

УДК [536.2+532.5]:518.12

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ВОЗДУХООБМЕНА В ПОМЕЩЕНИИ**

**И.В. КОСТОЛОМОВ, А.Г. КУТУШЕВ**

*Тюменская государственная архитектурно-строительная академия*

Представлены результаты математического моделирования аэродинамических тепловых процессов в помещениях для ряда схем подвода и отвода воздуха. Рассмотрены модельные помещения в форме куба, внутри которых имеются или отсутствуют препятствия и источники тепла. Для описания термо- и аэродинамических процессов использованы уравнения стационарного трехмерного изотермического или неизотермического движения газа, соответствующие  $k-\varepsilon$ -модели турбулентности. Выявлены критерии подобия процессов тепловоздухообмена. На их основе выполнено детальное численное исследование влияния определяющих параметров задачи на локальные и усредненные характеристики полей скорости и температуры.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из практических приложений конвективного течения воздуха может являться вентиляция помещений, при котором процессы конвективного переноса играют определяющую роль. Здоровье, работоспособность, самочувствие человека в значительной степени определяются экологией воздушной среды помещений. Поэтому создание необходимого микроклимата в помещениях является важной задачей, которая может быть успешно решена на основе повышения эффективности и экономичности системы вентиляции. Для решения этой задачи уже на стадии проектирования необходима достаточно точная информация о зависимости параметров воздушной среды в вентилируемом помещении от тех или иных характеристик системы. Вследствие того, что течение воздуха в помещении является трехмерным, турбулентным, неизотермическим, а геометрия помещения имеет достаточно сложный вид, необходимая информация может быть получена только благодаря применению методов математического моделирования. Существующие инженерные методики расчета воздухообмена не всегда позволяют спроектировать эффективную систему вентилирования помещений из-за использования априорных усредненных параметров. В отличие от таких методик, методы вычислительной гидродинамики дают возможность получения не только усредненной, но и локальной информации о характеристиках воздушного режима помещений.

Среди работ, посвященных математическому моделированию процессов тепловоздухообмена в помещениях, следует отметить публикации [1 – 7]. В этих работах представлен типичный круг задач данной области, решаемых с помощью методов вычислительной гидродинамики. В то же время большинство работ по математическому моделированию процесса тепловоздухообмена в помещениях направлено на решение весьма конкретных производственных задач со сложной

геометрией помещения, наличием технологического оборудования и др. Актуальной проблемой является установление общих закономерностей протекания аэродинамических и тепловых процессов в модельных помещениях с простой геометрией.

Целью настоящей работы является численное исследование стационарных трехмерных турбулентных принудительных изотермических и неізотермических течений воздуха в кубе, моделирующем помещение; влияние определяющих параметров потока и помещения на структуру безразмерных физических полей и интегральные характеристики воздушной среды.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Имеется помещение в форме куба с теплоизолированными стенами, внутри которого имеется источник тепла в виде неподвижного непроницаемого препятствия с заданной температурой поверхности. В помещение через одинаковые квадратные отверстия подается и отводится турбулентный поток “холодного” воздуха известной температуры (рис. 1). Ставится цель численно определить поля скоростей турбулентного изотермического или неізотермического течения воздуха, возникающего внутри помещения при наличии и отсутствии препятствия и сравнить картины течения, соответствующие различным схемам расположения входного и выходного отверстий. Требуется также найти зависимости безразмерной скорости воздуха, максимальной и средней по объему рабочей зоны помещения, от размеров препятствия, схемы воздухообмена и расхода подаваемого воздуха.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для описания трехмерного турбулентного неізотермического течения несжимаемого газа в помещении используется система безразмерных уравнений движения, которую можно представить в виде обобщенного дифференциального уравнения переноса, записанного в дивергентной форме [8],

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( u_j \Phi - \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) = S_\Phi, \quad (1)$$

где величины  $\Phi$ ,  $\Gamma_\Phi$  и  $S_\Phi$  приведены в таблице 1. Моделирование турбулентности производится с помощью стандартной  $k$ - $\varepsilon$ -модели [9].

В таблице 1 и приведенных ниже выражениях  $u_i$  — проекция скорости на ось координат  $x_i$ ,  $p$  — разность полного и гидростатического давлений,  $\Theta$  — температура,  $k$  — кинетическая энергия турбулентных пульсаций,  $\varepsilon$  — скорость диссипации турбулентности,  $P_k$  — скорость генерации турбулентности.

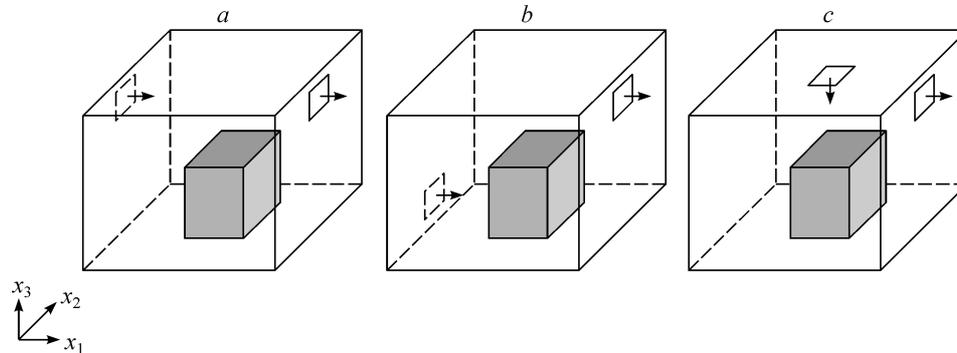


Рис. 1. Схематическое изображение задачи. Схемы воздухообмена 1 (a), 2 (b), 3 (c).

