



КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В АСПИРАЦИОННОМ УКРЫТИИ С ЩЕЛЕВЫМИ НЕПЛОТНОСТЯМИ¹

О. А. АВЕРКОВА
В. Ю. ЗОРЯ
К. И. ЛОГАЧЕВ

*Белгородский
государственный
технологический
университет
им. В.Г.Шухова*

e-mail: kilogachev@intbel.ru

Построены поля скоростей и давления внутри аспирационного укрытия на основе численного решения осредненного по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса и использования программы Fluent.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, осредненное по Рейнольдсу уравнение Навье-Стокса, программа Fluent, аспирационное укрытие.

Введение. Системы аспирации служат для предотвращения загрязнения помещений пылевыми выбросами путем локализации пылевыделений с последующей транспортировкой по воздуховодам и очисткой загрязненного воздуха в пылеочистных аппаратах. Основным устройством для локализации выбросов пыли является аспирационное укрытие, исключающее вынос пыли из зоны ее образования в окружающее пространство. Для проектирования оптимальных аспирационных укрытий необходимы наиболее точные сведения о характеристике воздушных течений и поведении аэрозольных частиц внутри этих укрытий. Поэтому проблеме моделирования пылегазовых потоков в аспирационном укрытии посвящено большое количество научных трудов. Аэродинамику внутри укрытия исследовали в плоском приближении, используя метод гиперболического приближения, метод граничных интегральных уравнений [1-2], метод дискретных вихрей [1, 3-8], путем решения уравнения Навье-Стокса в приближении Буссинеска-Обербека [9]. Отметим, что моделирование динамики вихревых течений в аспирационном укрытии со щелевыми неплотностями посвящена работа [10], но применяемый в ней метод граничных интегральных уравнений не позволил описать вихревые течения, которые наблюдаются в реальности.

Данная статья посвящена моделированию двумерных воздушных потоков внутри аспирационных укрытий с учетом поступления воздуха через щелевые неплотности на основе метода RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) и программного продукта Fluent.

1. Основные уравнения метода RANS

Для моделирования методом RANS использовалась стандартная модель $k - \varepsilon$ турбулентности, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса и неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}),$$

где все величины скорости u , давления p , плотности ρ осредненные по времени. Напряжения Рейнольдса $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ определяются в рамках стандартной $k - \varepsilon$ модели турбулентности [11-12]:

¹ Работа выполнена при грантовой поддержке РФФИ (проект № 08-08-13687-офи_ц) и международной обменной программы Fulbright.



$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \varepsilon + \tau_{ij} \frac{\partial(u_i)}{\partial x_j},$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j} = \rho \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij},$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{2\varepsilon} = 1,92; C_\mu = 0,09; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

2. Моделирование двумерного течения в аспирационном укрытии, с учетом подсосов воздуха через неплотности

Представляет интерес исследование вихревой структуры течения в зависимости от размеров укрытия и поступления воздуха через неплотности укрытия. Фиксировались следующие параметры (рис.1): CD = RS = 0,1м; DM = NR = EF = OP = 0,2м; CB = ST = 0,63м; $\delta = 0,03$ м; AB = TK = 0,03м; WE = PL = 0,8м; ED = FM = ON = PR = 0,14м; WQ = LH = 0,8м; $v_1 = 2$ м/с; v_3 изменялась от 0 до 0,075 м/с с шагом 0,015 м/с. Величина MN изменялась от 0,2 м до 1,2 м с шагом 0,2 м. Длина козырька составляла 0; 0,02 м; 0,04 м; 0,06 м.

