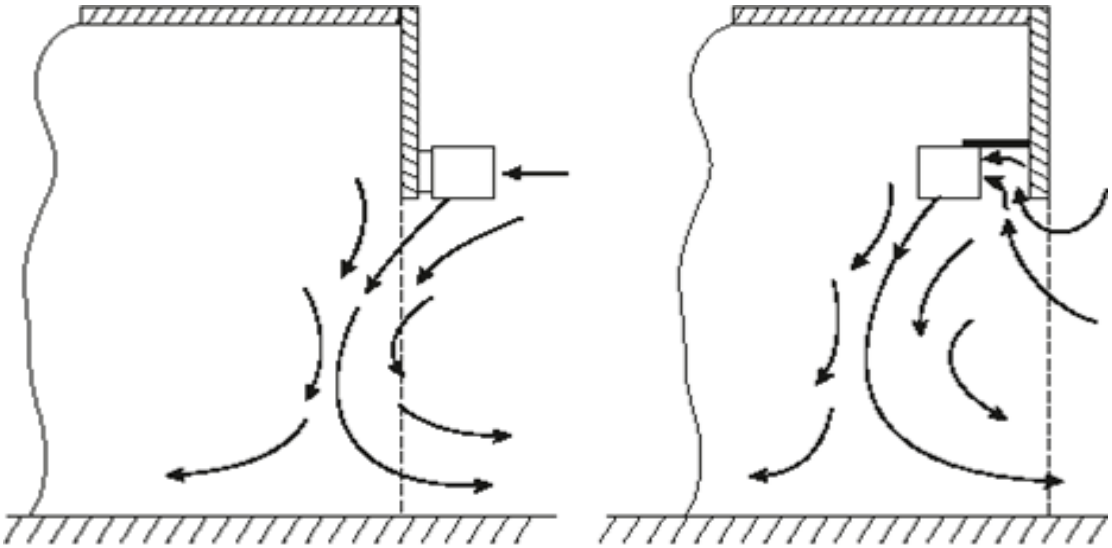
АО «НПО «Тепломаш» предложил схему универсальной завесы, основанную на этом принципе и позволяющую без сезонного демонтажа и разворота защищать двери отапливаемых помещений зимой в смесительном режиме и кондиционируемых помещений летом в шиберующем режиме. Схема конструкции представлена на рис. 4. Переключение с одного режима на другой осуществляется поворотным экраном 10 на оси 11. Наружный привод экрана на рис. 4 не показан. Окна всасывания 8 и 9 расположены на верхней и нижней стенке корпуса завесы.

Универсальная конструкция не исключает проблему сильно различающихся расходов завесы для отапливаемого и кондиционируемого герметичного помещения. Решение этой проблемы в пользу отапливаемого помещения, т. е. использование завесы заведомо заниженного расхода для защиты при кондиционировании приведет к режиму обращенного «мягкого» шиберования вытекающего через двери потока охлажденного воздуха. На рис. 2 такой режим будет находиться левее границы обращенного предельного режима (разумеется, с поправкой на величину разности давлений для герметичного помещения). Затекание наружного воздуха в герметичное помещение будет происходить через торцевые сечения струйной структуры между плоскостью двери и выходящей из завесы струей. Мягкое шиберование позволяет до некоторой степени снизить коэффициент расхода (например, с 0,6 до 0,4). Это уменьшит расход вытекающего воздуха с 2570 до 1713 кг/час, или с учетом K_2 = 0,05 до 86 кг/час, а потери холода составят 0,76 кВт. Эффективность защиты с «мягким» шиберованием при этом будет всего Э = (1,14 – 0,76)/1,14 = 0,33.

Таким образом, использование универсальной завесы «Тепломаш» решает задачу защиты дверей как негерметичных, так и герметичных помещений в период отопления и кондиционирования без сезонного демонтажа и переворота. При этом расход завесы следует выбирать преимущественно по условиям защиты в период отопления в смесительном режиме.