Таблица 1

Величины, входящие в обобщенное безразмерное уравнение переноса

$\Phi$	$\Gamma_\Phi$	$S_\Phi$
1	0	0
$u_i$	$\frac{1}{\text{Re}_e}$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{1}{\text{Re}_e} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{Gr}{\text{Re}^2} \Theta$
$\Theta$	$\frac{1}{\text{Re}_e \text{Pr}_e}$	0
$k$	$\frac{1}{\text{Re}_e \sigma_k}$	$P_k - \varepsilon$
$\varepsilon$	$\frac{1}{\text{Re}_e \sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} P_k - c_{\varepsilon 2} \varepsilon)$

При безразмеривании системы уравнений движения (1) приняты следующие характерные величины: длины —  $L$ , скорости —  $u_*$ , времени —  $L/u_*$ , давления —  $\rho u_*^2$ , разности температур —  $(T_{\max} - T_{\min})$ , кинетической энергии турбулентности —  $k_* = u_*^2$  и скорости диссипации турбулентной энергии —  $\varepsilon_* = k_*^{3/2}/L$ . За характерные масштабы скорости и длины принимаются значения  $u_* = u_{in}$ ,  $L = l_{in}$ . Здесь  $l_{in}$  — размер квадратного входного отверстия;  $u_{in}$  — скорость подаваемого газа.

$$\frac{1}{\text{Re}_e} = \frac{1}{\text{Re}} + \frac{1}{\text{Re}_t}, \quad \frac{1}{\text{Re}_t} = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad \frac{1}{\text{Re}_e \text{Pr}_e} = \frac{1}{\text{Re} \text{Pr}} + \frac{1}{\text{Re}_t \text{Pr}_t},$$

$$P_k = 2 \text{Re}_t^{-1} e_{ij} e_{ji}, \quad e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

Параметры  $c_{\varepsilon 1}$ ,  $c_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_\mu$  — постоянные  $k$ - $\varepsilon$ -модели турбулентности, значения которых приведены в таблице 2.

Система уравнений движения (1) характеризуется следующими безразмерными параметрами подобия:

$$Gr = \frac{g \beta L^3 \rho^2 (T_{\max} - T_{\min})}{\mu^2}, \quad \text{Re} = \frac{\rho u_* L}{\mu}, \quad \text{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda},$$

где  $g$  — составляющая вектора ускорения свободного падения вдоль вертикальной оси  $x_3$ ,  $\beta$  — коэффициент объемного теплового расширения среды,  $c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $\mu$  — динамическая вязкость.

В некоторых случаях удобно использовать “приточное” число Рейнольдса  $\text{Re}_{in}$ , которое может быть выражено через обычное  $\text{Re}$ :  $\text{Re}_{in} = (l_{in}/L) \text{Re}$ . Численные расчеты производились при  $\text{Pr} = 0,71$ ,  $2,2 \cdot 10^3 \leq \text{Re}_{in} \leq 5,4 \cdot 10^4$ . При моделировании

Таблица 2

Постоянные  $k$ - $\varepsilon$ -модели турбулентности

$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$C_\mu$
1,44	1,92	1,0	1,3	0,09

неизотермических течений число Грасгофа находилось в диапазоне  $1,4 \cdot 10^{10} \leq Gr \leq 22,7 \cdot 10^{10}$ . Размеры помещения полагались постоянными и принимали значения  $L_1 = L_2 = L_3 = 15$ . Размеры препятствия равнялись  $L_{obs1} = L_{obs2} = 5$ ;  $0 \leq L_{obs3} \leq 10$ . Указанные значения безразмерных параметров соответствуют, например, размерным величинам  $\rho = 1,0 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $L_1 = L_2 = L_3 = 3 \text{ м}$ ,  $L_{obs1} = L_{obs2} = 1 \text{ м}$ ,  $0 \leq L_{obs3} \leq 2 \text{ м}$ ,  $l_{in} = 0,2 \text{ м}$ ,  $0,2 \leq u_{in} \leq 5 \text{ м/с}$ ,  $T_{min} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $25 \leq T_{max} \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Численное интегрирование уравнения переноса (1) осуществляется методом контрольного объема [8] на разностных сетках, содержащих  $21 \times 21 \times 21$  объемов. Решение системы уравнений движения производится с помощью процедуры SIMPLE. Точность численного решения контролировалась его пересчетом на более подробной разностной сетке. Расхождение результатов расчетов не превышает 5 %. Проверка правильности работы вычислительной программы осуществлялась сопоставлением полученного решения с результатами работ [10, 11]. Результаты тестирования частично представлены в работе [12].

### 3. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДУХООБМЕНА

На рис. 2 представлены характерные расчетные векторные картины изотермического (слева) и неизотермического (справа) течения воздуха для рассмотренных схем подачи воздуха в центральном вертикальном сечении помещения. Здесь и далее размеры помещения выражены в размерах входного отверстия. Демонстрируемые картины течения соответствуют случаю, при котором  $L_{obs3} = 5$ ,  $Re_{in} = 2,2 \cdot 10^4$  и  $Gr = 11,3 \cdot 10^{10}$ .

Рассмотрим характерные картины течения для схемы воздухообмена 1. Для этого проанализируем характер движения воздуха в помещении (рис. 2, *a, b*).