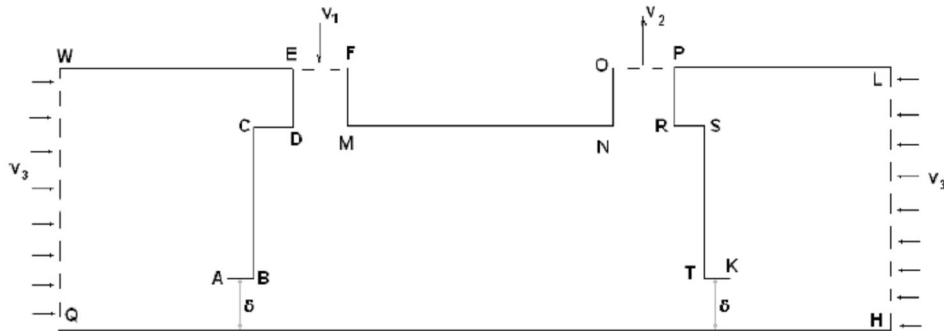


Рис. 1. Расчетная область течения

В аспирационном укрытии (рис. 2) без учета подсосов воздуха через неплотности наблюдаются две крупномасштабные вихревые структуры: слева от приточного отверстия (1-й вихрь) и справа от него (2-й вихрь). Оба вихря образуются в результате срыва потока с острых кромок приточного отверстия. Первый вихрь резко увеличивается в размерах, как только через неплотности начинает поступать воздух ($v_3 = 0,015$ м/с) и центр его смещается вниз. При увеличении скорости подсосов воздуха увеличивается отрывная зона, возникающая при срыве потока с острых кромок неплотностей. Таким образом, образуется третий вихрь правее левой неплотности. С его увеличением 1-й вихрь уменьшается и смещается вновь вверх. Четвертый вихрь, образующийся левее правой неплотности, по размерам значительно больше 3-го вихря. Заметим также, что, если без неплотностей, поток воздуха между приточным и вытяжным отверстием наблюдается практически по всему укрытию от верхней стенки до нижней, то при увеличении объема воздуха, поступающего через неплотности, этот поток отодвигается от пола и, например, при $v_3 = 0,075$ м/с занимает по высоте приблизительно половину укрытия. Наименьшая величина статического давления наблюдается во второй вихревой области, которая еще больше уменьшается при увеличении скорости подсосов воздуха. Падение статического давления наблюдается и в

остальной области аспирационного укрытия, что связано с увеличением скорости воздуха и коррессируется с зависимостью, которая следует из уравнения Бернулли: сумма статического давления и динамического напора есть величина постоянная вдоль линий тока или вихревых линий.

