

Применения метода численного моделирования для расчета основных параметров ламинарной микроструи

В.В. Агафонова¹, А.П. Скибин²,

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва

²Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала, Москва

Аннотация: Статья посвящена вопросу повышения эффективности систем вентиляции путем применения нового типа воздухопроводов. Основным преимуществом микроперфорированных текстильных воздухопроводов является возможность подачи свежего воздуха ламинарными микроструями в зону дыхания человека. Отмечена необходимость в адаптации существующих методик расчета основных параметров струй для ламинарного режима. В статье представлены результаты по разработке математической модели стационарного пограничного слоя для численного расчета движения и теплообмена воздуха в ламинарной микроструе. Выведен дискретный аналог обобщенного дифференциального уравнения, на основе которого разработан программный комплекс, позволяющий определять основные параметры ламинарных микроструй. Выполнена верификация разработанного программного комплекса, расхождение с известным инженерным методом составило менее 3%.

Ключевые слова: математическое моделирование, воздухообмен, текстильный микроперфорированный воздухопровод, микроперфорация, ламинарная струя, метод контрольного объема, круглая струя, микроструя

В настоящее время системы вентиляции и кондиционирования воздуха в помещениях жилых и общественных зданий являются активно развивающимся сегментом инженерных систем. Одним из путей по повышению эффективности систем вентиляции является применение новых типов воздухопроводов, таких, как микроперфорированные текстильные воздухопроводы. Воздухораспределительные устройства такого типа выполняют из полиэстера на поверхности которых с помощью лазера вырезают отверстия необходимого диаметра. Основным преимуществом микроперфорированных текстильных воздухопроводов является возможность подачи воздуха ламинарными микроструями непосредственно в рабочую зону помещения, не создавая сквозняков и застойных зон [1-2].

Обзор состояния вопроса. Повышение энергоэффективности и

надежности систем вентиляции является важным и актуальным вопросом гражданского строительства. В работе [3] предложен подход по определению количественных характеристик надежности работы вентиляционных систем. Автором работы [4] рассмотрен вопрос по совершенствованию методики расчета КПД системы приточной вентиляции. Повышение эффективности систем вентиляции напрямую связано с применением в инженерной практике новых типов воздухораспределителей, к которым относятся текстильные диффузоры. Вопросу особенности организации воздухообмена в помещениях зданий при применении текстильных воздуховодов посвящён ряд работ [5-7]. Авторами статьи [5] проведены сопоставительные экспериментальные исследования распределения воздуха в помещении с помощью текстильного воздуховода и с помощью настенных диффузоров, работающих по схеме смешанной и вытесняющей вентиляции. В работе показано, что воздухораспределительная система на основе текстильных воздуховодов способна создать более комфортный скоростной и температурный режим в помещении при одной и той же тепловой нагрузке. Авторы работы [6] провели ряд исследований, касающихся применению текстильных воздуховодов для организации вытесняющей вентиляции и вентиляции по схеме «сверху-вниз». Отмечено, что при вытесняющей вентиляции повышается качество воздуха в рабочей зоне помещения. В работе [7] представлен обзор преимуществ систем вентиляции на основе тканевых воздуховодов перед металлическими. Самым большим преимуществом тканевых воздуховодов являются их способность рассеивания воздуха.

В настоящее время существуют различные методики расчета основных параметров струй [8-10], но они предназначены для турбулентного режима истечения и не корректны для ламинарного режима. Основная цель исследования - разработка и верификация метода численного моделирования движения и тепломассообмена воздуха в ламинарной микроструе.

