

Защита проемов спаренными струями с отличающейся температурой

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

В истории защиты проемов воздушными завесами неоднократно появлялись сообщения о возможности экономии ресурсов посредством разделения защитной струи на две параллельно истекающие части, имеющие отличающуюся температуру. Наружная часть оставлялась ненагретой, внутренняя подогревалась теплообменником завесы. В одних случаях эти части изначально были разделены пространством [1], а далее сливались, в других использовались спаренные струи [2]. Речь, как правило, шла об экранировании наружной холодной струей внутренней нагретой. В развитие разделенных струй в [3] была предложена защита двумя рядами завес, один из которых располагается внутри помещения и всасывает внутренний воздух, а другой — снаружи и всасывает наружный воздух. Внутренняя струя затекает в помещение, наружная уходит на улицу. Разновидностью защиты спаренными струями можно считать схему с экранированной струей [3], в которой наружная экранирующая часть формируется эжекцией основной струей внутреннего воздуха помещения с последующим выходом в проем. Логическим завершением такого подхода является описанная в [3] раздельная защита проема: аэродинамическая защита осуществляется ненагретой струей внутреннего воздуха, тепловая защита смесительного типа — потоками воздуха из нагревателей, установленных вне зоны струйного взаимодействия.

Что касается эффекта защиты спаренными струями, то в [1] вопрос эффективности не рассматривался, а в [2] дана лишь рекламная интерпретация проведенных натурных исследований в виде красивой, но бесполезной картинки изотерм в струе. Безотносительно режима работы завесы указано, что экранирование нагретой струи ненагретой позволяет на 35% уменьшить расход воздуха и на 38% снизить тепловую мощность завесы. В [3] показано, что даже в самом действенном методе раздельной аэродинамической и тепловой защиты максимальная эффективность до 50% (уменьшение тепловой мощности по отношению к совмещенной защите) возможна только при так называемой полной шиберующей защите проема (полная защита — наружные эжектированные массы отделяются от струи и уходят на улицу). В предельном режиме (вся струя полностью затекает в проем) экономия равна нулю. Поэтому в настоящей работе дана оценка эффекта защиты спаренными струями в непосредственной связи с режимами защиты проема. Далее для оценок принимается, что суммарная тепловая мощность, затрачиваемая на защиту проема, состоит из тепловой мощности завесы и компенсационной мощности доведения расхода смеси от температуры смеси до внутренней температуры помещения.

Поскольку в спаренных струях профиль температуры на выходе из сопла ступенчатый, важно определить длину, на которой происходит его турбулентное размывание. Для этого рассмотрим модель спаренной плоской затопленной струи, разделяющей пространство с температурами воздуха $t_1 < t_2$ (рис. 1). Принятая схема упрощает оценку, поскольку исключается влияние теплообмена с обеих сторон струи. Общая ширина струи равна $2b_0$. Левая часть струи образуется из воздуха с температурой t_1 , правая с t_2 . Скорости обеих частей струи одинаковы и равны v_0 . Струя развивается как свободная затопленная.

Коэффициент турбулентной теплопроводности обозначим λ_r . Примем для упрощения развивающийся профиль температуры в струе линейным. На всем участке размывания ступенчатого профиля температура на оси спаренной струи остается постоянной, равной $t_0 = 0,5(t_1 + t_2)$. Длину участка размывания обозначим через z_p . Вдоль всего этого участка температуры на границах ядра постоянного расхода остаются постоянными t_1 и t_2 , а теплообмен между ядром постоянного расхода и прилегающими пространствами отсутствует.

