

УДК 536.24 : 697.134

Басок Б.И., Давыденко Б.В., Новицкая М.П., Гончарук С.М., Тыринов А.И.

Институт технической теплофизики НАН Украины

## ТЕПЛООТДАЧА С ПОВЕРХНОСТЕЙ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ТРЕХЭТАЖНОГО АДМИНИСТРАТИВНОГО ЗДАНИЯ

Наведено результати чисельного дослідження тепловіддачі з зовнішніх поверхонь триповерхової споруди. Одержано залежності коефіцієнтів тепловіддачі з поверхні споруди від швидкості вітрового потоку.

Представлены результаты численного исследования теплоотдачи с наружных поверхностей трехэтажного здания. Получены зависимости коэффициентов теплоотдачи с поверхностей сооружения от скорости ветрового потока.

The results of numerical investigation of heat transfer from external surfaces of the three-story building are presented. The dependences of the heat transfer coefficients from the building surfaces on the speed of the wind flow are obtained.

$a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $B$  – ширина расчетной области,  $\text{м}$ ;  
 $H$  – высота расчетной области,  $\text{м}$ ;  
 $k$  – кинетическая энергия турбулентности,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  
 $L$  – длина расчетной области,  $\text{м}$ ;  
 $p$  – давление,  $\text{Па}$ ;  
 $R$  – термическое сопротивление,  $\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$ ;  
 $T$  – абсолютная температура,  $\text{К}$ ;  
 $u, v, w$  – проекции вектора скорости на оси  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$  прямоугольной системы координат,  $\text{м}/\text{с}$ ;  
 $x, y, z$  – поперечная, продольная и вертикальная прямоугольные координаты,  $\text{м}$ ;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$  ;  
 $\delta$  – толщина ограждений,  $\text{м}$ ;

$\varepsilon$  – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности,  $\text{м}^2/\text{с}^3$ ;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{мК})$ ;  
 $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

### Нижние индексы:

$n$  – наружный;  
 $v$  – внутренний;  
 $c$  – стена;  
 $eff$  – эффективный;  
 $t$  – турбулентный;  
 $w$  – поверхность;  
 $\infty$  – невозмущенный поток.

При расчете теплового потока через ограждающие конструкции зданий и сооружений обычно используется величина их термического сопротивления

$$R = \frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_c}.$$

Второе слагаемое в представленном выражении характеризует термическое сопротивление теплопроводности ограждающей конструкции, которое практически постоянно и может быть рассчитано при известных толщине стены и теплофизических свойствах ее материала. Первое и третье слагаемые, характеризующие термические сопротивления конвективной теплоотдачи на наружной и внутренней поверхностях ограждений, зависят от аэродинамических условий во внешнем вет-

ровом потоке и от характеристик воздушных течений внутри помещения. В [1] рекомендуется при расчете уровней энергопотребления и теплоизоляции зданий принимать значения коэффициентов теплоотдачи на внешней и внутренней поверхностях равными  $\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$  и  $\alpha_v = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$  соответственно. Известно, однако, что коэффициент теплоотдачи на наружных поверхностях ограждений является величиной, изменяющейся вдоль указанных поверхностей, и зависящей как от формы и размеров сооружения, так и от скорости и направления ветрового потока. Поэтому использование постоянных значений коэффициентов теплоотдачи на внутренних и наружных поверхностях ограждений может привести к неточностям в определении теплопотерь. Перспективным подходом к решению данной про-

блемы следует считать расчет функции распределения коэффициентов теплоотдачи по наружным поверхностям ограждений на основе решения задачи о турбулентном переносе импульса и энергии ветровым потоком, обтекающим исследуемое сооружение. Как пример использования данного подхода рассмотрим результаты численного решения задачи теплопереноса для случая продольного (в направлении оси  $OY$ ) обтекания ветровым потоком трехэтажного административного здания длиной 60 м, шириной 18 м и высотой 10,6 м (рис. 1). Результаты расчета поля скорости и давления в ветровом потоке для рассматриваемого сооружения представлены в [2].