Математическая модель. За основу была принята модель пограничного слоя – движение жидкости с одним преобладающим направлением. Для описания движения воздуха в ламинарной микроструе применялась система уравнений Прандтля для стационарных условий в цилиндрической системе координат:

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho \cdot r \cdot v)}{\partial r} = 0$$

уравнение движения:

$$\rho u \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right) + \rho v \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right) = - \frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu_{eff} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right) \right]$$

Дифференциальные уравнения стационарного пограничного слоя в общем виде могут быть записаны следующим образом:

Уравнение неразрывности:

$$\operatorname{div}(\rho \cdot \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

Уравнения движения по продольной координате:

$$\operatorname{div}(\rho \cdot \vec{u} \cdot u) = \operatorname{div}([\mu_{eff}] \cdot \operatorname{grad}(u)) - \frac{\partial P}{\partial x} + B_x + V_x \quad (2)$$

Уравнение энергии:

$$\operatorname{div}(\rho \cdot \vec{u} \cdot h) = \operatorname{div}([\lambda] \cdot \operatorname{grad}(T)) + S_h \quad (3)$$

Уравнение состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (4)$$

Для ламинарного случая $\mu_{eff} = \mu$

где ρ - плотность движущейся среды; u – продольная составляющая скорости; p – давление; S_h - источниковый член уравнений энергии μ_{eff} - эффективная динамическая вязкость среды, Па·с, μ - динамическая вязкость среды Па·с, λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), T - температура; B_x

– x составляющая объемной силы, приложенной к единице объема; V_x – дополнительный к $div(\mu_{eff} \cdot grad(u))$ вязкий член.

Анализ структуры системы уравнений (1) – (4) позволяет записать их в виде одного обобщенного уравнения сохранения:

$$div(\rho \cdot \vec{u} \cdot \Phi - [\Gamma] \cdot grad\Phi) = S_c + S_p \cdot \Phi \quad (5)$$

где: Γ – коэффициент диффузии, S_c ; S_p – источниковые члены, Φ – зависимая переменная (может быть компоненты скорости, при решении уравнений движения или компоненты температуры, при решении уравнения энергии).

Метод расчета. Дискретизация обобщенного дифференциального уравнения сохранения была выполнена с помощью метода контрольного объема. На рис. 1 представлена схема разбиения расчетной области пограничного слоя на конечное число непересекающихся контрольных объемов (рис. 2), ось симметрии совпадает с осью струи [11].

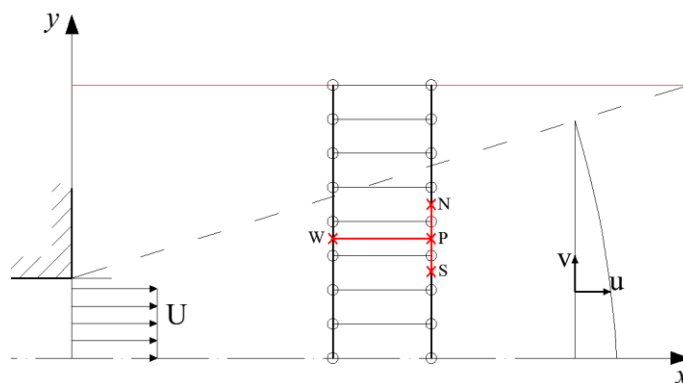


Рис. 1. – Схема разбиения расчетной области на контрольные объемы

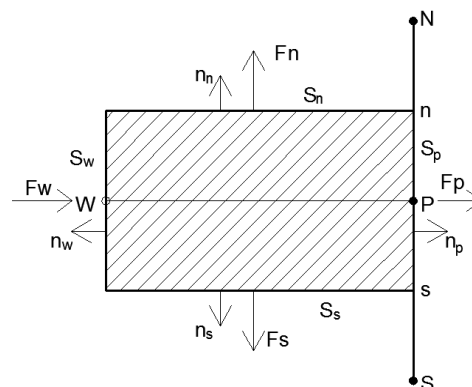


Рис. 2. – Баланс потоков через контрольный объем

где S_w, S_n, S_p, S_s – грани контрольного объема, W, S, P, N – узловые точки контрольного объема, n_w, n_n, n_p, n_s – единичные векторы, F_w, F_n, F_p, F_s – расходы через соответствующие грани контрольного объема.

