

ным затратам получают при использовании островной модели генетического алгоритма.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барсегян А. А. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод // Учебное пособие — СПб : БХВ-Петербург. — 2004.
2. Яминов Б. Генетические алгоритмы: Дискретная математика: алгоритмы / Б. Яминов // Санкт-Петербургский государственный университет. — 2005.
3. P. Larran Aga. Genetic Algorithms for the Travelling Salesman Problem: A Review of Representations and Operators / P. Larran Aga, C.M.H. Kuijpers, R.H. Murga, I. Inza, S. Dizdarevic // Artificial Intelligence Review 13 — Netherlands : Kluwer Academic Publishers. — 1999 — pp. 129—170.
4. Кошевой Н. Д. Оптимальное планирование эксперимента при исследовании качества технологических процессов / Н. Д. Кошевой, М. В. Цеховской, В. А. Дергачев, В. В. Сытник, Е. А. Сухобрус, Е. М. Костенко // Якість технологій та освіти. — X : Украинская инженерно-педагогическая академия, 2011 г. — Вып. 2. — С. 26—32.
5. Кошевой Н. Д. Экспериментальное исследование, моделирование и оптимизация процесса гальванического меднения печатных плат / Н. Д. Кошевой, С. Г. Бестань, Г. К. Кожевников, О. Н. Кошевой, Н. В. Доценко // Математическое моделирование. — Днепродзержинск : Днепродзержинский государственный технический университет, 2001 г. — Вып. 1. — С. 28—30.
6. Кошевой Н. Д. Оптимальное планирование эксперимента при исследовании устройства для контроля качества диэлектрических материалов / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко, А. В. Заболотный // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. X : Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 2009 г. — Вып. 147. — С. 38—42.
7. Кошовий М. Д. Комп'ютерна програма "Програма пошуку оптимальних багаторівневих комбінаторних планів багатofакторного експерименту" / М. Д. Кошовий, О. М. Костенко, В. А. Дергачов // Свід. про реєстр. автор. права на твір № 31824. — Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін. освіти і науки України. — Реєстр. 28.01.2010 р. пост. 26.04.2013

## Моделирование течения в плоском воздуховоде при помощи пакета прикладных программ COMSOL

Н. С. ТИМОШЕНКО

Донецкий национальный университет

Проведено сравнение существующих теоретических и экспериментальных решений задачи о плоской турбулентной свободной струе с численным решением при помощи пакета прикладных программ COMSOL. Показано хорошее совпадение безразмерных профилей скоростей теоретического, экспериментального и численного решения. Поставлена и решена задача о всасывании воздуха линейным воздуховодом с отверстием на одной из его стенок. Сделан вывод об адекватности методов численного решения и возможности использования их для решения более сложных гидродинамических задач.

Виконано порівняння існуючих теоретичних та експериментальних розв'язань задачі про плоский турбулентний вільний струмінь з чисельним розв'язанням за допомогою пакету прикладних програм COMSOL. Показано хороший збіг безрозмірних профілів швидкостей теоретичного, експериментального і чисельного рішення. Поставлена і вирішена задача про всмоктування повітря лінійним воздуховодом з отвором на одній з його стінок. Зроблено висновок про адекватність методів чисельного рішення і можливості використання їх для вирішення більш складних гідродинамічних завдань.

A comparison of the existing theoretical and experimental solution of the problem of plane turbulent free jet with the numerical solution in software package COMSOL was conducted. The good coincidence of the dimensionless velocity profiles of the theoretical, experimental and numerical solutions is shown. The problem of the linear exhaust duct with a slot on one of its walls was posed and solved. It was concluded that the numerical solutions are adequate and can be used for more complex hydrodynamic problems.

**Введение.** Для исследования поля скоростей в вытяжном воздуховоде с поперечными щелями переменной ширины в работе [1] используется пакет прикладных программ COMSOL, в котором решение производится методом конечных элементов с использованием уравнений Навье-Стокса и неразрывности. Исследуемый воздуховод представляет собой линейный канал

постоянного сечения с несколькими поперечными щелями разной ширины, расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга на одной из боковых поверхностей газохода. Левый торец воздуховода заглушен, а через правый производится отсос газа. Такая конструкция позволяет организовать плоское течение и обеспе-

чить равномерный приток воздуха через щели воздуховода.