Для данной схемы организации воздухообмена в изотермическом случае характерно то, что струя подаваемого воздуха движется напрямую к выходному отверстию, из-за чего в верхней части расчетной области имеют место наибольшие значения скорости потока. Двигаясь к отверстию, струя воздуха, взаимодействуя трением с воздушными массами внутри помещения, постепенно вовлекает их в движение. Поэтому она постепенно расширяется, а ее импульс уменьшается. Достигнув грани с выходным отверстием, одна часть расширившейся струи покидает помещение через отверстие, другая движется вдоль нее по направлению к нижней и боковым граням. После этого образуется возвратное движение воздушной среды в направлении грани с входным отверстием. Находящееся в центре нижней грани препятствие уменьшает по вертикальной координате размер образовавшейся зоны циркуляции. Между препятствием и правой гранью находится так называемая отсеченная часть циркуляционного потока. Небольшая скорость движения частиц воздуха и направление их движения в этой области свидетельствуют о том, что здесь имеется застойная зона.

Сопоставление рис. 2, *a* и *b* показывает, что введение источника тепла значительным образом влияет на направление и величину скорости воздушной среды. При неизотермическом движении в исследуемом сечении помещения для рассмотренных определяющих параметров наблюдается одна вихревая зона. Она расположена между препятствием и гранью с выходным отверстием и образована нисходящим потоком возле грани и тепловым факелом. В отличие от изотермического течения расположение вихревой области является постоянным, а не смещается

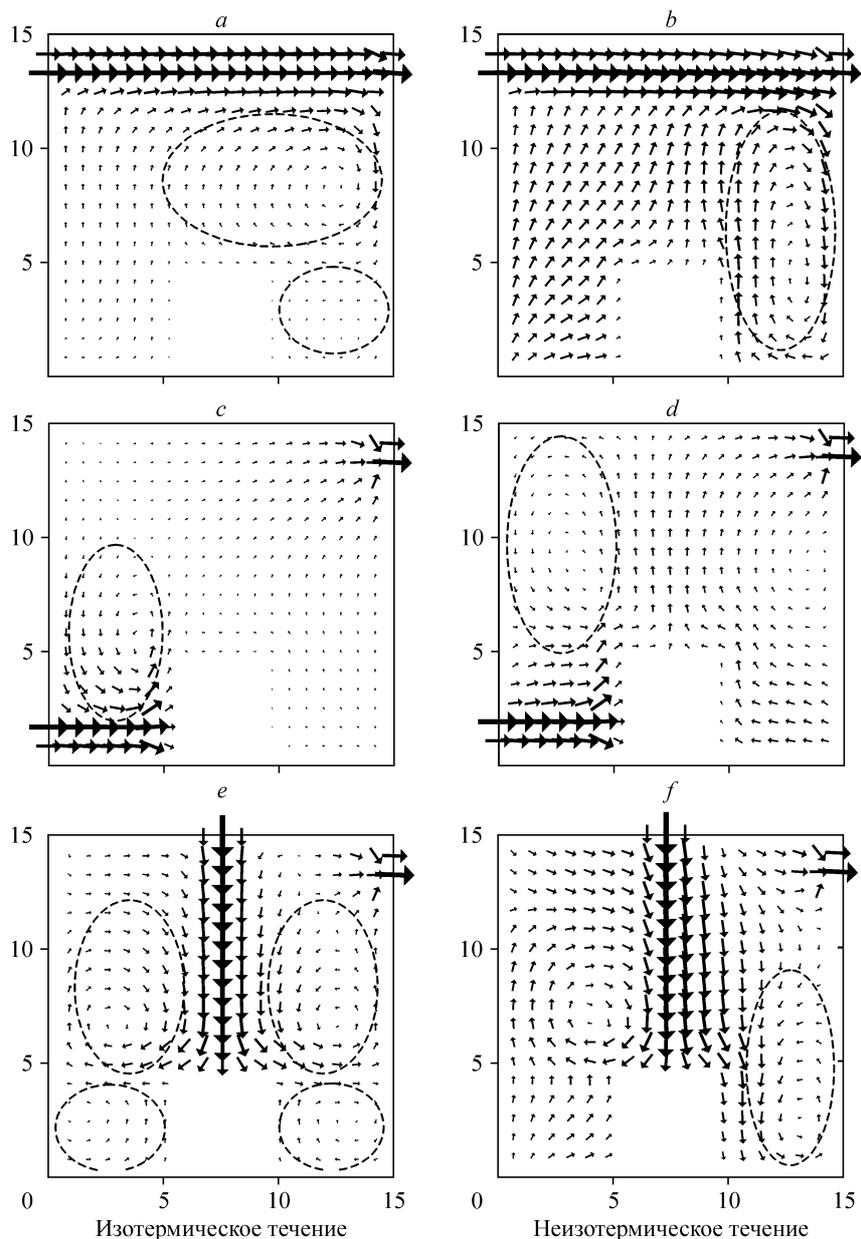


Рис. 2. Поле скорости для различных схем воздухообмена в центральном сечении помещения,  $x_2 = L_2/2$  при  $L_{obs3} = 5$ ,  $Re_{in} = 2,2 \cdot 10^4$  для изотермического и неизотермического течений ( $Gr = 11,3 \cdot 10^{10}$ ).

Схемы воздухообмена 1 (a, b), 2 (c, d), 3 (e, f).

с увеличением числа Рейнольдса. Следует также отметить, что в некоторых точках помещения локальные значения скорости потока для одних и тех же значений параметров  $L_{obs3}$  и  $Re_{in}$  при неизотермическом движении в 2–10 раз больше, чем при изотермическом.

Рассмотрим характерные картины течения для схемы воздухообмена 2. Расчетные картины течения воздуха для схем вентиляции 2 в центральном сечении помещения при рассматриваемых значениях определяющих параметров показаны на рис. 2, c, d.