Система уравнений турбулентного переноса импульса и энергии рассматривается в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0;$$

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[ v_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ v_{eff} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ v_{eff} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right];$$

$$\frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ v_{eff} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] +$$

$$+ 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[ v_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ v_{eff} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right];$$

$$\frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ v_{eff} \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ v_{eff} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[ v_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right],$$

$$\frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right),$$

где  $v_{eff} = v + v_t$ ;  $a_{eff} = a + \frac{v_t}{\sigma_T}$ .

Для замыкания системы уравнений турбулентного переноса используется  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности, которая описывается системой уравнений

$$\frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial vk}{\partial y} + \frac{\partial wk}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + v_t S^2 - \epsilon;$$

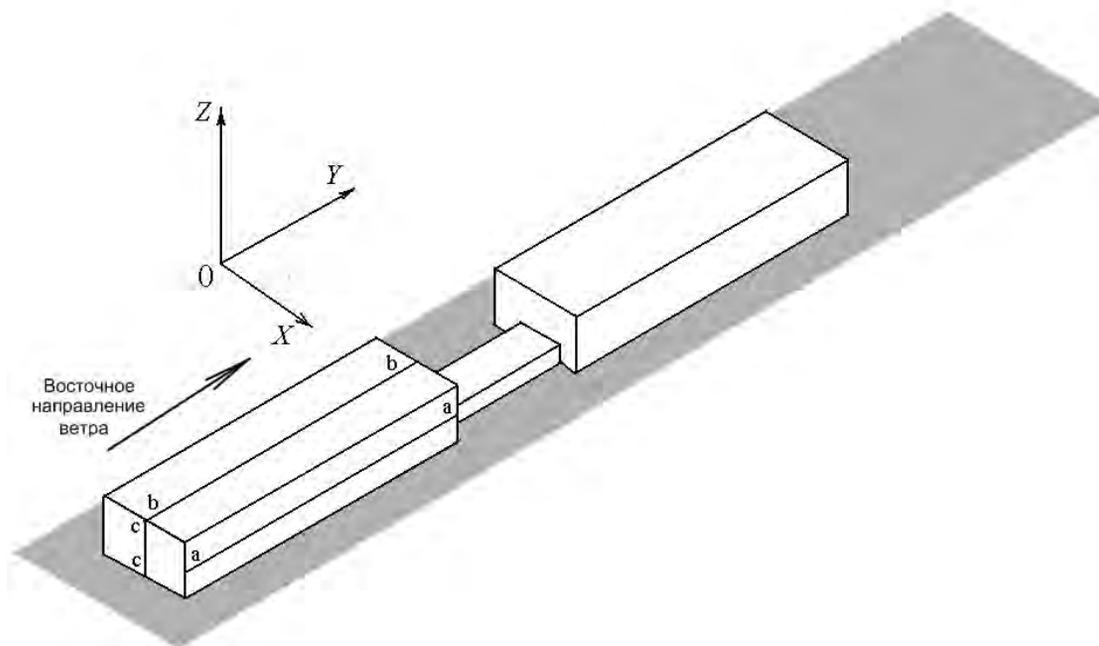


Рис. 1. Расчетная схема.

$$\frac{\partial u \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v \varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial w \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] +$$

$$+ C_1 \frac{\varepsilon}{k} v_t S^2 - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где

$$S = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \right.;$$

$$\left. + 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right]^{0,5};$$

$$v_t = C_\mu k^2 / \varepsilon; C_\mu = 0,09; C_1 = 1,44; C_2 = 1,92;$$

$$\sigma_T = 0,85; \sigma_k = 1; \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