В работе [2] проводится сравнение результатов численного моделирования и эксперимента, проведенного на модели плоского линейного воздуховода. Расхождение результатов находится в пределах 15%, что является допустимым для подобных экспериментов, однако полезно было бы получить подтверждение адекватности численных методов, используемых пакетом COMSOL для решения таких задач.

**Постановка проблемы.** По конкретной модели воздуховода данных теоретических и экспериментальных исследований практически нет. Есть только теоретические расчеты, связанные с определением расхода через щель на основании площади отверстий и полного расхода [3]. Поэтому было решено провести сравнительный анализ на модели плоской турбулентной свободной струи, которая является частью исследуемой модели воздуховода. Всасывание воздуха щелями воздуховода представляет собой отдельные струи, которые в середине канала накладываются и перемешиваются. На входе в щель поток можно рассматривать как плоскую свободную струю. Распределение скоростей в плоской турбулентной свободной струе хорошо изучено теоретически и экспериментально. В связи с этим, интерес представляет проведение численного моделирования такой струи и последующие сравнение полученных профилей скоростей с существующими теоретическими и экспериментальными исследованиями. Это позволит сделать вывод о возможности дальнейшего использования пакета COMSOL для решения более сложных задач, как, например, изучение поля скоростей в описанной выше модели вытяжной воздуховода.

**Теоретическое и экспериментальное решение задачи о свободной турбулентной струе.** Потoki жидкости, не ограниченные никакими стенками относятся к области свободной турбулентности [4]. Свободная струя представляет собой частный случай свободной турбулентности. Свободная струя возникает при истечении жидкости из отверстия или насадка. Вскоре после выхода из отверстия, свободная струя становится турбулентной и частично смешивается с окружающей ее покоящейся жидкостью. Струя увлекает за собой граничащую с ней жидкость, вследствие чего увеличивается расход через поперечное сечение струи по мере удаления от отверстия. При этом струя расширяется, а скорость ее уменьшается, но полный импульс струи остается постоянным. Предполагается, что во входном отверстии величина и направление скорости постоянны по всему сечению. Далее по потоку ядро с постоянной скоростью убывает, а с краев образуется область заторможенной жидкости. Участок от входного отверстия до окончания ядра струи называется начальным участком. Далее идет основной участок, в котором область постоянных скоростей отсутствует. С ростом продольной координаты  $x$  ширина струи увеличивается, а скорость на оси струи убывает.

Поскольку при свободной турбулентности турбулентное трение во много раз больше ламинарного трения по всей области течения, ламинарным трением можно полностью пренебречь. Турбулентные течения без ограничивающих стенок обладают свойствами, характерными для пограничного слоя: протяжение течения в поперечном направлении мало по сравнению с

протяжением в продольном направлении, в поперечном направлении всегда имеет место значительный градиент скорости. Следовательно, для расчета свободной турбулентности можно использовать дифференциальные уравнения пограничного слоя, которые для плоской задачи имеют вид [4,5]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

где  $u, v$  - горизонтальная и вертикальная компоненты скорости,  $\tau$  - касательное напряжение, обусловленное турбулентным трением,  $\rho$  - плотность жидкости,  $t$  - время. (1) – уравнение движения, (2) - уравнение неразрывности.

В уравнении движения (1) опущен член, зависящий от давления, поскольку во всех случаях свободной турбулентности давление можно считать в первом приближении постоянным.

Для интегрирования уравнения (1) и (2) необходимо связать турбулентное касательное напряжение с величинами, характеризующими основное движение. Это возможно сделать при помощи одной из полуэмпирических формул, описанных в [4], результаты которых отличаются незначительно. Рекомендуется использовать формулу Прандтля для коэффициента турбулентного обмена:

$$\tau = A \frac{\partial u}{\partial y},$$

где  $b$  - ширин зоны перемешивания,  $\chi_1$  - эмпирическая постоянная,  $A = \rho \varepsilon = \rho \chi_1 b (u_{\max} - u_{\min})$  - коэффициент турбулентного обмена, принимаемый постоянным по всей ширине зоны перемешивания и зависящий только от расстояния от входного отверстия  $x$ .