Для этой схемы подачи и отвода воздуха существенным фактором, влияющим на характер изотермического движения воздуха, является наличие препятствия. Можно выделить следующие области ярко выраженного вихревого движения: между стенкой с входным отверстием и препятствием и сбоку от препятствия. Поток поступающего воздуха, достигнув стенки препятствия, веерообразно отражается от него и возвратным движением образует зону вихревого движения. За счет взаимодействия данного вихря с воздушной средой помещения возле боковых граней препятствия также образуется область завихрения потока. Для этой схемы организации воздухообмена, как и для предыдущей, характерна зона низкой подвижности воздуха за препятствием. Среди достоинств рассматриваемой схемы воздухообмена стоит отметить, что при данных определяющих параметрах в верхней части помещения отсутствуют застойные вихревые зоны, и течение среды направлено к выходному отверстию.

Для смешанно-конвективного режима течения характерно существенное влияние высоты источника тепла на величину скорости потока воздуха. Локальные значения скорости над препятствием при смешанно-конвективном движении примерно в 8 раз больше, чем при изотермическом. В других частях помещения локальная скорость воздушного потока отличается приблизительно в 2 – 3 раза. Влияние изменения высоты теплового источника на направление течения воздуха менее значительно, поскольку для обоих рассматриваемых режимов течения совпадает направление восходящего движения среды над препятствием. Различие наблюдается в верхней части помещения, где при смешанно-конвективном движении происходит “растекание” восходящего конвективного факела вдоль верхней грани. По этой причине в верхнем левом углу помещения образуется застойная вихревая область.

Рассмотрим далее характерные картины течения для схемы воздухообмена 3. На рис. 2, *e*, *f* приведены типичные векторные поля скорости течения воздуха для данной схемы организации воздухообмена в центральном сечении помещения при рассматриваемых значениях определяющих безразмерных параметров.

Из представленных картин течения видно, что для схемы подачи воздуха 3 движение приточной воздушной струи ограничено высотой препятствия. Дойдя до препятствия, в изотермическом случае, поток среды растекается по нему в направлении боковых граней помещения. Достигнув их, воздух направляется вверх, образуя вихревое движение в помещении. При движении к боковым граням, поток среды вовлекает в движение воздух между препятствием и боковыми стенками помещения. Благодаря этому в нижней части помещения при данных определяющих параметрах вокруг препятствия имеет место торообразное движение воздуха.

Из сравнения рис. 2, *e* и *f* видно, что использование препятствия в качестве теплового источника значительно влияет на скорость воздушного потока. Как и в схемах вентилирования 1 и 2, в схеме 3 происходит увеличение скорости потока по сравнению с аналогичным изотермическим течением. В среднем локальные значения скорости увеличиваются примерно в два раза. Взаимодействие противоположно направленных от источника приточной струи и теплового факела приводит к тому, что струя несколько искривляется в сторону грани с выходным отверстием. Из-за этого часть струи обтекает препятствие, достигает нижней части помещения и образует вихревую зону в пространстве между препятствием и гранью с выходным отверстием. Поднимающийся тепловой факел практически подавляется струей приточного воздуха при данных параметрах задачи.

#### 4. ВЛИЯНИЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ

*Размеры препятствия.* Для рассматриваемых схем подачи воздуха на рис. 3 изображены поля скорости изотермического течения воздуха в центральном сечении помещения при  $Re_{in} = 2,2 \cdot 10^4$ ,  $L_{obs3}$  равных 0 и 10 (напомним, что картины течения для соответствующего числа Рейнольдса и  $L_{obs3} = 5$  представлены слева на рис. 2).

Из сопоставления рис. 2 и 3 видно, что для схемы воздухообмена 1 при варьировании высоты препятствия общая структура течения воздуха остается практически неизменной. Основное отличие полей скорости существует в области между

