

Щедрина Г. Г., канд. техн. наук, доц.,
Кобелев В. Н., аспирант,
Щедрин П. Ю., аспирант
Юго-Западный государственный университет
Минко В. А., д-р техн. наук, проф.,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ВОЗДУШНЫХ ПРОСЛОЕК ПАНЕЛЕЙ С ВНУТРЕННИМИ КРИВОЛИНЕЙНЫМИ КАНАВКАМИ

tgk-kstu6@yandex.ru

Одним из направлений Программы энергосбережения, предложенной правительством РФ является снижение тепловых потерь наружными ограждениями жилых и общественных зданий, и особенно 20-летней и более застройки. Даны аналитические зависимости по интенсификации теплозащиты воздушных прослоек с использованием криволинейных канавок на внутренней поверхности панелей при естественном и вынужденном движении вентиляционного воздуха. На основе теоретических исследований разработана конструкция энергосберегающей панели, которая защищена патентом РФ.

Ключевые слова: тепловая защита, криволинейная канавка, потоки дополнительной теплозащиты.

Разработанная учеными ЮЗГУ под руководством ректора Емельянова С.Г. в соавторстве с коллективом кафедры ТГВ областная программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Курской области на 2011-2015 годы и на период до 2020 года» включает наряду с основополагающими направлениями экономии энергоресурсов на этапах производства, транспортировки и использования энергоносителей, также снижение тепловых потерь в окружающую среду, в том числе и жилых зданий 20-летней и более ранней постройки, которые еще обладают достаточной эксплуатационной прочностью, но не обеспечивают необходимой теплозащиты, особенно при продолжительности отопительного периода, которая для г. Курска составляет 216 дней в году.

Навесные вентилируемые фасады известны в России сравнительно недавно. Но в ряде стран (например в Германии, Финляндии) накоплен уже достаточный опыт по их использованию: в общественных, административных и промышленных зданиях, а также при реконструкции домов массовой застройки.

Применяют вентилируемые фасады не только в новом строительстве, но и при реконструкции старых зданий. Использование навесных конструкций позволяет, с одной стороны, «одеть» фасад в современные отделочные материалы, а с другой – улучшить теплозащитные показатели ограждающей конструкции и защитить ее от атмосферных воздействий.

Наличие воздушной прослойки в вентилируемом фасаде принципиально отличает его от других типов фасадов, т.к. внутренняя влага

свободно удаляется в окружающую среду. Вентилируемая воздушная прослойка снижает также и теплопотери в отопительный период, т.к. температура воздуха в ней несколько выше, чем снаружи.

Несмотря на то, что вентилируемые фасады применяются на практике в течение свыше 15 лет, и что в Германии существует отдельная Ассоциация, занимающаяся вопросами расчетов и применения вентилируемых фасадов, до настоящего времени нет единой научно обоснованной методологии расчета таких фасадов.

В настоящее время в большинстве развитых странах мира существуют технические и законодательные нормы, требующие строительство зданий с эффективным использованием энергии (ЗЭИЭ).

Задачу проектирования и строительства ЗЭИЭ можно успешно решить при осуществлении такой конструкции оболочки здания через которую в любое время в период эксплуатации здания и при любых погодных (климатических) условиях будут осуществляться устойчивые процессы потока тепла, влажности и воздуха (инфильтрация, эксфильтрация).

В последнее время в г. Москве и в России при строительстве гражданских зданий часто применяют вентилируемые фасады. В связи с этим необходимо разработать единую методологию по теплотехническому и аэродинамическому расчету вентилируемых фасадов.

Одним из решений данной проблемы является покрытие внешних стен жилых зданий панелями с воздушной прослойкой, в которых ат-

мосферный воздух, являющийся теплозащитой перемещается ламинарно, под воздействием разности температур между наружной поверхностью стен и внутренней поверхностью панели или турбулентно – перемещение воздушного потока под механическим воздействием: нагнетатели (вентиляторы, воздуходувки) и вибрационное перемещение одной или нескольких панелей под действием вибратора.

Рассмотрим особенности теплообмена между теплоносителем в качестве которого используется атмосферный воздух перемещающийся между внутренней поверхностью панели и внешней поверхностью наружной стены, например жилого здания.

Общее термическое сопротивление R теплопередаче запишем в виде

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_{ст.}}{\lambda_{ст.}} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (1)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи от наружного атмосферного воздуха к панели и от вентиляционного воздуха в воздушной прослойке к наружной поверхности стены, Вт/(м²·град);

δ_1 и δ_2 – толщина пограничного слоя контакта наружного воздуха с поверхностью панели и вентиляционного воздуха со стеной, м;

$\delta_{п\delta}$ – толщина панели, м;

λ_1 , λ_2 и $\lambda_{п\delta}$ – коэффициент теплопроводности соответственно атмосферного вентиляционного воздуха, а также материала панелей, Вт/(м·град).