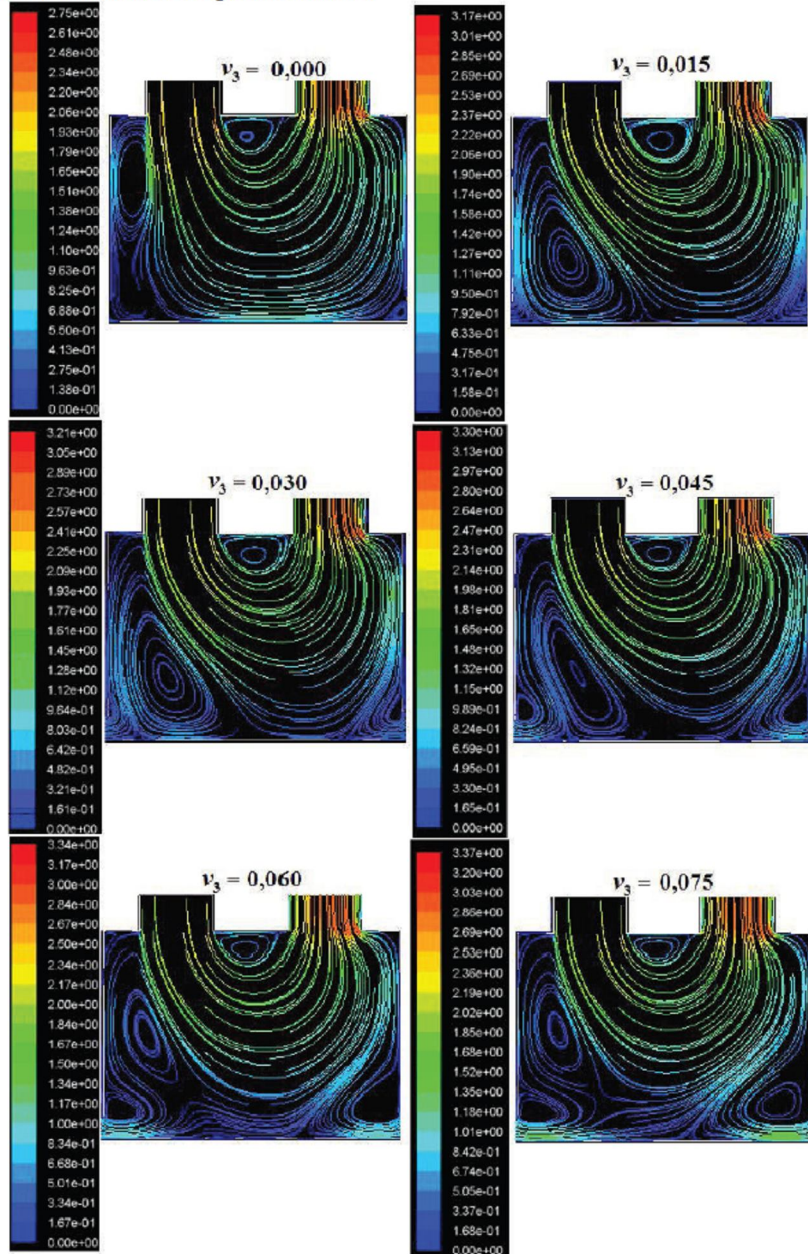


Рис. 2. Линии тока (цветовая гамма соответствует скорости в м/с) в аспирационном укрытии при $MN = 0,2$ м



Описанная структура течения наблюдается и для других размеров укрытия (рис. 3-5). Отличие лишь в расположении основного потока воздуха между приточным и вытяжным отверстием.