Далее для решения уравнений (1) и (2), необходимо найти оценки, позволяющие судить о законе возрастания ширины зоны перемешивания и о законе уменьшения максимальной ординаты профиля скорости по мере увеличения расстояния  $x$ . Принято считать, что длина пути перемешивания  $l$  пропорциональна ширине зоны перемешивания струи,  $b$ :

$$\frac{l}{b} = \beta = const$$

Показано [4], что происходит возрастание ширины зоны перемешивания  $b$  с увеличением расстояния

$$b = \text{число} \cdot x \quad (3)$$

Для определения связи между  $u_{\max}$  и  $x$  используется теорема импульсов. Учитывая, выражение (3), получим:

$$u_{\max} = \text{число} \cdot \frac{1}{\sqrt{x}} \sqrt{\frac{J'}{\rho}}, \quad (4)$$

где  $J'$  импульс массы жидкости, проходящей в единицу времени через поперечное сечение плоской струи высотой в единицу.

То есть, ширина зоны перемешивания плоской струи увеличивается пропорционально  $x$ , а скорость уменьшается пропорционально  $\frac{1}{\sqrt{x}}$ .

Сравнение теоретического расчета и результатов экспериментального исследования плоской турбулентной свободной струи приведено в [4]. Теоретический расчет плоской турбулентной струи, выполненный Рейхардтом и Гертлером, позволил получить компоненты скорости струи в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{J\sigma}{\rho x}} (1 - th^2 \eta), \\ v = \frac{\sqrt{3}}{4} \sqrt{\frac{J}{\rho x \sigma}} (2\eta(1 - th^2 \eta) - th \eta), \\ \eta = \sigma \frac{y}{x}. \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $\eta = \sigma \frac{y}{x}$ ,  $J$  - импульс, отнесенный к единице длины струи,  $\sigma$  - эмпирическая постоянная, которая в измерениях Рейхардта получила значение  $\sigma = 7,67$ . Теоретическое распределение скоростей в струе, а так же результаты измерений, выполненные Фертманом, будут приведены далее на сравнительном графике, где так же будут отображены результаты компьютерного моделирования.

Для дальнейшего исследования плоской турбулентной свободной струи важно ее следующее качество. Все профили скоростей в струе афинны между собой, т.е. профили скоростей, получающиеся на различных расстояниях  $x$  от начальной точки, могут быть приведены в совпадение один с другим путем соответствующего выбора масштабов для скорости и ширины.

**Моделирование свободной струи в COMSOL.** Численное решение задачи о свободной турбулентной струе при помощи пакета прикладных программ дает возможность проверить метод, на котором этот пакет базируется на предмет адекватности расчетов подобных течений. Хорошее совпадение результатов моделирования течения струи в пакете COMSOL с результатами, описанными в теоретических и экспериментальных исследованиях, даст возможность использовать аналогичные решатели и граничные условия для решения более сложных гидродинамических задач.

Для решения задачи о плоской турбулентной свободной струе были выбраны пакеты прикладных программ Cosmos FloWorks и COMSOL. Первый пакет базируется на оболочке SolidWorks моделирования конструкций с последующим решением пакетом FloWorks. Особенность этой оболочки заключается в том, что конструирование происходит только в трехмерном виде, а значит, для получения плоского решения, необходимо затратить мощности на решение 3D задачи, а затем отобразить плоское решение, построив нужное сечение.

Другой пакет – COMSOL позволяет решать как трехмерные, так и двумерные задачи. А значит, решение в этом пакете будет происходить быстрее и точнее, поскольку за счет использования двумерной модели можно сильнее измельчить сетку. Из этих соображений для моделирования плоской турбулентной свободной струи был выбран пакет COMSOL.

Пакет прикладных программ COMSOL предназначен для моделирования и решения инженерных задач на основе уравнений в частных производных. Решение производится методом конечных элементов [6].

Расчет данной задачи проводится в рамках  $k - \varepsilon$  - модели турбулентности для вязкой несжимаемой жидкости с использованием уравнения Навье-Стокса (6) и уравнения неразрывности (7).

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + (\eta + \eta_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \mathbf{F} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

где  $\rho$  - плотность,  $\mathbf{u}$  - поле скоростей,  $p$  - давление,  $\mathbf{F}$  - объемная сила  $\eta$  - динамическая вязкость,  $\eta_T$  - эффективная турбулентная вязкость.