Граничными условиями для представленной системы уравнений будут:

$$y = 0; 0 \leq x \leq B; 0 \leq z \leq H: u = 0; w = 0; v = v(z);$$

$$T = T_\infty; k = k_\infty; \varepsilon = \varepsilon_\infty;$$

$$y = L; 0 \leq x \leq B; 0 \leq z \leq H: u = 0; w = 0; \partial v / \partial y = 0;$$

$$\partial T / \partial y = 0; \partial k / \partial y = 0; \partial \varepsilon / \partial y = 0;$$

$$x = 0; 0 \leq y \leq L; 0 \leq z \leq H: u = 0; w = 0; \partial v / \partial x = 0;$$

$$\partial T / \partial x = 0; \partial k / \partial x = 0; \partial \varepsilon / \partial x = 0;$$

$$x = B; 0 \leq y \leq L; 0 \leq z \leq H: u = 0; w = 0; \partial v / \partial x = 0;$$

$$\partial T / \partial x = 0; \partial k / \partial x = 0; \partial \varepsilon / \partial x = 0;$$

$$z = 0; 0 \leq y \leq L; 0 \leq x \leq B: u = 0; v = 0; w = 0;$$

$$\partial T / \partial z = 0; k = 0;$$

$$z = H; 0 \leq y \leq L; 0 \leq x \leq B: u = 0; w = 0; \partial v / \partial z = 0;$$

$$\partial T / \partial z = 0; \partial k / \partial z = 0; \partial \varepsilon / \partial z = 0;$$

$$\text{на поверхности сооружения: } u = 0; v = 0; w = 0;$$

$$T = T_w; k = 0;$$

в ближайшем к твердой поверхности узле разностной сетки:  $\varepsilon = C_\mu^{3/4} \cdot k^{3/2} / (\kappa \cdot \Delta n)$ , где  $\kappa = 0,418$ ;  $\Delta n$  – расстояние от узла до поверхности.

Во входном сечении расчетной области ( $y = 0$ ) задается степенной закон изменения по высоте скорости невозмущенного ветрового

потока, направленного вдоль оси  $OY$ :

$$v = v_0 (z/z_0)^n,$$

где  $n = 0,45$ ;  $z_0 = 5$  м.

Рассматриваются случаи трех различных значений коэффициента  $v_0$  (5 м/с; 10 м/с и 15 м/с), выражающего значение продольной скорости  $v$  на расстоянии  $z_0$  от земной поверхности. Данная величина характеризует масштаб скорости набегающего ветрового потока.

Значения температуры невозмущенного потока  $T_\infty$  и температуры поверхности сооружения  $T_w$  считаются постоянными величинами.

Представленная система дифференциальных уравнений с указанными граничными условиями решается численно с использованием метода контрольного объема [3]. В расчетной области  $0 \leq x \leq B$ ;  $0 \leq y \leq L$ ;  $0 \leq z \leq H$ , содержащей рассматриваемое сооружение и примыкающую к нему область воздушного пространства (рис. 1), строится разностная сетка. В узлах разностной сетки производные по пространственным переменным аппроксимируются конечными разностями.

Следует отметить, что рассмотренная модель турбулентного переноса импульса и энергии справедлива для описания течения и теплопереноса вдали от твердых поверхностей, омываемых воздушным потоком. В пристеночной же области, а точнее, в узлах сетки, ближайших к твердым поверхностям, для расчета характеристик турбулентного переноса используется метод пристеночных функций [4, 5].