Проинтегрировав уравнение сохранения (5) по контрольному объему и применив теорему Остроградского-Гаусса, получим уравнение переноса, которое является свернутой формой уравнения движения и уравнений кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации.

$$\iiint_V \operatorname{div}(\rho \cdot \vec{u} \cdot \Phi - [\Gamma] \cdot \operatorname{grad} \Phi) dV = \iiint_V S_\Phi dV$$

В результате выполнения ряда операций, был получен окончательно конечно-разностный аналог обобщенного конвективно-диффузионного уравнения:

$$\alpha_p \cdot \Phi_p = \alpha_w \cdot \Phi_w + \alpha_s \cdot \Phi_s + \alpha_n \cdot \Phi_n + b$$

где коэффициенты дискретного аналога $\alpha_n, \alpha_s, b, \alpha_p$:

$$\alpha_n = \frac{F_n}{\exp(Pe_n) - 1}; \quad \alpha_s = \frac{F_s \cdot \exp(Pe_s)}{\exp(Pe_s) - 1}; \quad b = S_s \cdot \Delta V$$

$$\alpha_p = \alpha_w + \alpha_s + \alpha_n - S_p \cdot \Delta V$$

Где Pe - Число Пекле

На основе математической модели стационарного пограничного слоя, метода контрольного объема, алгоритма решения системы линейных уравнений пограничного слоя был разработан программный комплекс «Direct Solution of the Boundary Layers» (далее - ПК «DSBL») на языке FORTRAN, позволяющий определять основные параметры ламинарных и турбулентных струй (осевую, продольную и поперечную скорости). С целью верификации разработанного ПК был проведен сопоставительный расчет основных параметров микроструи.

Исходные данные:

Свободная изотермическая круглая микроструя (рис. 3) истекает из

отверстия диаметром $d= 0,4$ мм с постоянной скоростью $u= 5,8$ м/с. Кинематическая вязкость воздуха при температуре $t=20^{\circ}\text{C}$ $\nu=14,6\cdot 10^{-6}$ м²/с, $\rho=1,2$ кг/м³, $Re=17-240$.

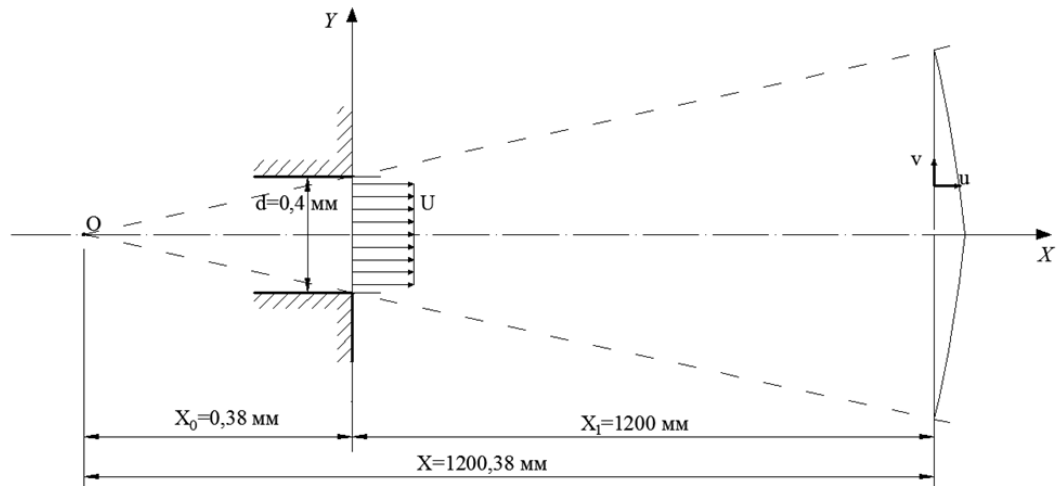


Рис. 3. – Продольный разрез микроструи

Сравним профили продольной и поперечной скорости круглой микроструи, построенные по результатам расчета в разработанной программе «DSBL» с результатами инженерного расчета по методике Г. Шлихтинга (рис. 4 – 5).