Моделируется воздушная струя с такими начальными параметрами:

$U_0 = 20 \text{ м/с}$  – начальная скорость (скорость, с которой струя вытекает из отверстия);

$\rho = 1,21 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  - плотность воздуха;

$\mu = 17,9 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$  – динамическая вязкость;

$P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$  – атмосферное давление.

Геометрические параметры были заданы следующие: ширина входного отверстия - 0,015 м, расчетная область (мнимые стенки) – 0,3 x 0,15 м. Толщина стенок не учитывается. Параметры подбирались пропорционально параметрам теоретического исследования [3], а так же из соображений влияния границ расчетной области на параметры течения.

Были выбраны следующие граничные условия (рис.1):

**1 – вход (inlet, velocity)** – граничное условие, характеризующее границу, на которой предполагается вход жидкости в расчетную область:

$$\vec{u} = \vec{u}_0, \quad k = \left( \frac{3I_T^2}{2} \right) (\vec{u}_0 \cdot \vec{u}_0), \quad \varepsilon = C_\mu^{0,75} \frac{k^{1,5}}{L_T},$$

где  $I_T$  - турбулентная напряженность,  $L_T$  - характерная турбулентная длина.

**2,3 – стенка (logarithmic wall function)** - граничное условие, означающее наличие твердой стенки и описывающее особенности турбулентного потока в пристеночной области:

$$\vec{n} \cdot \vec{u} = 0,$$

$$\left[ (\eta + \eta_T)(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) \right] \vec{n} = \left[ \frac{\rho C_\mu^{0,25} k^{0,5}}{\ln(\delta_W^+)} \kappa + C^+ \right] \vec{u},$$

$$\vec{n} \cdot \nabla k = 0, \quad \varepsilon = \frac{C_\mu^{0,75} k^{1,5}}{\kappa \delta_W^+},$$

где  $\delta_W$  – расстояние от стенки, на котором начинается

расчетная область,  $\delta_W^+ = \frac{\delta_W \rho C_\mu^{0,25} k^{0,5}}{\eta}$  - расстояние от

стенки в единицах вязкости,  $\kappa = 0,42$  - константа Кармана,  $C^+ = 5,5$  - универсальная константа для гладких стенок,

**4-6 – выход (outlet; pressure, no viscous stress)** – тип граничного условия, характеризующий границу, где жидкость покидает расчетную область: В реальных условиях свободная струя, вытекающая из отверстия, вытекает в окружающую среду, не имеющую никаких

стенок и ничем не ограниченную. В силу особенностей решателя пакета, течение должно быть ограничено со всех сторон некоторыми граничными условиями. В связи с этим, область сверху и снизу струи вначале было решено ограничить стенками, создав граничное условие logarithmic wall function. Однако, такие границы при моделировании способствуют завихрениям на краях струи, поскольку наличие стенок так или иначе оказывает влияние на поток. Поэтому, нужно было задать другие граничные условия в данных областях. Наиболее оптимальным оказалось условие вытекания, как и на конце струи. Таким образом, предполагается, что струя с трех сторон «ограничена» условием вытекания и на этих границах задано нормальное (атмосферное) давление. Решение производится при помощи следующих формул:

$$\left[ (\eta + \eta_T)(\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T) \right] \bar{n} = 0, \quad p = p_0, \quad \bar{n} \cdot \nabla k = 0, \quad \bar{n} \cdot \nabla \varepsilon = 0$$

Тип анализа (расчета) устанавливает уравнения для исследуемого режима и подразумевает по умолчанию соответствующий решатель. Уравнение Навье-Стокса и уравнения турбулентности образуют систему уравнений, которую сложно решать совместно. Поэтому решатель разбивает решение на две части, решая эти уравнения отдельно. Для этого используется сегрегированный решатель (segregated solver). Поскольку исследуемое течение от времени не зависит, в уравнении Навье-Стокса не учитывается производная по времени, и типа анализа выбирается стационарный. Таким образом, для решения данной задачи выбран решатель stationary segregated solver.