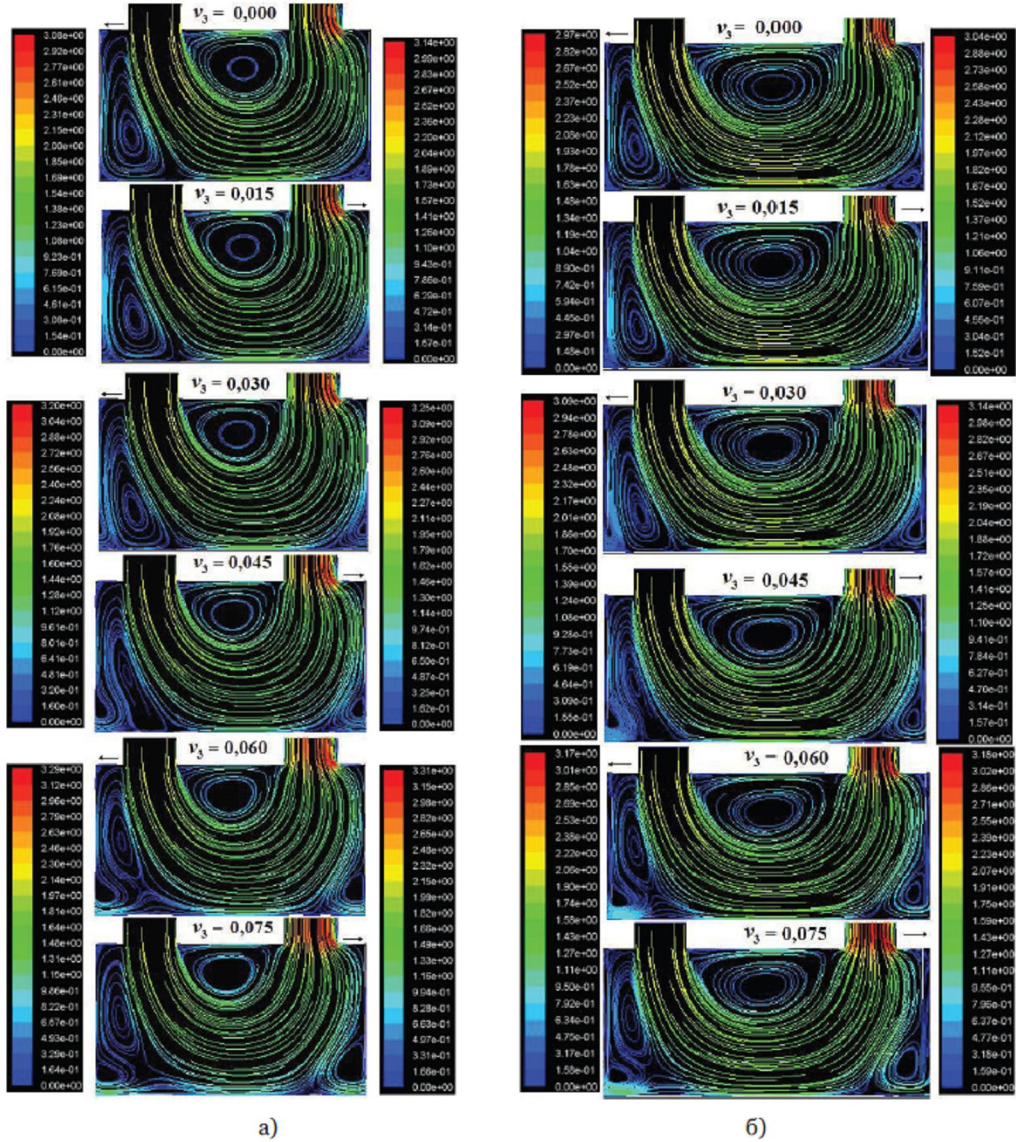


Рис. 3. Линии тока (цветовая гамма соответствует скорости в м/с) в аспирационном укрытии а) при $MN = 0,4$ м; б) при $MN = 0,6$ м

Этот поток прижимается к нижней стенке укрытия. Наибольшая скорость наблюдается внизу укрытия по центру между приточным и вытяжным отверстиями. С увеличением длины укрытия размеры второй вихревой области значительно возрастают. При установке на входе в неплотности козырьков перпендикулярно неплотности (рис. 5 б) вихревая структура течения не изменяется, однако точка отрыва меняет свое положение. Она в этом случае располагается на конце козырька. При увеличе-



нии скорости в неплотности образуется зона разрежения под козырьком. Скорость при этом увеличивается, поскольку зона эффективного всасывания уменьшается. Заметно также падение давления на входе в неплотность и после него, что свидетельствует о повышении величины коэффициента местного сопротивления. Наибольший перепад давления наблюдается при длине козырька примерно в половину высоты неплотности, что коррелируется с экспериментальными наблюдениями доцента Ю.Г. Овсянникова.