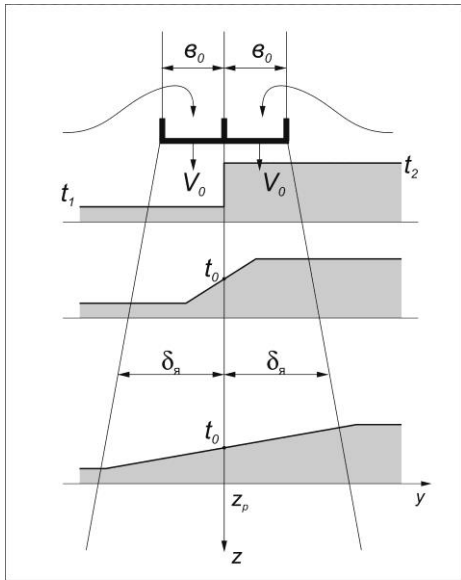


Рис.1. Схема спаренной струи

Тепловой поток, передаваемый на участке dz из одной части струи в другую, равен

$$dq = \lambda_T [(t_2 - t_1)/(2y)] dz. \quad (1)$$

Приращение теплового потока на каждой из частей струи выражается как

$$dq = 0,25 \rho C_p (t_2 - t_1) d(yv). \quad (2)$$

Приравнявая (1) и (2) и преобразовывая, получим

$$8(v_T/v) Pr_T d\bar{z} = Re_o \bar{y} d(\bar{v}\bar{y}), \quad (3)$$

где v_T/v — отношение турбулентной и молекулярной вязкостей;

Pr_T — турбулентное число Прандтля ($Pr_T = 0,8 = \text{Const}$);

Re_o — число Рейнольдса по параметрам сопла (гидравлический диаметр плоского сопла равен удвоенной ширине сопла $4b_0$);

$\bar{v} = v/v_0$ — безразмерная скорость;

\bar{y} и \bar{z} — безразмерные координаты, отнесенные к b_0 .

На начальном участке примем с некоторым приближением $\bar{v} = 1$, турбулентную вязкость зададим по [4], как для слоя смешения

$$v_T/v = 0,0016 v_0 z/v = 0,0016 (0,25 Re_o)(z/b_0) = 0,0004 Re_o \bar{z}. \quad (4)$$

С учетом (4) получаем из (3) уравнение

$$0,0032 Pr_T \bar{z} d\bar{z} = \bar{y} d\bar{y} \quad (5)$$

или после интегрирования

$$0,0026 (\bar{z}_n)^2 = (\bar{y}_n)^2, \quad (6)$$

где индексом «н» обозначена граница начального участка. Принимая длину начального участка $L_n = 6(2b_0)$, т.е. $\bar{z}_n = 12$, найдем из (6) $\bar{y}_n = 0,61$. Следовательно, на длине начального участка турбулентное размывание профиля не вышло за границы ядра постоянного расхода струи.

На основном участке струи, согласно [4], получим для турбулентной вязкости

$$v_T/v = 0,0031 Re_o (\bar{z})^{0,5}. \quad (7)$$

Скорость под дифференциалом в (3) зависит как от \bar{y} , так и от \bar{z} . Для упрощения примем ее постоянной средней по поперечному сечению ядра постоянного расхода струи и равной $\bar{v} = \bar{v}_y = b_0/\delta_y$, (8)

где половина ширины ядра δ_y определяется по [3] аппроксимационным выражением

$$\delta_y/2b_0 = 0,328 (z/2b_0)^{0,362} = 0,255 (\bar{z})^{0,362}. \quad (9)$$

Подстановка (8) и (9) в (3) дает уравнение

$$0,01 (\bar{z})^{0,5} d\bar{z} = \bar{y} d(\bar{y} \bar{z}^{-0,362}). \quad (10)$$

Преобразование (10) к виду

$$0,01 (\bar{z})^{0,138} d\bar{z} = (\bar{y} \bar{z}^{-0,362}) d(\bar{y} \bar{z}^{-0,362})$$

позволяет проинтегрировать уравнение в пределах от $\bar{z}_н = 12$, $\bar{y}_н = 0,61$ до текущих величин

$$0,0088(\bar{z})^{1,138} - 0,149 = 0,5 (\bar{y}^2 \bar{z}^{-0,724}) - 0,0308. \quad (11)$$

Расчет по (11) показывает, что \bar{y} становится больше $\delta_я/b_0$ при $\bar{z} = 17 - 20$, т. е. в этом диапазоне граница размывания профиля температуры достигает границы ядра струи,

\bar{z}	12	13	15	17	20
\bar{y}	0,61	0,76	1,02	1,27	1,61
$\delta_я/b_0$	1,25	1,29	1,36	1,42	1,51

после чего решение (11) теряет смысл. Таким образом, гидравлическая длина участка спаренной струи L_p , на котором экранирование холодной струей предотвращает тепловые потери, не превышает 10 размеров ширины сопла ($2b_0$). За пределами этого участка $\bar{L}_p > 10$ возникает теплопереток с теплой стороны струи на холодную сторону.