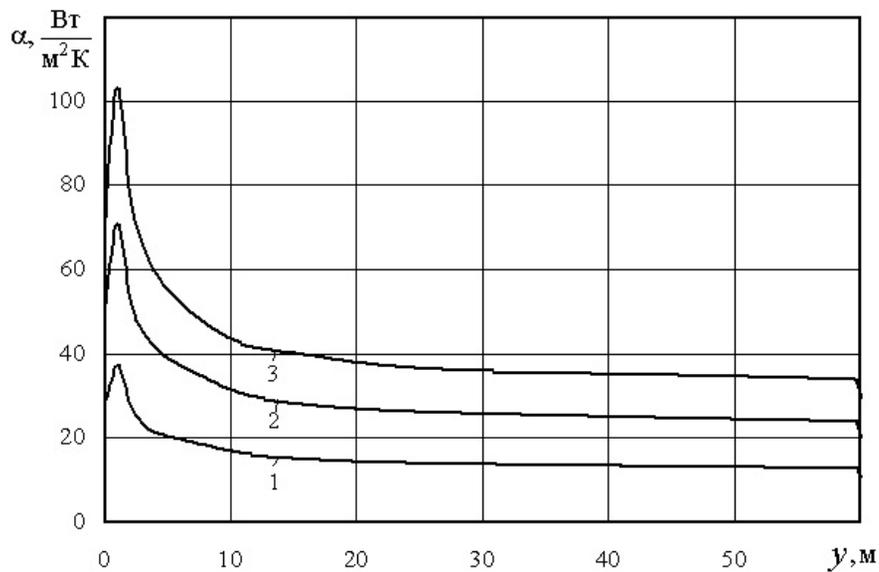
Из решения полученной системы разностных уравнений определяются поля скорости, давления и температуры в воздушном потоке, омывающем рассматриваемое сооружение. На основании полученных результатов рассчитываются значения коэффициентов теплоотдачи на поверхностях здания.

Распределения коэффициентов теплоотдачи вдоль поверхностей боковых стен исследуемого сооружения (линия  $a-a$  на рис. 1) при направлении невозмущенного ветрового потока вдоль оси  $OY$  приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, коэффициенты теплоотдачи достигают максимальных значений на расстоянии

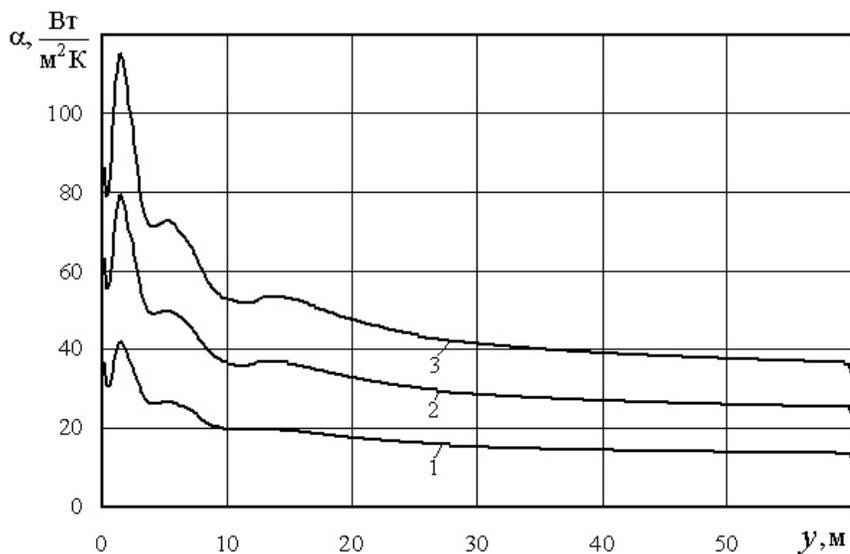
1,0...1,2 м от передней кромки боковой стены. Далее, по мере увеличения расстояния от передней кромки и роста толщины турбулентного пограничного слоя, значения коэффициентов теплоотдачи уменьшаются. Как и следовало ожидать, значения коэффициентов теплоотдачи тем выше, чем больше значение масштаба скорости  $v_0$ . При  $v_0 = 15$  м/с максимальные значения коэффициентов теплоотдачи превышают 100 Вт/(м<sup>2</sup>К).

Аналогичный, хотя и несколько более сложный характер имеет распределение коэффициентов теплоотдачи по поверхности крыши вдоль линии  $b-b$ . Зависимости указанной величины от продольной координаты  $y$  при разных значениях  $v_0$  представлены на рис. 3.