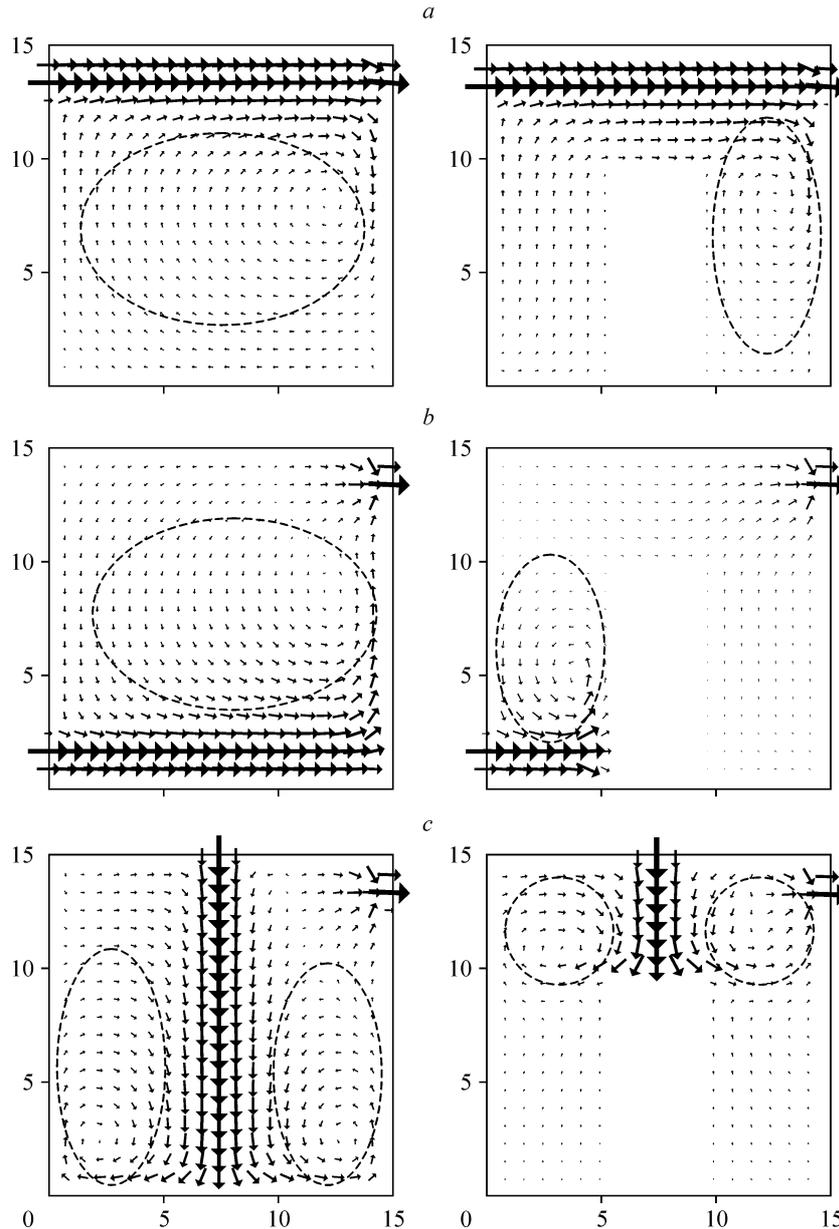


Рис. 3. Поле вектора скорости для различных схем воздухообмена в центральном сечении помещения,  $x_2 = L_2/2$  при  $Re_{in} = 2,2 \cdot 10^4$ ,  $L_{obs3} = 0$  (слева) и 10 (справа).

Схемы воздухообмена 1 (a), 2 (b), 3 (c).

препятствием и гранью с выходным отверстием. При отсутствии препятствия для этой зоны характерно течение воздуха, вовлеченного в общее циркуляционное движение (см. рис. 3, *a*, слева). С появлением препятствия и увеличением его высоты здесь образуется застойная зона по всей высоте препятствия. Необходимо отметить, что при  $L_{obs3} = 10$  в верхней части этой застойной области между препятствием и гранью с выходным отверстием присутствует зона циркуляции воздуха, а при  $L_{obs3} = 5$  такое движение не наблюдается. Заслуживает внимания также тот факт, что в другой зоне помещения, между препятствием и гранью с входным отверстием, наличие или отсутствие препятствия практически не влияет на восходящий воздушный поток.

Рассмотрим влияние препятствия на течение воздуха для схемы организации вентилирования 2 (см. рис. 3, *b*).

Приведенные картины течения свидетельствуют о существенном воздействии препятствия на общее движение воздуха в помещении. При этом высота самого препятствия не оказывает заметного влияния на величину и направление скорости воздушного движения. В случае  $L_{obs} = 0$  в нижней части помещения присутствуют высокие скорости движения среды, но при  $L_{obs3}$  равным 5 и 10 большая подвижность воздуха имеет место лишь между препятствием и входным отверстием. Также на данных рисунках хорошо видно, что высота препятствия не оказывает влияния на течение за самим препятствием. Оно вносит такое необходимое возмущение в поток, при котором часть воздуха, движущаяся в верхней части помещения, перемещается непосредственно к выходному отверстию. В случае же отсутствия препятствия значительная часть воздуха в верхней зоне помещения движется от отверстия.

Рис. 3, *c* иллюстрирует сильное влияние препятствия на перемещение и скорость воздушных потоков для схемы воздухообмена 3. Для этой схемы вентилирования характерны довольно низкие скорости среды в пространстве между препятствием и боковыми гранями помещения, но высокие — над препятствием. При прочих равных условиях, варьирование высоты препятствия может значительно влиять на характер течения между препятствием и боковыми гранями. При  $Re_{in} = 2,2 \cdot 10^4$  и  $L_{obs3} = 5$  происходит тороидальное движение воздуха, а в случае  $L_{obs3} = 10$  такое движение не наблюдается. С увеличением высоты препятствия струя приточного воздуха оказывается более стесненной, глубина ее проникновения в помещение уменьшается, поэтому скорость среды в пространстве ниже высоты препятствия уменьшается. Над самим препятствием имеется образованная приточной струей торообразная зона вихревого движения, положение которой меняется с увеличением высоты препятствия. Из приведенных полей скоростей можно сделать вывод, что с варьированием высоты препятствия, учитывая особенности рассматриваемой схемы, имеется возможность регулирования размеров и расположения вихревых и застойных зон.

*Скорость подаваемого воздуха.* На рис. 4 для рассматриваемых схем подачи воздуха показаны расчетные поля скорости изотермического течения воздуха в центральном сечении помещения при  $L_{obs3} = 5$ ,  $Re_{in}$  равных  $2,2 \cdot 10^3$  и  $5,4 \cdot 10^4$  (картины течения для значений  $L_{obs3} = 5$  и  $Re_{in} = 2,2 \cdot 10^4$  изображены слева на рис. 2).