Литература

1. Марр Ю. Н. Защита воздушными завесами проемов охлаждаемых помещений. Часть 1// Инженерные системы. СПб.: АВОК Северо-Запад, №4-2017. С. 14-17.
2. Марр Ю. Н. Воздушно-тепловые завесы. Расчет и проектирование завес для защиты проемов промышленных и общественных зданий. — СПб.: АО «НПО «Тепломаш», 2017.
3. 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.



а б

Рис.1. Схемы течения при защите завесами дверей кондиционируемых помещений.

Рис. 1. Схемы течения при защите завесами дверей кондиционируемых помещений

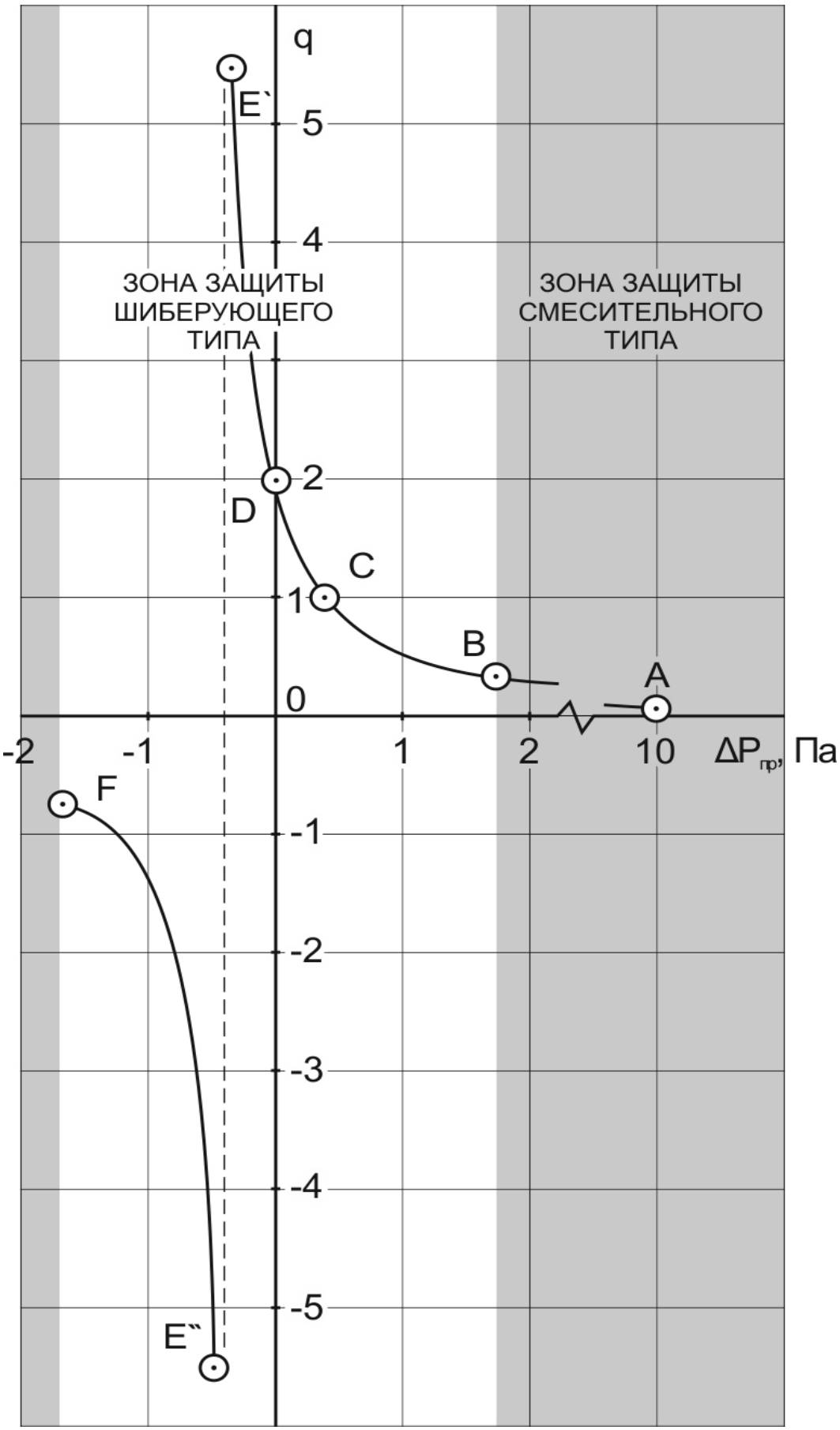


Рис. 2. Зависимость показателя работы завесы q от разности давлений в проеме

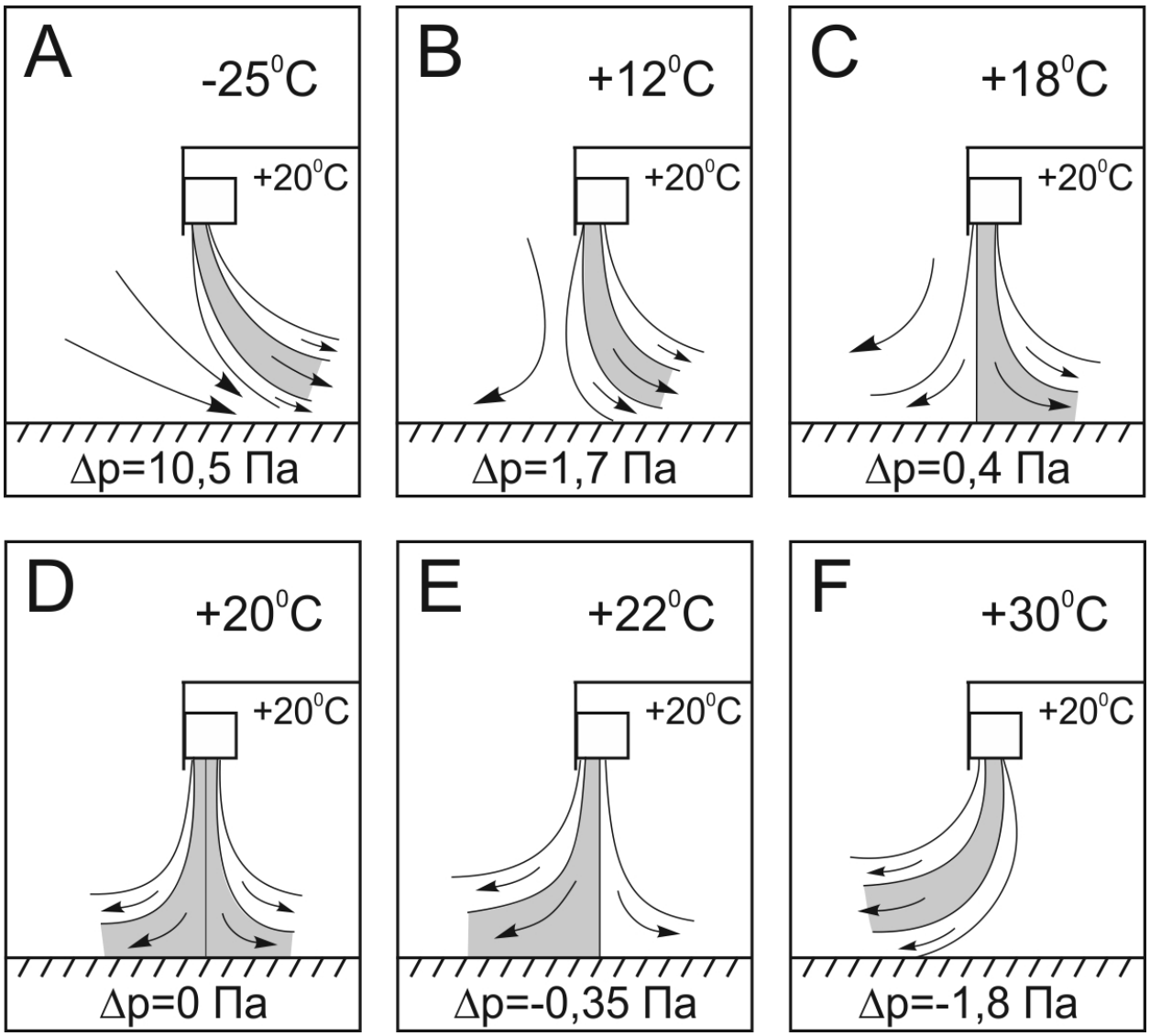


Рис. 3. Схемы течений в дверях негерметичного помещения в зависимости от наружной температуры (разности давлений)