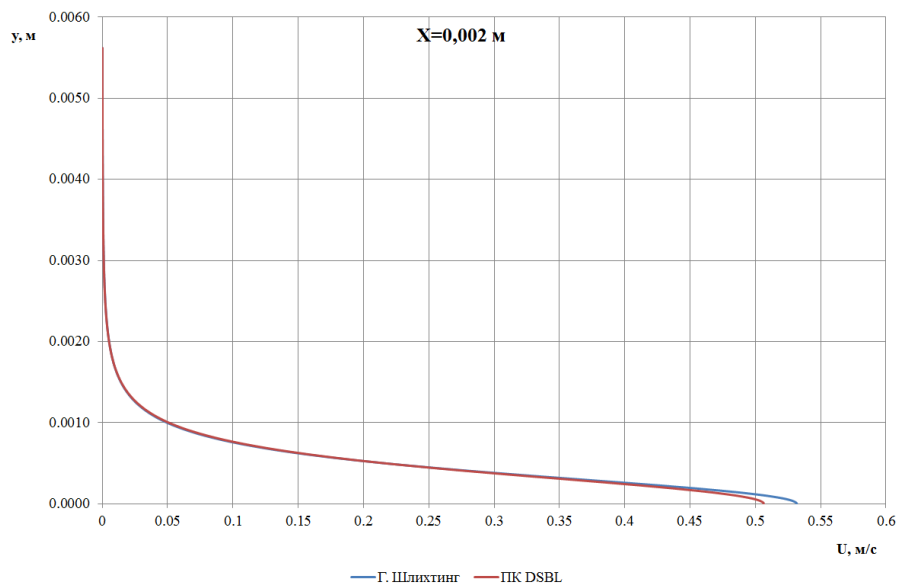


Рис. 4. – Сопоставление профилей продольной скорости круглой микроструи

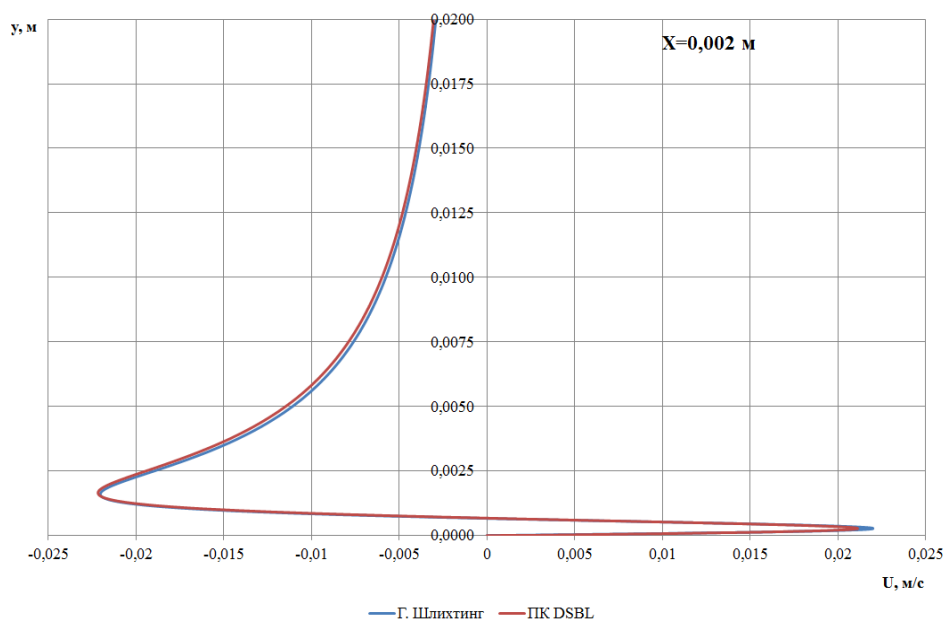


Рис. 5. – Сопоставление профилей поперечной скорости круглой микроструи

Результаты расчета параметров круглой микроструи (продольной и поперечной скорости) в ПК «DSBL» показали хорошую сходимость с результатами расчета по инженерной методике Г. Шлихтинга, расхождение составило менее 3%.