Обратимся к результатам расчетов для схемы вентилирования 1 (рис. 4, *a*). Представленные поля скоростей показывают значительное влияние скорости подаваемого воздуха на структуру течения в расчетной области. В случае небольших

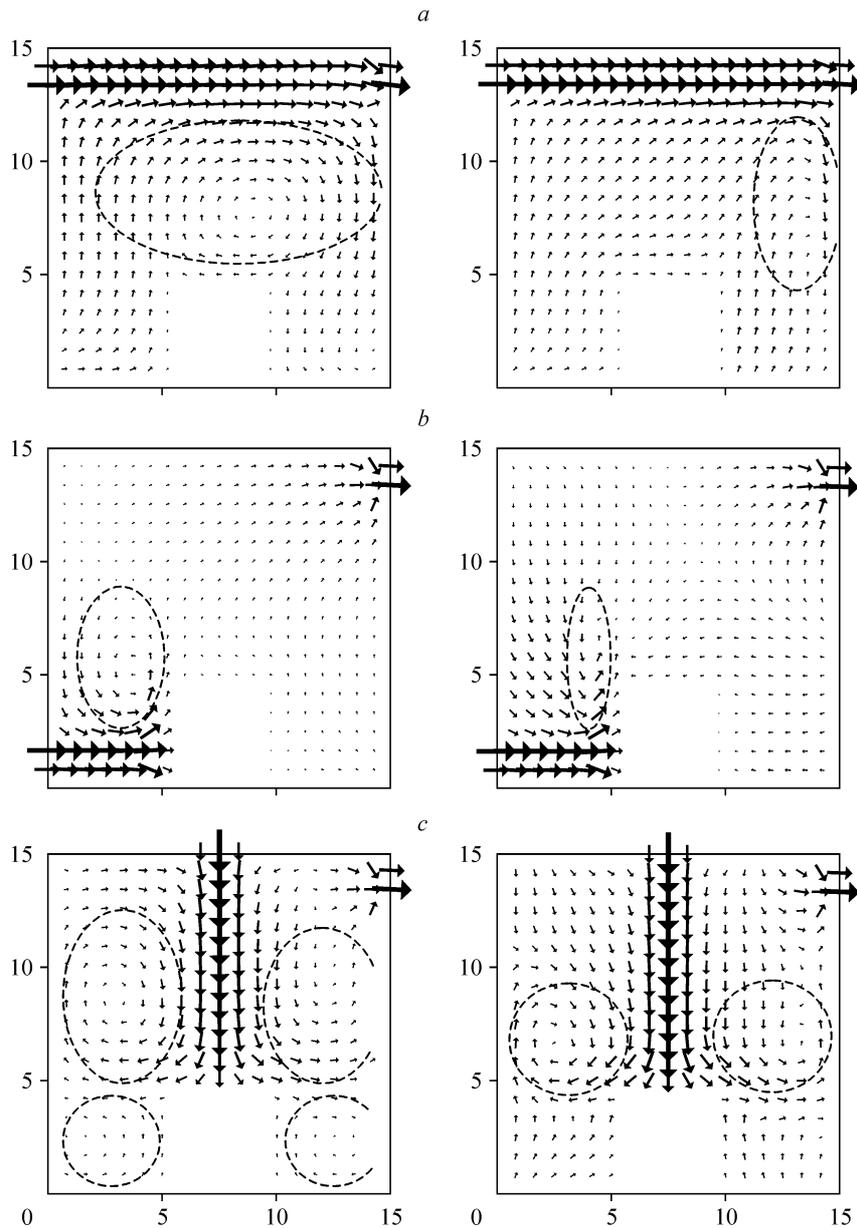


Рис. 4. Поле вектора скорости для различных схем воздухообмена в центральном сечении воздухообмена помещения,  $x_2 = L_2/2$  при  $L_{obs3} = 5$ ,  $Re_{in} = 2,2 \cdot 10^3$  (слева) и  $2,2 \cdot 10^4$  (справа).

Схемы воздухообмена 1 (a), 2 (b), 3 (c).

расходов приточного воздуха в помещении имеет место ярко выраженное циркуляционное течение среды, вовлекаемое в движение приточной струей. Так называемый центр завихрения находится над препятствием, примерно посередине помещения.

При увеличении приточного числа Рейнольдса до  $Re_{in} = 2,2 \cdot 10^4$  происходит заметное смещение вихря к грани с выходным отверстием за счет взаимодействия со струей подаваемого воздуха. Дальнейшее возрастание числа Рейнольдса приводит к деформированию вихря вблизи границы, в результате чего он становится более вытянутым. На основании представленных полей течений можно заключить, что данная схема подачи воздуха является наиболее эффективной в случае

$Re_{in} \approx 5,4 \cdot 10^4$ , поскольку при этом в помещении наблюдается четко выраженное течение к выходному отверстию без замкнутых вихревых зон.

Рассмотрим влияние скорости приточного газа на течение воздуха в помещении для схемы вентиляции 2 (см. рис. 4, *b*). Сопоставление картин течения для вариантов  $Re_{in}$  равных  $2,2 \cdot 10^3$  и  $2,2 \cdot 10^4$  показывает, что при варьировании числа Рейнольдса в данном диапазоне направление и величина вектора безразмерной скорости остается практически без изменения. В случае же  $Re_{in} = 5,4 \cdot 10^4$  (см. рис. 4, *b*, справа) вихревое движение в зоне между входным отверстием и препятствием оказывается прижатым приточной струей к границе препятствия. Необходимо обратить внимание на то, что, в целом, в помещении при увеличении расхода воздуха преобладает движение среды, направленное от выходного отверстия. Это отчетливо видно на рис. 4, *b* (вариант  $Re_{in} = 2,2 \cdot 10^4$ ), где в верхнем левом углу сечения течение воздуха направлено вниз, а над препятствием и в области за препятствием — в сторону входного отверстия. Такое поведение воздушного потока позволяет сделать вывод, что данная схема организации воздухообмена при больших скоростях подачи воздуха становится неэффективной.