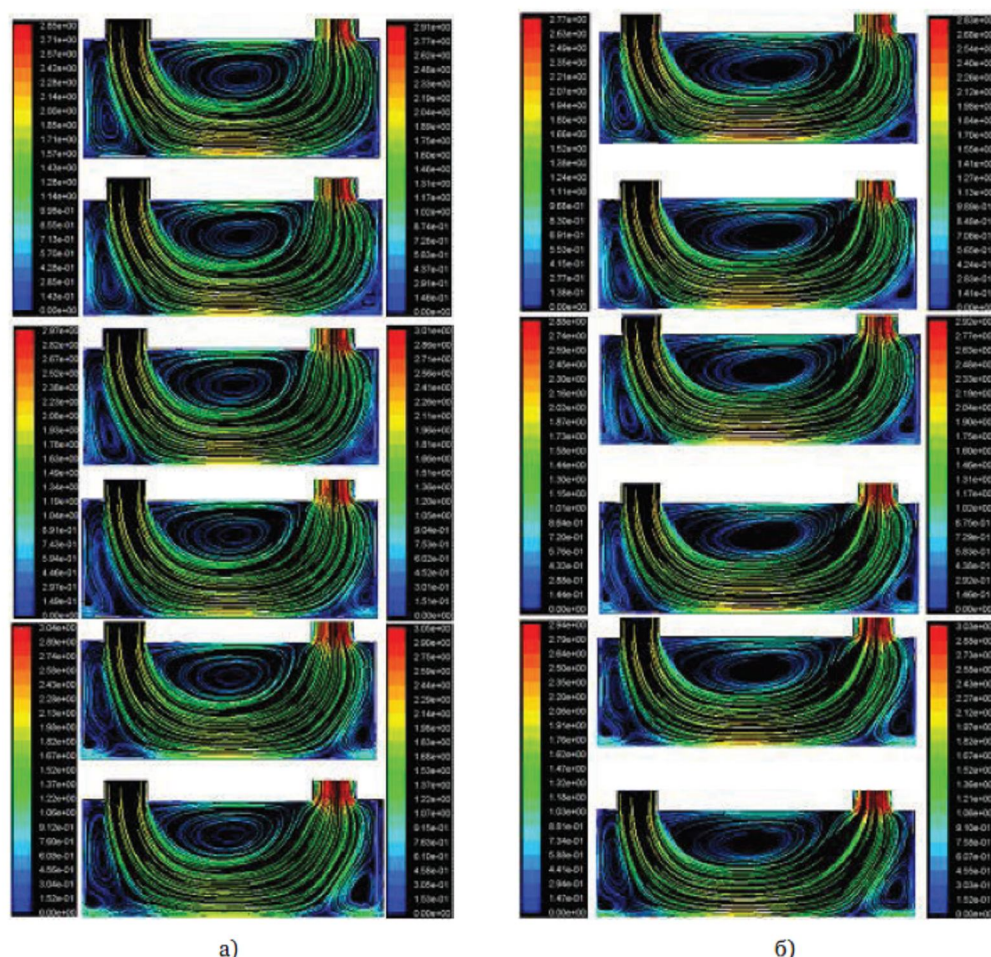


Рис. 4. Линии тока (цветовая гамма соответствует скорости в м/с) в аспирационном укрытии а) при $MN = 0,8$ м; б) при $MN = 1$ м

Заметим, что в правой неплотности такой перепад давлений больше чем в левой. Таким образом, подсосы воздуха через неплотность ближайшую к всасывающему отверстию аспирационного укрытия больше чем неплотность, ближайшую к приточному отверстию. Отсюда следует вывод, что уплотнять необходимо, прежде всего, неплотности первого вида.