Выводы.

1. Получена математическая модель стационарного пограничного слоя: система уравнений, описывающих движение, тепломассообмен и диффузию, которая сведена к одной форме записи в виде обобщенного конвективно-диффузионного уравнения.

2. На основе разработанного метода контрольного объема разработан программный комплекс на языке Fortran, позволяющий определять основные параметры ламинарных микроструй (осевую, продольную и поперечную скорости).

3. Проведенная верификация разработанного программного комплекса показала хорошую сходимость с известным инженерным методом расчета.

Литература

1. Рымаров А.Г., Агафонова В.В. Особенности истечения воздуха микроструями // Приволжский научный журнал. 2015. №1. С. 60-64.
2. Рымаров А.Г., Агафонова В.В. Исследование возможности применения текстильных воздухопроводов в системах вентиляции // Естественные и технические науки. 2015. №2. С. 141-143.
3. Галкина Н.И. Моделирование процесса прогноза и повышения надежности работы систем вентиляции // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2086
4. Галкина Н.И. КПД систем вентиляции // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4106
5. Nielsen P.V., Topp C., Sonnichsen M. et al. Air distribution in rooms generated by a textile terminal—comparison with mixing and displacement ventilation //ASHRAE Transaction. 2005. 8 (1). pp. 733–739.
6. Nielsen P.V. Personal exposure between people in a room ventilated by textile terminals: with and without personalized ventilation // HVAC&R Research. 2007. 13 (4). pp. 635–644.
7. Pinkalla C. Fabric duct air dispersion for HVAC systems // Construction Specifier. 2003. 56 (6). pp. 57–64.
8. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. М.: Стройиздат, 1978. 144 с.
9. Абрамович Т.Н. Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1976. 623 с.
10. Chen C.-J., Rodi W. Vertical turbulent buoyant jets: a review of experimental data. NASA STI. Recon Technical Report. 1980. 83 p.
11. Рымаров А.Г., Агафонова В.В. Адаптация стандартной инженерной методики расчета основных параметров струй для случая ламинарного режима истечения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 4. С. 45-49.

References

1. Rymarov A.G., Agafonova V.V. Privolzhskij nauchnyj zhurnal. 2015. №1. pp. 60-64.
2. Rymarov A.G., Agafonova V.V. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2015. №2. pp. 141-143.
3. Galkina N.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №. 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2086
4. Galkina N.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №. 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4106
5. Nielsen P.V., Topp C., Sonnichsen M. et al. ASHRAE Transaction. 2005. 8 (1). pp. 733–739.
6. Nielsen P.V. HVAC&R Research. 2007. 13 (4). pp. 635–644.
7. Pinkalla C. Construction Specifier. 2003. 56 (6). pp. 57–64.
8. Shepelev I.A. Aerodinamika vozdushnyh potokov v pomeshchenii [Aerodynamics of air flows in the room]. M.: Strojizdat, 1978. 144 p.
9. Abramovich T.N. Teoriya turbulentnyh struj [Theory of turbulent jets]. M.: Nauka, 1976. 623 p.
10. Chen C.-J. and Rodi. W. Vertical turbulent buoyant jets: a review of experimental data. NASA STI. Recon Technical Report. 1980. 83 p.
11. Rymarov A.G., Agafonova V.V. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova. 2018. № 4. pp. 45-49.