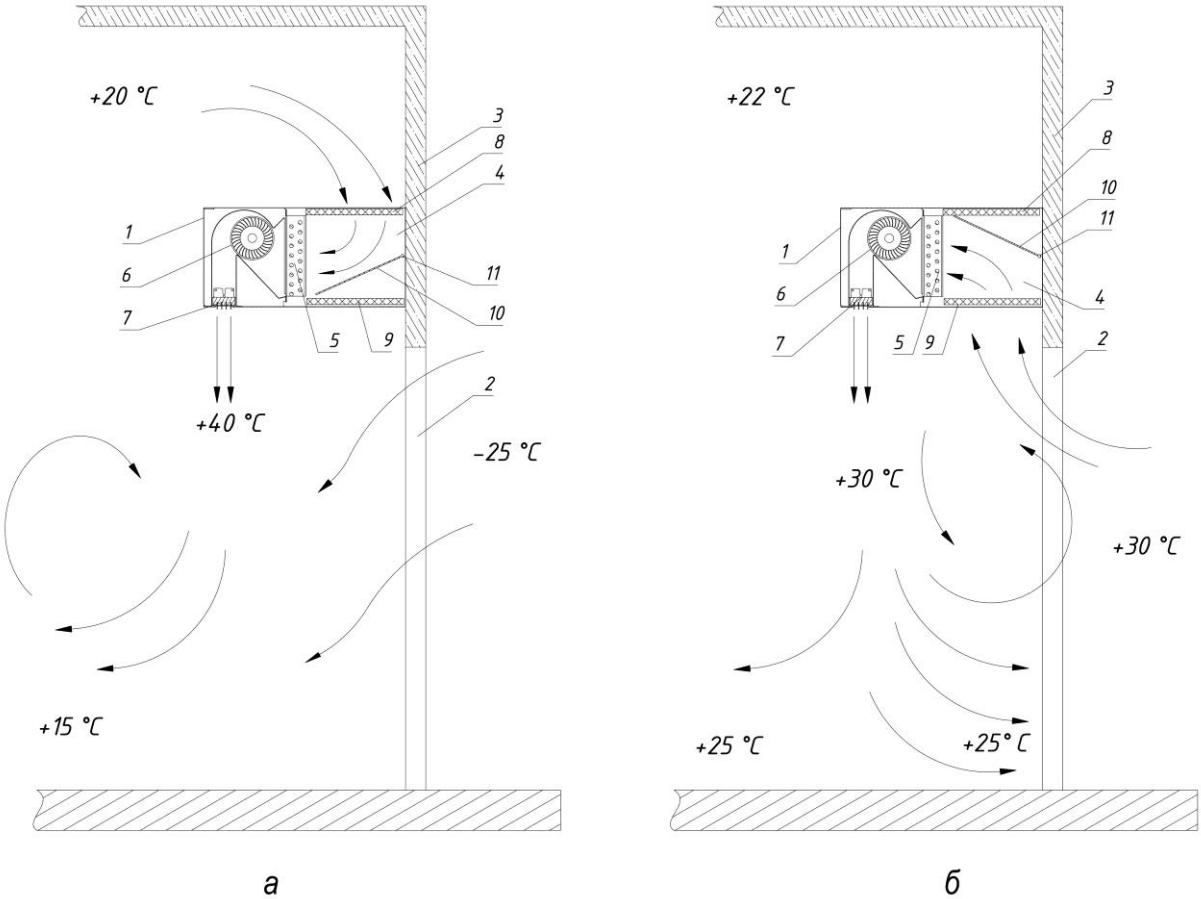


Рис. 4. Схема защиты универсальной завесой: а — отапливаемого помещения, б — кондиционируемого помещения