В рекламных материалах [5] утверждается, что благодаря специальной запатентованной технологии детурбулизации и выравнивания потока в сопле спаренные струи не перемешиваются практически на всей длине до самого пола, сохраняя заданную разность температур. Следует считать это утверждение сильным рекламным преувеличением, поскольку даже самая совершенная детурбулизация струи в сопловом аппарате не может исключить естественного вихреобразования на границах струи и связанного с этим порождения турбулентности.

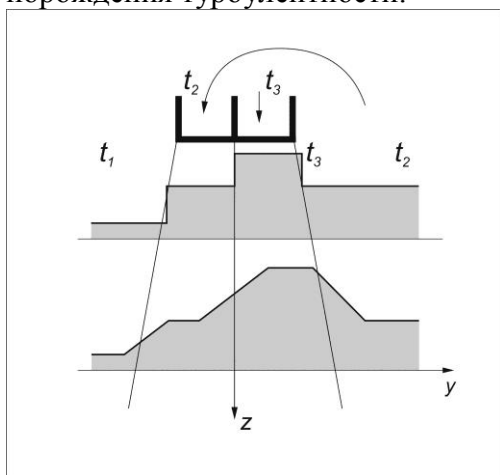


Рис.2. Спаренная струя по [2]

Переходя к схеме спаренной струи по [2], изображенной на рис. 2, отметим, что, помимо внутреннего теплоперетока, струя будет отдавать теплоту в обе стороны и температурный профиль станет размываться быстрее, чем в схеме рис. 1. Пренебрегая особенностями укороченного участка размывания температурного профиля, сравним параметры защиты проема трех вариантов:

- 1) спаренной струи по схеме рис. 2,
- 2) монотемпературной струи тех же размеров, что на рис. 2, нагретой до температуры t_3 ,
- 3) монотемпературной струи тех же размеров при температуре t_2 по схеме раздельной аэродинамической и тепловой защиты.

Температуры смеси вариантов равны:

$$\theta_{см1} = (t_{см1} - t_1)/(t_2 - t_1) = [0,5 + 0,5\theta_3 + 0,5(\lambda - 1) - \theta_0 \langle Q_{пот1} \rangle] [1/q + 0,5(\lambda - 1)]^{-1}, \quad (12)$$

где $\theta_3 = (t_3 - t_1)/(t_2 - t_1)$,

$$\theta_0 = (t_0 - t_1)/(t_2 - t_1) = [0,5(t_2 + t_3) - t_1] / (t_2 - t_1) = 0,5(1 + \theta_3) \text{ — здесь принята начальная температура ядра струи } t_0 \text{ как среднеарифметическая спаренных струй,}$$

$$\theta_{см2} = (t_{см2} - t_1)/(t_2 - t_1) = [\theta_3 + 0,5(\lambda - 1) - \theta_3 \langle Q_{пот2} \rangle] [1/q + 0,5(\lambda - 1)]^{-1} \quad (13)$$

$$\theta_{см3} = (t_{см3} - t_1)/(t_2 - t_1) = [0,5(\lambda + 1) - \langle Q_{пот3} \rangle] [1/q + 0,5(\lambda - 1)]^{-1}. \quad (14)$$

Относительные потери тепла с уходящими наружу массами будут

$$\langle Q_{\text{пот}} \rangle = Q_{\text{пот}} / W_{\text{я}}(t_2 - t_1) = \eta \tilde{Q}_{\text{пот}}, \quad (15)$$

где $\eta = G_1/G_{\text{ЭН}} = 2[0,5(\lambda + 1) - 1/q]/(\lambda - 1)$ есть доля уходящих на улицу масс в полном расходе наружной эжекции, q — показатель работы завесы, λ — коэффициент эжекции струи.