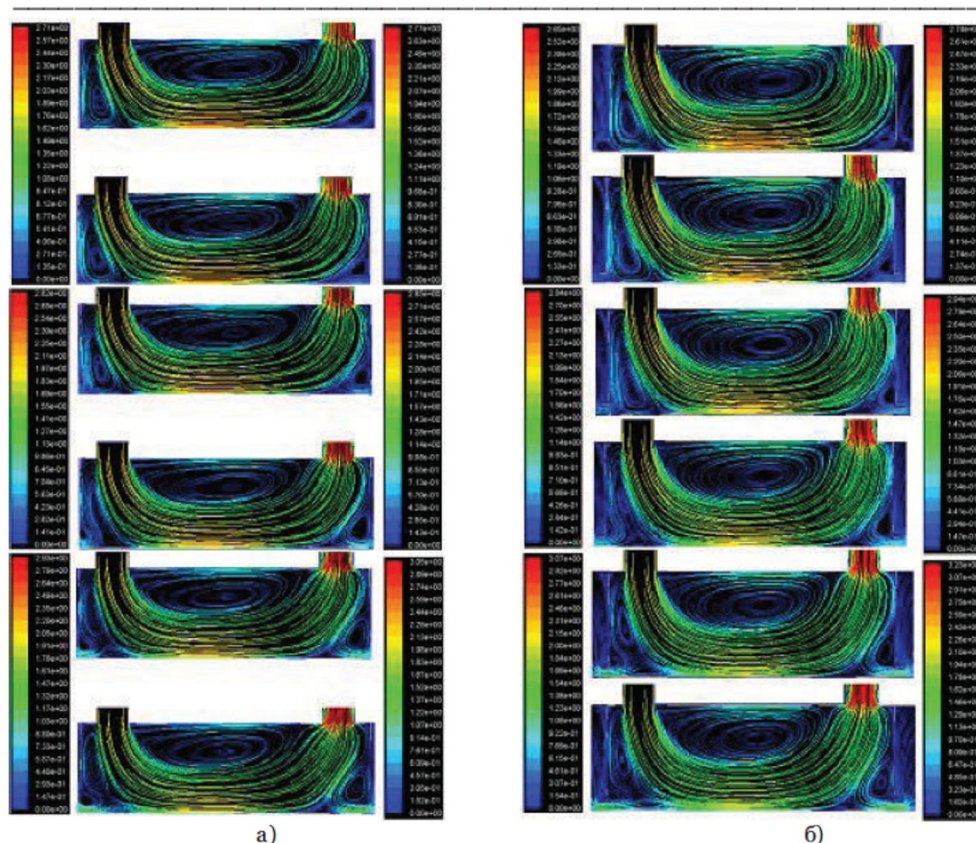


Рис. 5. Линии тока (цветовая гамма соответствует скорости в м/с) в аспирационном укрытии при $MN = 1,2$ м: а) без козырька; б) с козырьками $AB = TK = 0,06$ м

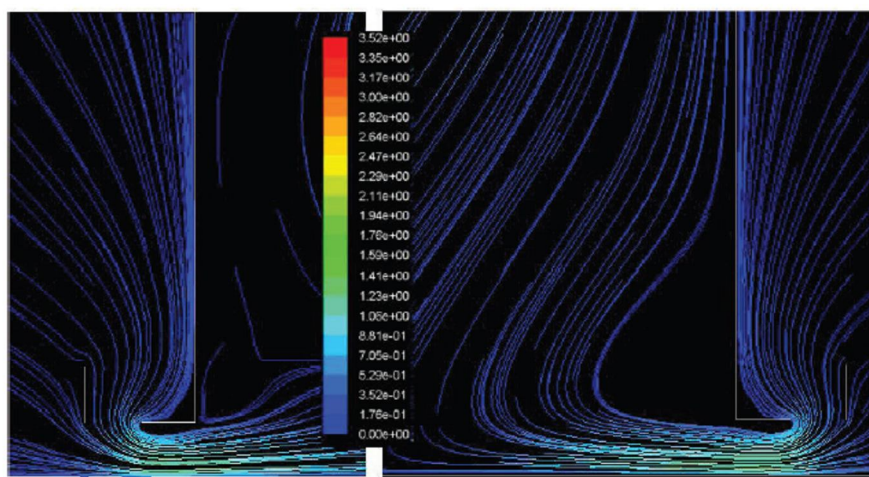


Рис. 6. Линии тока на входе в левую и правую неплотности при установке дополнительного вертикального козырька длиной 0,03 м, $v_3 = 0,03$ м/с, $MN = 1,2$ м; $\delta = 0,03$ м и расстоянии между козырьками 0,03 м



При увеличении высоты неплотности величина скорости падает. Вихревая область в правой неплотности уменьшается и при $\delta = 0,12$ м течение воздуха в обеих неплотностях имеют схожую картину.

При установке козырька наблюдается еще один вихрь – над козырьком, который образуется в результате срыва потока с гладкой поверхности вертикальной стенки укрытия. При увеличении длины козырька структура течения изменяется мало.

Установка вертикального козырька (рис 6) дает возможность отрывную зону под козырьком увеличить, что свидетельствует о повышении гидравлического сопротивления входа в неплотность.