На рис. 4, *c* представлены поля скоростей воздуха в помещении для схемы вентиляции 3 при различных значениях  $Re_{in}$ . Для этой схемы вентиляции движение среды характеризуется двумя тороидальными областями течения. Первая тороидальная область движения образована приточной струей и располагается над препятствием, а вторая — в пространстве между препятствием и боковыми границами в помещении. Положение и наличие этих областей течения существенно зависит от скорости подаваемого воздуха. Из приведенных рисунков видно, что первая область течения (над препятствием) существует как при низких, так и при высоких скоростях приточного воздуха. Однако в случае небольших скоростей подачи ( $Re_{in} \leq 2,2 \cdot 10^4$ ) течение этой области занимает практически все пространство над препятствием. При увеличении скорости подаваемого воздуха тороидальное течение среды опускается ближе к препятствию. Вторая область течения (вокруг препятствия) имеет вид тора лишь при  $Re_{in} \leq 2,2 \cdot 10^4$  и  $L_{obs3} = 5$ . Наличие замкнутой тороидальной области движения вокруг препятствия в большинстве случаев может быть нежелательно при организации воздухообмена. Поэтому в такой схеме вентиляции для эффективного воздухопереноса в нижней части помещения предпочтительны высокие скорости подаваемого газа.

## 5. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

На рис. 5 изображены расчетные зависимости безразмерных средних и максимальных скоростей ( $\langle U \rangle_V$  и  $U_{max}$ ) движения воздуха в рабочей зоне помещения от числа  $Re_{in}$  и высоты препятствия  $L_{obs3}$  для соответствующих схем организации воздухообмена. Для исследуемого случая высота рабочей зоны принята равной  $x_3 = L_3 / 2 = 7,5$ .

Рассмотрим зависимости, характеризующие схему вентиляции 1 (рис. 5, *a*). Видно, что для данной схемы рассматриваемые скорости воздуха в рабочей зоне помещения практически не зависят от параметра  $Re_{in}$ . Полученные зависимости свидетельствуют о том, что наибольшие скорости движения воздуха в этой зоне слабо зависят от высоты препятствия в случае его небольшой высоты и равны  $\sim 0,12$ . Однако при высоте препятствия  $L_{obs3} = 10$  величина максимума

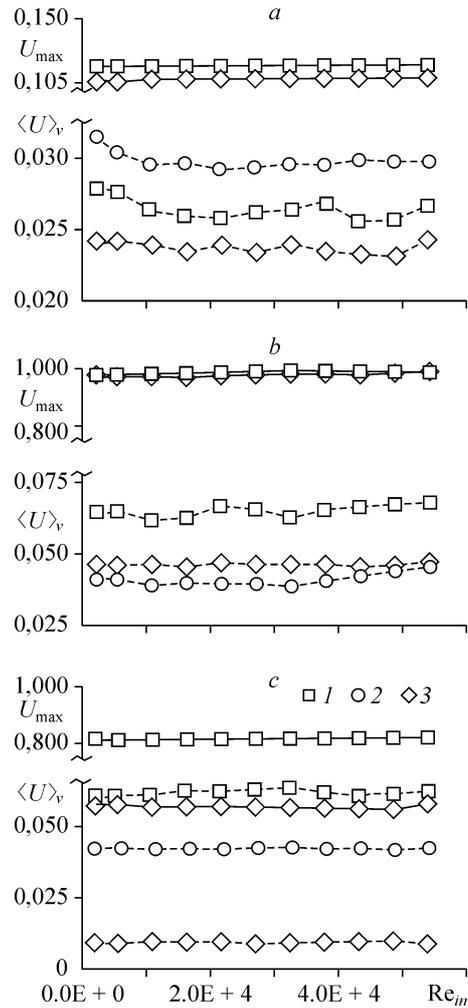
Рис. 5. Зависимости безразмерных средних и максимальных скоростей движения воздуха в рабочей зоне помещения от числа  $Re_{in}$  и параметра  $L_{obs3}$  для различных схем воздухообмена.

$L_{obs3} = 0$  (1), 5 (2), 10 (3);  $U_{max}$  — сплошная линия,  $\langle U \rangle_v$  — пунктир. Схемы 1 (a), 2 (b), 3 (c).

скорости в рабочей зоне уже примерно на 10 % меньше. По-другому происходит изменение средней скорости воздушного движения. Здесь наибольшее значение наблюдается при  $L_{obs3} = 5$  и равно  $\sim 0,029$ . Увеличение высоты препятствия в 2 раза уменьшает среднюю скорость движения в рабочей зоне приблизительно на 20 %. Промежуточное положение между линиями для  $L_{obs3}$  равным 5 и 10 занимает зависимость для  $L_{obs3} = 0$ .

Обратимся к рассматриваемым зависимостям интегральных параметров потока, характерным для схемы воздухообмена 2 и показанным на рис. 5, b. Для этой схемы вентилирования, как и для рассмотренной выше, максимальная и средняя скорости движения среды довольно слабо зависят от числа Рейнольдса. Из графика также видно, что максимальные скорости воздуха для различных значений высоты препятствия, практически совпадают и очень близки к единице. Это объясняется наличием входного отверстия в нижней части рабочей зоны, благодаря чему максимум скорости потока находится возле отверстия. Несколько иная ситуация наблюдается со средними значениями скорости воздуха. Приведенные зависимости показывают, что высота препятствия очень слабо влияет на значение средней скорости движения, равной примерно  $0,04 \div 0,045$ . Однако в случае отсутствия препятствия это значение примерно в 1,5 раза выше и составляет порядка  $0,065$ .