Если коэффициенты теплопроводности известны в зависимости от материала панели и состояния теплоносителя – воздуха, то главная трудность при расчете коэффициента теплопроводности состоит в нахождении коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 , которые и определяют интенсивность процесса теплообмена.

Плотность теплового потока в любой точке теплоносителя однозначно определяется при условии, что известны поля температур, скоростей и удельной энтальпии. Для этого необходимо располагать системой соответствующих уравнений и условиями однозначности [1]. Для учета направления теплового потока используем поправку в виде множителя $(Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}$ в соответствии с рекомендацией [2], которое имеет не только определенный физический смысл, но и рассматривается как методический прием, приводящий к малому разбросу опытных точек при получении общего уравнения теплоизоля-

ционного теплоносителя, т.е. вентиляционного воздуха.

В результате анализа известных литературных источников, описывающих процесс теплообмена в каналах сложной формы [3] и обработки экспериментальных данных получены критериальные уравнения для наиболее распространенных режимов движения вентиляционного воздуха:

а) для турбулентного с наличием вентилятора или вибратора, перемещающего теплоноситель,

при отсутствии конденсации пара из атмосферного воздуха

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} \quad (2)$$

при наличии процесса конденсации

$$Nu = A_k \cdot Re_k^p \cdot Pr^m \quad (3)$$

б) для ламинарного, т.е. перемещения теплоносителя за счет разности плотностей и, соответственно, температур по высоте наружной стены жилого здания

при отсутствии конденсации паров

$$Nu = A_1 (Re \cdot Pr)^p \quad (4)$$

при конденсации паров атмосферной влаги

$$Nu = A_2 \left[Re \cdot Pr \left(\frac{d_3}{L} \right) \right] \cdot r \quad (5)$$

где Nu , Re , Pr – критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля;

L – длина криволинейного канала на одной панели, м;

r – удельная теплота фазового превращения вещества, Дж/кг;

n , p , m и C , A – значение показателей степени и коэффициенты, полученные экспериментально с использованием теории подобия применительно к конкретным погодноклиматическим условиям эксплуатации здания;

d_3 – эквивалентный диаметр полости криволинейной канавки;

индексы k , 1 и 2 означают отнесение к конденсату и теплоносителю без наличия конденсата и с конденсатом.

Гидравлические сопротивления, возникающие при движении вентиляционного воздуха в криволинейных канавках имеют сложный механизм, обусловленный вязкостью воздуха как

теплоносителя, так и конструктивной особенностью выполнения воздушной прослойки. Для определения гидравлического сопротивления воздушной прослойки местные сопротивления (ξ_i) равномерно расположенные по длине криволинейной канавки учитываем совместно с сопротивлением трения ($\xi_{\text{т}}$) посредством условного коэффициента сопротивления

$$\xi = \xi_{\text{т}} + \xi_i \quad (6)$$

Тогда гидравлическое сопротивление по длине криволинейных канавок определим по уравнению Дарси-Вейсбаха

$$\Delta P = \xi \frac{L}{d_y} \cdot \frac{\rho \omega^2}{2} \quad (7)$$

где ω - скорость движения теплоносителя, м/с;
 ρ - плотность теплоносителя, кг/м³.

Для вычисления условного коэффициента трения ξ в наших расчетах используем критериальное уравнение

$$Eu = f(\text{Re}) \quad (8)$$

где Eu - критерий Эйлера, $Eu = \Delta p_{\text{на}} / (\rho \omega^2)$, тогда

$$\xi = 2Eu d_y / L. \quad (9)$$

Здесь $Eu = f(\text{Re})$ устанавливаем путем обработки экспериментальных данных для каждого из рассматриваемых режимов движения теплоносителя в воздушной прослойке, т.е. для турбулентного и ламинарного

При турбулентном режиме, вызванном работой вентилятора или вибратора, особенностью процесса движения теплоносителя в криволинейной канавке является многократно повторяющийся поворот элементарного объема жидкости, движущегося со скоростью ω , масса которого равна

$$dm = \rho d_f dfdr \quad (10)$$

где df - площадь поперечного сечения элементарного объема, м²;

dr - направление перемещения в данный момент, м.