Заключение. Исследованы двумерные вихревые течения внутри аспирационного укрытия с учетом поступления воздуха через неплотности. Построены поля скоростей и статического давления. Определена вихревая структура течения в зависимости от геометрических размеров укрытия и объемов воздуха поступающего через неплотности. Установлено, что наибольшие подсосы воздуха наблюдаются в неплотности ближайшей к вытяжному отверстию аспирационного укрытия. При установке козырька в щелевых неплотностях аспирационных укрытий перепад статического давления до входа в укрытие и после возрастает и является максимальным при длине козырька примерно в половину высоты неплотности, что коррелируется с экспериментальными исследованиями.

Литература

1. Логачев И.Н. Аэродинамические основы аспирации. [Текст] / И.Н.Логачев, К.И.Логачев. Санкт-Петербург: Химиздат. – 2005. – 659с.
2. Logachev K.I. Computational Modeling of Air-and-coal Flows next to Suction Holes / K.I.Logachev, I.N.Logachev, A.I.Puzanok // CD-proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS 2004, Jyvaskyla, 24–28 July 2004, 19 pages.
3. Логачев К.И. Численное исследование поведения пылевой аэрозоли в аспирационном укрытии [Текст] / К.И.Логачев, И.Н.Логачев, А.И.Пузанок // Известия вузов. Строительство. 2006. – №5. – С.73–78.
4. Логачев К.И. Компьютерное моделирование пылегазовых потоков в пульсирующих аэродинамических полях [Текст] / К.И.Логачев, А.И.Пузанок, В.Ю.Зоря // Вычислительные методы и программирование. 2006. Т.7, №1. – С. 195-201.
5. Konstantin I Logachev. Numerical study of aerosol dust behaviour in aspiration bunker / Konstantin I Logachev, Aleksei I Puzanok, Violetta U Zorya. // CD-proceedings European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2006, Egmond aan Zee, The Netherlands, September 5-8, 2006, 11 pages.
6. Аверкова О.А. Моделирование пылегазовых потоков вблизи всасывающего отверстия в многосвязной области с вращающимся цилиндром [Текст] / О.А.Аверкова // Вычислительные методы и программирование. 2007. Т.8, №1. –С.33-38.
7. Аверкова О.А. Компьютерное моделирование циркуляционных течений в замкнутом помещении на основе метода дискретных вихрей [Текст] / О.А.Аверкова, В.Ю.Зоря, К.И.Логачев, Р.Ю.Овсянников // Вестник БГТУ им.В.Г.Шухова. – 2007. – №3. – С.95-102.
8. Аверкова О.А. Особенности поведения пылевых аэрозолей в аспирационном укрытии стандартной конструкции [Текст] / О.А.Аверкова, В.Ю.Зоря, К.И.Логачев // Химическое и нефтегазовое машиностроение, №11, 2007.-С.34-36.
9. Шаптала В.Г. Математическое моделирование в прикладных задачах механики двухфазных потоков. Учебное пособие. Белгород: Изд-во БелГТАСМ. 1996. – 103 с.
10. Аверкова, О.А. Компьютерное моделирование пылевоздушных течений вблизи местных вентиляционных отсосов от вращающихся цилиндрических деталей [Текст] /Аверкова О.А.// Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2008. – Том 4, №1. – С. 27-32.
11. Fluent 6.1 Users' Guide, http://202.185.100.7/homepage/fluent/html/ug/main_pre.htm.
12. J. M. McDonough, Introductory Lectures on Turbulence: Physics, Mathematics and Modeling <http://www.engr.uky.edu/~acfd/lctr-notes634.pdf>.



MODELING OF FLOWS AN ASPIRATION CHAMDER

O. A. AVERKOVA
V. U. ZORYA
K. I. LOGACHEV

*Belgorod State
Technological
University named
after V.G. Shukhov*

e-mail: kilogachev@intbel.ru

Solid fields of speed and pressure are constructed in aspirating containment on the basis of numerical decision on RANS-Reynolds Averaged Navier-Stokes and the use of Fluent program.

Key words: CFD, RANS, Fluent, aspiration chamber.