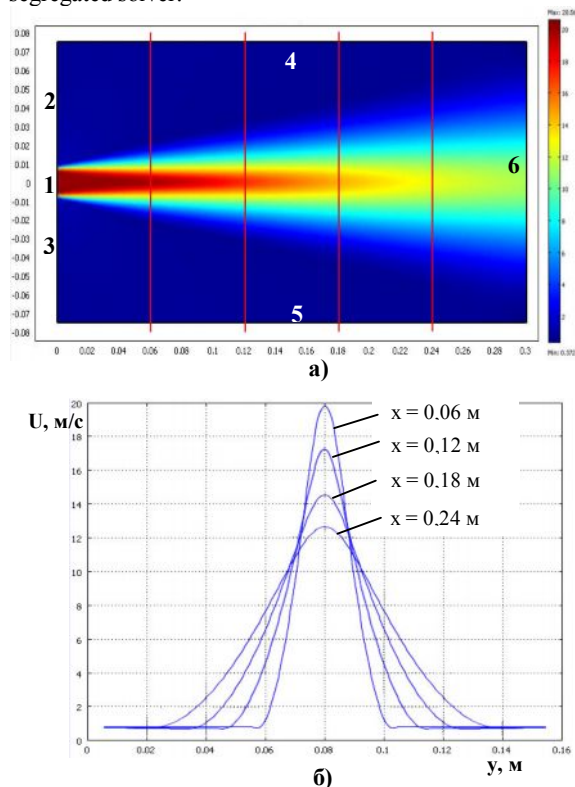


Рис. 1: а) поле скоростей плоской турбулентной свободной струи; б) профили скорости в различных сечениях струи

Расчетная область разбивается на треугольные элементы. Измельчение сетки проводилось постепенно. При меньшем количестве элементов сетки решение получается неточным, ядро струи угасает уже на расстоянии равном входному сечению и результаты не сходятся с теорией. При более тщательном измельчении сетки увеличивается длина ядра и максимальная скорость в каждом сечении. Результаты все больше соответствуют теории. Так, при количестве элементов сетки 4000 ядро затухает уже на четверти длины расчетной области, а при 12000 элементов ядро затухает только на трети длины расчетной области. Дальнейшее измельчение сетки не ведет к существенному росту длины ядра.

В результате, была установлена такая сетка: максимальный размер элементов не превышает 0,003м, что в 5 раз меньше ширины входного отверстия. Количество элементов сетки составляет 12000.

На рис. 1а показано поле скоростей в исследуемой струе. По осям отложены координаты в метрах. Видно, что максимальная скорость струи достигает 21 м/с. Примерно на трети длины исследуемой области ядро струи затухает, скорость уменьшается, а ширина струи растет, достигая на расстоянии 16-и отверстий от входного отверстия ширины 5 отверстий.

Для выяснения профиля скорости в струе, были проведены различные сечения в основной области струи (после ядра). Полученные профили скоростей показаны на рис. 1б. При построении всех этих профилей в безразмерном виде, наблюдалось совпадение графиков, т.е., подтверждалось условие аффинности. Поэтому для дальнейшего сравнения с теорией и экспериментом было решено выбрать одно из сечений, например, на расстоянии 0,12 м от входного отверстия. Таким образом, исследуется сечение, расположенное на расстоянии от входного отверстия, равном 8 входным отверстиям.

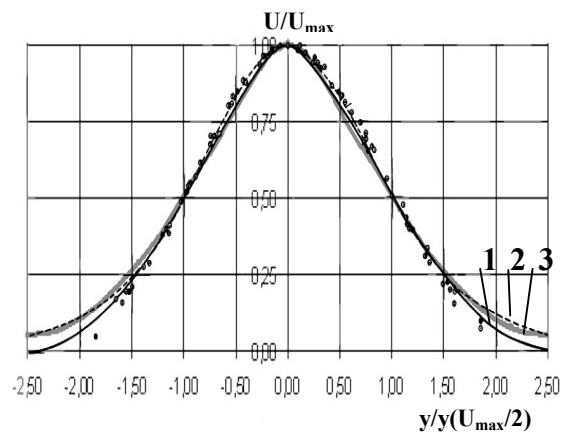


Рис.2. Сравнение безразмерных профилей скоростей в плоской турбулентной свободной струе

На графике (рис.2) построены безразмерные профили скоростей. На оси ординат отложены продольные скорости, отнесенные к осевой (максимальной) скорости. По оси абсцисс – расстояние от оси струи, отнесенное к расстоянию до точки, в которой скорость равна половине максимальной. Выбор такого характерного расстояния обусловлен трудностями экспериментального определения  $y$ , при котором скорость становится равной нулю. В таких безразмерных координатах все кривые совпадают, т.е. существует полное подобие

безразмерных профилей скоростей в основном участке струи (области за окончанием ядра струи).