Элементарная центробежная сила, действующая на этот объем, составляет $\rho dfdr \omega^2 / r$. Эта сила уравновешивается разно-

стью сил давления на гранях рассматриваемого объема

$$dp = \left(\frac{dp}{dr} \right) dfdr \quad (11)$$

Проектируя все силы на направление r , на основе принципа Даламбера запишем

$$\rho dfdr \cdot \omega^2 / r - dp / dr dfdr = 0 \quad (12)$$

откуда

$$\rho \omega^2 / r = dp / dr \quad (13)$$

Так как давление вентиляционного воздуха по всему сечению криволинейной канавки должно быть постоянным, то изменение статического давления на основании уравнения Бернулли будет происходить только вследствие изменения скоростного напора так как

$$p + \rho \omega^2 / 2 = \text{const} \quad (14)$$

Дифференцируя это уравнение, получаем

$$dp / p = - \rho \omega d\omega / dr \quad (15)$$

Подставляя значения dp / dr в (13), получаем

$$- \rho \omega d\omega / dr = \rho \omega^2 / r$$

или $\omega / r + d\omega / dr = 0 \quad (16)$

Интегрируя это уравнение, имеем

$$r\omega = \text{const} \quad (17)$$

Следовательно, при прохождении вентиляционным воздухом поворота криволинейной канавки частицы потока, описывающие дуги больших радиусов (у вогнутой стенки канавки), движутся медленнее, чем частицы, описывающие дуги малых радиусов (у выпуклой стенки поворота канавки). В результате при перемещении по повороту образуется область вихревого движения потока вентиляционного воздуха. По опытным данным при угле поворота криволинейной канавки достигающим 90°, глубина вихревой области составляет около половины эквивалентного диаметра канавки и коэффициент сжатия струи равен приблизительно 0,5. Это дает возможность определять гидравлические потери в воздушной прослойке по повороту криволинейной канавки, расположенной на внутренней поверхности панелей по теореме Борда:

$$\Delta P_{\text{пов}} = \frac{\rho \omega^2}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \quad (18)$$

где ε - коэффициент сжатия потока вентиляционного воздуха при перемещении по криволинейной канавке.

Тогда суммарное гидравлическое сопротивление панели при омывании ее вентиляционным воздухом в воздушной прослойке определится как

$$\Delta P_{\text{сум}} = \Delta P_L + \Delta P_{\text{пов}} \quad (19)$$

Полученное значение гидравлического сопротивления для вентилируемой воздушной прослойки определяет значение мощности N двигателя вентилятора или вибратора, необходимой для перемещения потока воздуха между наружной стеной жилого здания и панелью

$$N = V \Delta P_{\text{сум}} / \eta = G \Delta P_{\text{сум}} / (\rho \eta) \quad (20)$$

где V и G соответственно объемный ($\text{м}^3/\text{с}$) и массовый ($\text{кг}/\text{с}$) расход вентиляционного воздуха;

η - КПД вентилятора или вибратора.

Для определения достигнутой интенсификации теплопередачи определяем удельную мощность N_o (отнесенная к единице площади F поверхности панели – теплообмена), $\text{Вт}/\text{м}^2$

$$N_o = \frac{N}{F} \quad (21)$$

На основе данных положений была разработана панель для дополнительной теплоизоляции стен [4], содержащая листы, образующие воздушную прослойку между наружной стеной здания и окружающей средой через, например полиуретановый поропласт, при этом листы панели конструктивно сгруппированы пакетами по восемь штук с жестким соединением между со-

бой и девятым в центре, который имеет возможность горизонтального перемещения относительно стены посредством вибратора, обеспечивающим турбулизацию движения вентиляционного воздуха по криволинейным канавкам тыльной поверхности листов панели.

Конструктивное решение значительно сокращает тепловые потери, а новизна его защищена патентом РФ на полезную модель.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Представленные теоретические положения позволили выявить зависимость между условиями создания эффективного использования воздушной прослойки наружных ограждений и режимом движения теплоносителя, определяемого аэродинамическим сопротивлением перемещения атмосферного воздуха по криволинейным канавкам.

2. Получены аналитические зависимости, описывающие особенности движения теплоносителя по криволинейным канавкам с образованием завихрений, которые стали основой разработки конструктивного решения эффективной теплозащиты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Михеев, М.А.* Основы теплопередачи/ М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977.-344 с. Изд. второе, Москва, Энергия, 1977.
2. *Адиутори, Е. Ф.* Новые методы в теплопередаче / Е. Ф. Адиутори. -М.: Мир,1977.-232 с.
3. Пат.93833 Российская Федерация, МПК7 У 04В 1/80 Панель для дополнительной теплоизоляции стен [Текст] / Кобелев Н.С., Яцун С.Ф., Медведев А.А.; заявитель и патентообладатель КурскГТУ. - № 93833, Бюл. № 19.-2с.