Относительный теплоотвод от ядра в холодную сторону с учетом теплоотвода и в теплую сторону по [3] равен

$$\tilde{Q}_{\text{пот}} = Q_{\text{то}} / (t_2 - t_1) W_{\text{я}} = 0,25(2 - \theta_2)[1 - \exp(-2\varepsilon)] + 0,5\theta_2\varepsilon, \quad (16)$$

где $\theta_2 = (t_2 - t_1)/(t_0 - t_1)$ — температурный параметр,

$\varepsilon = 0,065[L_{\text{стр}}/2b_0]^{0,556}$ — безразмерный параметр (число единиц переноса тепла).

В соответствии с (12) — (14), температурный параметр равен: $\theta_{21} = 1/\theta_0$, $\theta_{22} = 1/\theta_3$, $\theta_{23} = 1$.

Тепловая мощность компенсации теплопотерь составит

$$\langle Q_{\text{ком}} \rangle = Q_{\text{ком}} / W_{\text{я}}(t_2 - t_1) = (1 - \theta_{\text{см}})[1/q + 0,5(\lambda - 1)], \quad (17)$$

а суммарная затраченная на защиту проема тепловая мощность

$$\Sigma \langle Q \rangle = \langle Q_3 \rangle + \langle Q_{\text{ком}} \rangle, \quad (18)$$

где $\langle Q_{31} \rangle = 0,5(\theta_3 - 1)$, $\langle Q_{32} \rangle = \theta_3 - 1$, $\langle Q_{33} \rangle = 0$.

В режимах полной защиты $q = 1$, $\eta = 1$, в режимах предельной защиты по [3] $q = q^* = 2/(\lambda^* + 1)$, $\lambda^* = [F^-/(K + 1)]^{0,5}$, $F^- = L_{\text{стр}}/2b_0$, коэффициент K принимается для угла струи $\alpha = 0$ $K = 1,83$.

Принимая одинаковой аэродинамическую защиту для всех трех вариантов, приведем результаты расчетов по выражениям (12) — (18).

Таблица. Безразмерные суммарные тепловые мощности, необходимые для защиты проема

Режим защиты	Полная защита $q = 1$		Предельный режим $q = q^*$	
Гидравлическая высота проема $L_{\text{стр}}/2b_0$	20	40	20	40
Монотемпературная нагретая струя (вариант 2)	0,44	0,55	0,80	1,32
Спаренная струя (вариант 1)	0,35	0,48	0,78	1,32
Раздельная защита (вариант 3)	0,30	0,41	0,78	1,30
Спаренная струя с разделением $q = 2$ (вариант 4)	0,12	0,22	—	—

Как видно из таблицы, защита спаренной струей во всем диапазоне шиберующих режимов от полной защиты до предельного режима реализуется на тепловых мощностях в промежутке между монотемпературной нагретой струей и раздельной защитой, в полном соответствии с выводами [3]. В режиме полной защиты по варианту 3 — раздельная защита — максимальный достижимый эффект экономии тепловой мощности составляет 25–32%, а для спаренной струи (вариант 1) 13–20%. В предельном режиме шиберующей защиты разница между вариантами исчезает. Переход за границу предельного режима, т. е. к смесительной защите, положения дел не изменит.

Таким образом, защита смесительного типа спаренными струями по [2] входных дверей общественных зданий имеет значительно более скромное энергетическое преимущество перед традиционной защитой монотемпературной струей.

Покажем схему, в которой спаренная струя будет обладать действительным преимуществом перед монотемпературной. Пусть аэродинамический режим защиты на заданную разность давлений в проеме выстроен так, что спаренная струя по схеме рис. 1 при набегании на пол разделяется точно на две равные части. При этом внутренняя часть ядра струи возвращается в помещение, а наружная часть уходит на улицу. Этому режиму соответствует показатель защиты $q = 2$ (вариант 4). Поскольку показатель защиты q

определяется массовыми расходами, а температуры и плотности потоков на схеме рис. 1 будут отличаться, то для сохранения одинаковыми скоростей спаренных струй потребуются сопла с отличающейся шириной. Для получения приближенной оценки это обстоятельство в дальнейших выкладках проигнорировано.