На *рис. 2* приведено сравнение результатов моделирования с теоретическими и экспериментальными исследованиями, описанными в [4]. Теоретическое распределение скоростей отображают кривые 1 (черная тонкая) и 2 (пунктиром). Кружочками отмечены экспериментальные данные Фергмана. Результаты моделирования в COMSOL характеризует кривая 3 (жирная серая).

Безразмерные профили скорости хорошо совпадают, показывая правильность численного моделирования. В окрестностях максимума кривая, отображающая результаты моделирования, лучше совпадает с кривой 1, полученной Толмином на основе формулы Прандтля [4]. В областях минимума наблюдается более хорошее совпадение с кривой 2, полученной Рейхардтом по описанным выше формулам.

**Моделирование течения в плоском воздуховоде с одним отверстием.** Тестовая задача о плоской турбулентной свободной струе показала хорошее совпадение результатов численного решения при помощи пакета COMSOL с теоретическими данными. Это говорит об адекватности методов численного решения и возможности использования их для решения более сложных гидродинамических задач. Применим ту же схему решения на примере исследуемого вытяжного воздуховода. Для простоты возьмем воздуховод с одной щелью, поставим и решим задачу движения воздуха в нем и сравним результаты с проведенным экспериментом.

Расчет данной задачи проводится в рамках  $k-\varepsilon$  - модели турбулентности для вязкой несжимаемой жидкости с использованием тех же уравнений, что и в случае описанной выше струи.

Моделируется движение воздуха в линейном вытяжном воздуховоде с отверстием на одной из его стенок. Поток возникает благодаря перепаду давлений на входе в отверстие и на выходе из воздуховода. Начальные условия были заданы следующие:

$$\rho = 1,21 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{ - плотность воздуха;}$$

$$\mu = 17,9 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с} \text{ - динамическая вязкость;}$$

$$P_a = 1 \cdot 10^5 \text{ Па} \text{ - атмосферное давление на входе в отверстие;}$$

$$P_{out} = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па} \text{ - давление на выходе из воздуховода.}$$

Геометрические следующие: длина воздуховода – 1 м; на расстоянии 0,1 м от заглушенного края расположено отверстие шириной 0,02 м. Толщина стенок воздуховода – 0,002 м.

Были выбраны следующие граничные условия (*рис. 3*):

**1 – вход (inlet; pressure, no viscous stress).** Поскольку начальная скорость не известна, а известно лишь, что воздуховод окружен воздухом при нормальных условиях, то на границе где воздух попадает в отверстие, задан атмосферное давление в качестве начального условия. Такой границей должна быть 8, однако, поскольку поток не перпендикулярен этой границе (наблюдается большой градиент скорости), необходимо вынести эту границу на такое расстояние, где поток будет ей пер-

пендикулярен. Для этого создается искусственная область вокруг воздуховода, окруженная стенками со всех сторон, кроме стороны 1, где и задается начальное условие втекания:

$$\left[ (\eta + \eta_T)(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) \right] \vec{n} = 0, \quad \vec{n} \cdot \nabla k = 0, \quad \vec{n} \cdot \nabla \varepsilon = 0$$

$$p = P_a$$

**8 – (continuity)** – внутренняя граница, на которой задается условие неразрывности.

**2-7, 9-12 – стенка (logarithmic wall function)** - стенки воздуховода, а так же мнимые границы области вокруг отверстия. Уравнения, описывающие это граничное условие, полностью совпадают с граничными условиями стенки при расчете струи.