На рис. 5, c представлены зависимости, отражающие поведение максимальной и средней по рабочей зоне скоростей при изменении параметров  $Re_{in}$  и  $L_{obs3}$  для схемы вентилирования 3. Данный рисунок, как и рис. 5, a, b, демонстрирует практическое отсутствие зависимости максимальной и средней скорости от числа  $Re_{in}$ . В то же время для схемы 3 характерно значительное влияние высоты препятствия на интегральные величины воздушного потока. Средняя скорость воздуха в рабочей зоне немонотонно увеличивается с уменьшением высоты препятствия. Видно, что для  $L_{obs3} = 10$  значение средней скорости равняется  $\sim 0,01$ , для  $L_{obs3} = 5$  — порядка  $0,04$ , а для  $L_{obs3} = 0$  эта величина составляет около  $0,06$ .



Другое поведение в зависимости от высоты препятствия характерно для максимальной скорости движения. На рисунке хорошо видно, что варьирование высоты препятствия в пределах высоты рабочей зоны практически не оказывает влияния на максимальную скорость воздуха в этой зоне. В случае, когда высота препятствия значительна ( $L_{obs3} = 10$ ), максимальная скорость движения среды почти в пятнадцать раз ниже.

### ВЫВОДЫ

В результате математического моделирования принудительного изотермического и неизотермического воздухообмена в помещении можно сделать следующие выводы:

1. Для схемы вентилирования 1 установлено, что высота препятствия не оказывает существенного влияния на структуру течения в помещении. Для схемы 2 значительное воздействие на картину течения производит наличие препятствия, с увеличением высоты которого в объеме помещения начинает преобладать течение, направленное к выходному отверстию. Показано, что высота помещения значительным образом влияет на поле течения, а также на максимальные и средние скорости в рабочей зоне для схемы воздухообмена 3.

2. Установлено, что варьирование числа Рейнольдса при  $L_{obs3} = 5$  несущественно влияет на безразмерные значения максимальной и средней скорости воздуха в рабочей зоне помещения, но значительно определяет структуру вентиляционного течения. Выявлено, что в схеме вентилирования 1 над препятствием имеет место зона вихревого движения, которая смещается к грани с выходным отверстием при увеличении числа Рейнольдса, а при  $Re_{in} \approx 5,4 \cdot 10^4$  сильно деформируется у границы. Для схемы 2, при увеличении числа Рейнольдса, в помещении в целом преобладает движение, направленное от выходного отверстия. Найдено, что при схеме подачи воздуха 3 для  $L_{obs3} = 5$  и  $Re_{in} \leq 2,2 \cdot 10^4$  между препятствием и боковыми гранями помещения имеет место тороидальное течение среды.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов А.А., Гудзовский А.В. Возмущение однонаправленного потока воздуха в чистой комнате со стороны подвижного тела // Сб. докл. 5-й Конф. ассоц. инж. по контролю микрозагрязнений. — М.: 1995. — С. 40–44.
2. Артемов В.И., Яньков Г.Г., Ливчак А., Хортанайнен П. Влияние распределения тепловых источников в помещении на производительность кондиционеров различного типа // Тр. Вт. Росс. национ. конф. по теплообмену. Т. 3. Свободная конвекция. Тепломассообмен при химических превращениях. — Изд. МЭИ, 1998. — С. 33–37.
3. Гуцин В.А., Кононов И.Н. Применение методов вычислительной гидродинамики в практике проектирования чистых комнат и их элементов // Технология чистоты. — 1994. — № 2. — С. 24–26.
4. Беляев К.В. Моделирование конвективного тепло- и массообмена в системах вентиляции и кондиционирования помещений и охлаждения электронного оборудования на основе уравнений Рейнольдса: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — СПб., 2000. — 150 с.
5. Пузач С.В., Казеннов В.М. Некоторые закономерности тепломассообмена при пожаре в помещении // Инж.-физ. журн. — 2002. — Т. 75, № 5. — С. 130–137.
6. Davidson L., Nielsen P.V. Large eddy simulations of the flow in a three-dimensional ventilated room // Proc. of the 5th Intern. Conf. on Air Distributions in Rooms, ROOMVENT '96, July 17-19, Yokohama, Japan. — 1996. — Vol. 2. — P. 161–168.
7. Denev J., Stankov P., Stoyanov D., Spassov P. Numerical and experimental assessment of a flow field in a ventilated industrial hall // Proc. of the 7th Intern. IBPSA Conf., Building Simulation '97, September 8-10, 1997, Prague, Czech Republic. — 1997. — Vol. 2. — P. 335–342.
8. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 150 с.

9. **Launder B.E., Spalding D.B.** The numerical computation of turbulent flows // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. — 1974. — Vol. 3, № 1. — P. 269–289.
10. **Артемьев В.К., Гинкин В.П.** Численное моделирование трехмерной естественной конвекции // Тр. Вт. Росс. национ. конф. по теплообмену. Т. 3. Свободная конвекция. Тепломассообмен при химических превращениях. — Изд. МЭИ, 1998. — С. 38–41.
11. **Кабачков Я.И., Майорова А.И.** Турбулентное течение в прямоугольной выемке в стенке плоского канала // Инж.-физ. журн. — 1984. — Т. 46, № 3. — С. 363–370.
12. **Кутушев А.Г., Костоломов И.В., Родионов С.П.** Численное моделирование свободно-конвективных течений воздуха и теплообмена в замкнутом объеме // Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. Тр. 13 Школы-семинара мол. ученых и спец. под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева. — М.: Изд. МЭИ, 2001. — Т. 1. — С. 165–168.

*Статья поступила в редакцию 14 декабря 2004 г.*