Температура смеси определяется из уравнения баланса втекающей смеси, состоящей из внутренней половины расхода завесы и внутренней эжекции

$$(t_{см4} - t_1)(0,5 W_я + W_э) = 0,5 W_я (t_2 - t_1) + W_э(t_2 - t_1) - \langle Q_{пот4} \rangle W_я (t_2 - t_1), \quad (19)$$

откуда безразмерная температура смеси равна

$$\theta_{см4} = [0,5 + 0,5(\lambda - 1) - \langle Q_{пот4} \rangle] / [0,5 + 0,5(\lambda - 1)] = 1 - 2 \langle Q_{пот4} \rangle / \lambda. \quad (20)$$

Схема рис. 1 позволяет упростить выражение теплотерь в сравнении с (15) — (16). Как было получено, на участке $\bar{L}_p \leq 10$ теплоотвод равен нулю. За пределами этого участка средняя температура ядра постоянна по длине струи $t_0 = 0,5(t_1 + t_2)$. Это позволяет полный теплоотвод от ядра струи к эжектированным массам $Q_4 = \alpha F(t_0 - t_1) = \varepsilon_4 W_я(t_0 - t_1)$

переписать в виде

$$\tilde{Q}_{пот4} = Q_4 / (t_2 - t_1) W_я = 0,5 \varepsilon_4, \quad (21)$$

где ε_4 можно выразить как

$$\varepsilon_4 = 0,065[(L_{стр} - L_p) / 2b_0]^{0,556}. \quad (22)$$

С учетом $\eta = 1$, температура смеси будет $\theta_{см4} = 1 - \varepsilon_4 / \lambda$. Тепловая мощность компенсации в данной схеме составляет

$$\langle Q_{ком4} \rangle = \langle Q_{пот4} \rangle = 0,5 \varepsilon_4. \quad (23)$$

Расчет по (23) приведен в последней строке таблицы. Как видно, спаренная струя с разделением на две равные части у пола и растеканием этих частей в противоположные стороны значительно эффективнее защищает проем, чем традиционная монотемпературная струя.

В связи с этим возникает задача связать параметры завесы с расчетным режимом защиты проема для обязательного растекания струй около пола. Воспользуемся рекомендациями [3].

Поскольку для верхних завес показатель защиты равен

$$q = 2[1 + \lambda(\sigma - \sin\alpha)]^{-1}, \quad (24)$$

то, принимая $q = 2$, найдем условие реализации данной схемы

$$\sigma = \Delta \bar{P} \bar{F} = \sin\alpha. \quad (25)$$

Из (25) понятно, что схема с $q = 2$ должна иметь угол струи $\alpha > 0$. Кроме того, из (25) следует, что данная схема реализуема на относительно мощных высокоскоростных завесах. Это делает ее малоприменимой для защиты входных дверей общественных зданий. Более предпочтительно использовать ее для защиты ворот промышленных помещений, особенно при частом и длительном открывании ворот. Однако техническая реализация такой завесы — непростая задача. При ее внутреннем расположении всасывание наружного воздуха должно происходить под верхним створом проема. Поток внутреннего воздуха должен поступать по отдельному параллельному воздушному тракту. Завесы, которые устроены по этой схеме, например, запатентованные технологии моделей DAT и MAT [5] для защиты холодильных камер, имеют усложненную конструкцию и достаточно высокую стоимость. Поэтому, учитывая значительную энергетическую эффективность, целесообразность применения таких завес должна определяться расчетом срока окупаемости.

Таким образом, реальная энергетическая эффективность завесы со спаренными струями (60–70%) достигается в специальной конструкции завесы при соединении струй из наружного и внутреннего воздуха в аэродинамической схеме с их растеканием у пола в противоположные стороны.

Литература

1. Никулин М. В., Савин В. К., Стронгин А. С. Экспериментальные исследования теплообмена струй воздушных завес // Гидромеханика отопительно-вентиляционных устройств: Межвузовский сборник научных трудов. Казань: КИСИ, 1991. С. 14–21.
2. Сквозняк остается на улице // Мир климата, № 37. 2006.
3. МАРР Ю. Н. Воздушно-тепловые завесы. Расчет и проектирование завес для защиты проемов промышленных и общественных зданий. — СПб.: АО «НПО «Тепломаш», 2017.
4. Теория турбулентных струй. Издание 2-е переработанное и дополненное. Под редакцией Г. Н. Абрамовича. М.: Наука. 1984.
5. Каталог фирмы biddle GmbH «Luftschleier Тур СА»[Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.biddle.de> (дата обращения 31.08.2017).