В воздушном потоке над крышей, за ее передней кромкой, формируется циркуляционная зона, влияющая на характер теплообмена в данной области. Ее наличием обусловлены



**Рис. 2. Распределения коэффициентов теплоотдачи вдоль поверхности боковой стены:**  
 1 –  $v_0 = 5$  м/с; 2 – 10 м/с; 3 – 15 м/с.



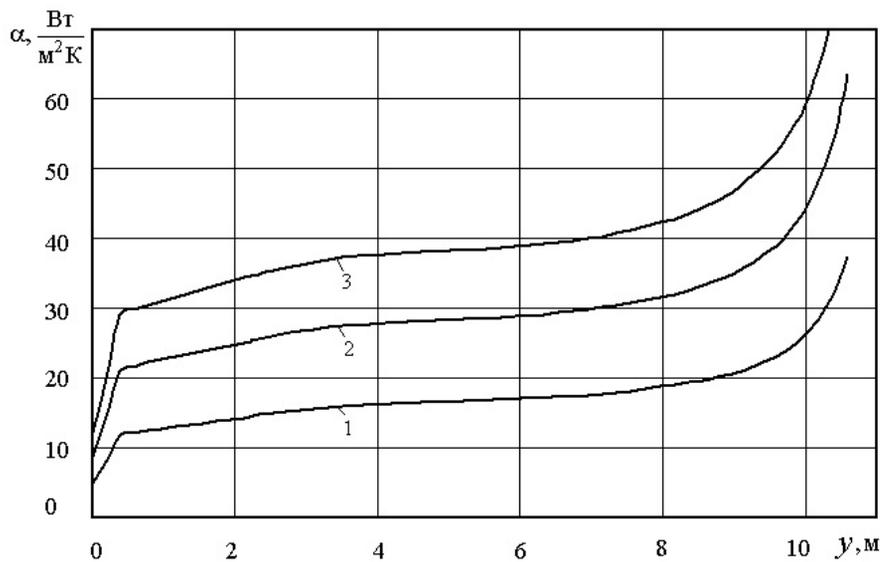
**Рис. 3. Распределения коэффициентов теплоотдачи вдоль поверхности крыши:**  
 1 –  $v_0 = 5$  м/с; 2 – 10 м/с; 3 – 15 м/с.

участки увеличения и уменьшения локальных коэффициентов теплоотдачи, связанные с отрывом и последующим присоединением к поверхности турбулентного пограничного слоя.

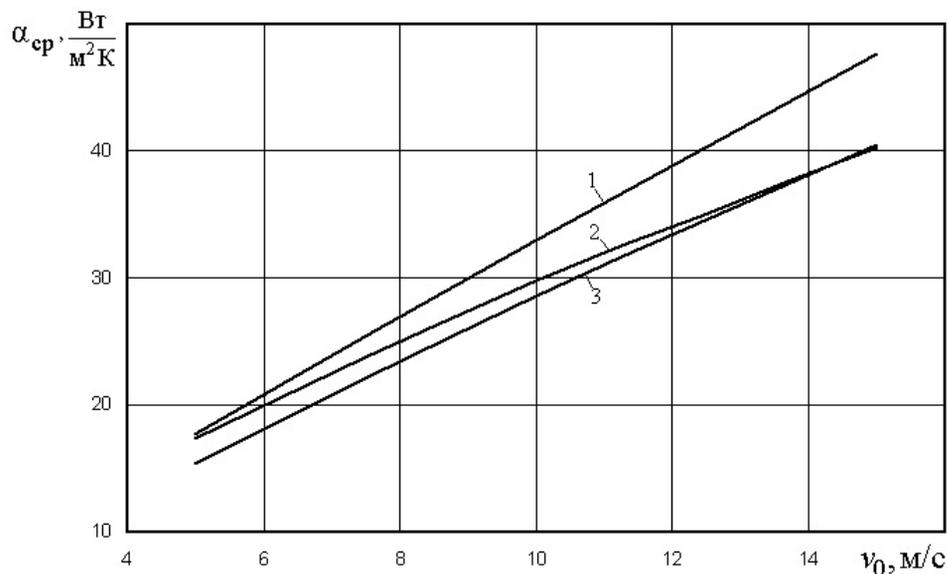
Распределение коэффициентов теплоотдачи по поверхности торцевой стены сооружения, на которую набегаёт ветровой поток, отличается по характеру от рассмотренных ранее распределений на боковых стенах и крыше. На теплоотдачу с указанной поверхности влияют