**13 – выход (outlet; pressure, no viscous stress)** – граница, на которой обеспечивается разряжение.

$$\left[ (\eta + \eta_T)(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) \right] \vec{n} = 0, \quad \vec{n} \cdot \nabla k = 0, \quad \vec{n} \cdot \nabla \varepsilon = 0$$

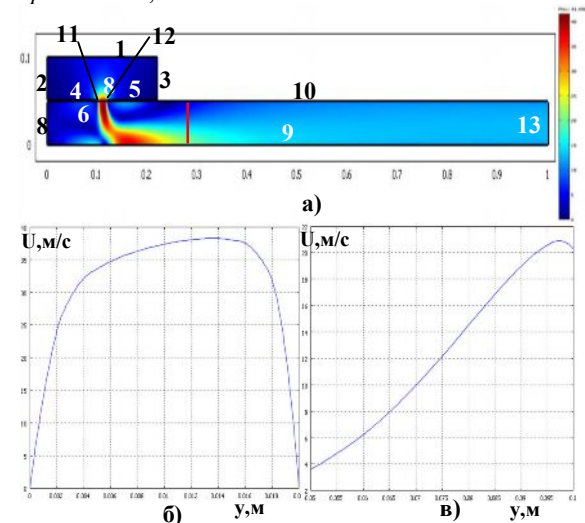
$$p = P_{out}$$

На *рис. 3* не изображены границы 11 и 12, т.к. они подразумевают толщину стенок воздуховода и очень малы.

Как и в случае свободной струи, используется решатель stationary segregated solver.

Была установлена такая сетка: максимальный размер элементов не превышает 0,005 м, что в 4 раза меньше ширины входного отверстия. Количество элементов сетки составляет 5000. На границах стенки проводится дополнительное измельчение сетки.

На *рис. 3 а* показано поле скоростей и граничные условия, исследуемого воздуховода. Распределение скорости в отверстии воздуховода, а так же профиль струи на расстоянии 8 отверстий от входного отверстия (как и в случае со свободной струей), показаны на *рис. 3 б* и *3 в*, соответственно.



*Рис. 3:* а) поле скоростей и граничные условия воздуховода с одним входным отверстием;  
б) распределение скорости в отверстии воздуховода (граница 8);  
в) профиль струи на некотором расстоянии от отверстия

Средняя скорость на входе в отверстие составляет 31 м/с, скорость на выходе из воздуховода – 12 м/с. Такие скорости обеспечены заданным перепадом давлений.

Полученные результаты сравнили с экспериментом, в котором воздуховод с четырьмя щелями подсоединили к вентилятору и создавали разрежение, соответствующее средней скорости на выходе из воздуховода 12 м/с. Все щели кроме первой были заклеены, что полностью соответствует компьютерной модели. Замеры скорости на входе в единственную открытую щель показали среднюю расходную скорость равную 32 м/с, что говорит о достаточно хорошем соответствии результатов эксперимента и численного решения в пакете COMSOL.

### Выводы

В качестве тестовой задачи проведено моделирование плоской турбулентной свободной струи в пакете прикладных программ COMSOL. Полученное численно решение удовлетворяет всем теоретическим характеристикам струи: характер течения на начальном и на основном участке струи, угасание ядра на определенном расстоянии от входного отверстия. Показано хорошее совпадение безразмерных профилей скоростей теоретического, экспериментального и численного решения. Это говорит об адекватности методов численного решения и возможности использования их для решения более сложных гидродинамических задач. Была поставлена и решена задача о всасывании воздуха линейным воздуховодом с отверстием на одной из его стенок. Результат численного решения показал хорошее

соответствие результатам проведенного эксперимента. Работа показала, что пакет COMSOL может быть использован для исследования течений в линейном воздуховоде и более сложных конструкций, в частности, для расчета воздуховода, обеспечивающего равномерный приток воздуха во всей длине.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошенко Н. С. Семко А. Н. Моделирование вытяжного воздуховода для дуговых сталеплавильных печей // Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии. Сборник научных статей. — Киев : «НПВК Триакон», 2012. — № 2(10). — С. 10—15.
2. Тимошенко Н. С., Семко А. Н., Тимошенко С. Н. Моделирование системы газоудаления дуговой сталеплавильной печи с целью повышения ее энергоэффективности // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Металургія» — Донецк. 2012.
3. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции: Учеб. пособие для вузов. — М. : Стойиздат, 1979. — 295 с.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Перев. с немецкого. — М. : «Наука», 1974. — 711 с.
5. Повх И. Л. Техническая гидромеханика. — Л. : «Машиностроение», 1976. — 504 с.
6. COMSOL: Multiphysics User's Guide, COMSOL AB.

пост.29.04.13