как небольшая циркуляционная зона у основания сооружения, так и отрыв потока от верхней кромки стены. В средней части торцевой стены ( $2 \text{ м} < z < 8 \text{ м}$ ) коэффициенты теплоотдачи изменяются по высоте незначительно. У основания сооружения они минимальны, а в верхней части стены – максимальны. Изменение вдоль линии *c-c* коэффициентов теплоотдачи на торцевой стене представлено на рис. 4.

Интерес представляет также зависимость



**Рис. 4. Изменение коэффициентов теплоотдачи по высоте торцевой стены: 1 –  $v_0 = 5$  м/с; 2 – 10 м/с; 3 – 15 м/с.**



**Рис. 5. Зависимость от масштаба скорости средних коэффициентов теплоотдачи на поверхностях сооружения: 1 – крыша; 2 – торцевая стена; 3 – боковые стены.**

осредненных по поверхностям коэффициентов теплоотдачи от масштаба скорости набегающего потока  $v_0$ . Данная зависимость представлена на рис. 5.

Как видно из рисунка, наибольшие значения средние коэффициенты теплоотдачи имеют на поверхности крыши. На торцевой стене их значения несколько ниже. Наименьшие же значения средних коэффициентов теплоотдачи оказываются на поверхностях боковых стен. Представленные на рис. 5 функции могут быть аппроксимированы степенными зависимостями:

- на поверхности боковой стены:

$$\alpha_{cp} = 3,69(v_0)^{0,89};$$

- на поверхности крыши:

$$\alpha_{cp} = 4,15(v_0)^{0,9};$$

- на поверхности торцевой стены:

$$\alpha_{cp} = 5,05(v_0)^{0,76}.$$

### Выводы

1. Распределение локальных коэффициентов теплоотдачи по поверхностям ограждающих конструкций – неравномерное. Их величины зависят как от масштаба скорости набегающего потока, так и от ориентации поверхности.

2. Зависимость средних по поверхности коэффициентов теплоотдачи от масштаба скорости набегающего потока  $v_0$  – степенная с показателями степени, характерными для развитого турбулентного течения воздушной среды около плоских поверхностей. Рекомендуемое в [1] значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_n = 23$  Вт/(м<sup>2</sup>К) соответствует масштабам скорости ветрового потока  $v_0 \sim 7 \dots 8$  м/с.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Конструкції будинків та споруд*. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2006. – [Чинний від 01.04.2007]. – К.: Мінбуд України, 2006. – 64 с. – (Державні будівельні норми України).

2. *Давиденко Б.В., Гончарук С.М., Луніна А.О., Тесля А.І.* Аеродинамічні характеристики триповерхових громадських будівель // Пром. теплотехніка. – 2009. – Т. 31, № 7. – С. 81–84.

3. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

4. *Launder B.E., Spalding D.B.* The numerical computation of turbulent flows // Comp. Methods in Appl. Mech. and Eng. – 1974. – V. 3. – P. 269–289.

5. *Launder B.E.* On the computation of convective heat transfer in complex turbulent flows // Transactions of the ASME: Journal of Heat Transfer. – 1988. – Vol. 110. – P. 1112–1128.

Получено 16.12.2011 г.