

РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАССИВНОЙ СКАЛЯРНОЙ ПРИМЕСИ В ПОПЕРЕЧНОЙ СТРУЕ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исахов Алибек Абдиашимович, доктор PhD, доцент, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Республика Казахстан, 050040, г. Алматы, пр.аль-Фараби, 71, e-mail: alibek.issakhov@gmail.com

Байтуреева Айымжан Руслановна, магистрант 2-го курса, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Республика Казахстан, 050040, г. Алматы, пр.аль-Фараби, 71, e-mail: abaitur@yandex.kz

Из года в год растет актуальность проблемы загрязнения воздуха и вытекающих из этого экологических последствий. Во всем мире глобально развивается промышленность, растет количество ТЭС, АЭС, фабрик, заводов и т.д. Производимые ими выбросы попадают в атмосферу, распространяясь по воздуху и оседая на почве, что несет за собой тяжкие последствия для флоры, фауны и здоровья людей. В целях сохранения целостности окружающей среды, возникает необходимость оценки и контроля выбросов. Самым оптимальным способом оценки является составление математической модели. Подобная модель учитывает различные физические, метеорологические и химические факторы, принимающих участие в распространении выбросов в атмосфере. Целью данной работы является решение модельной задачи, которая позволит провести проверку на корректность выбранной математической модели и численного алгоритма численного решения.

Ключевые слова: уравнения Навье-Стокса, перенос веществ, численное моделирование, загрязнение воздуха, концентрация.

SPREAD OF PASSIVE SCALAR IMPURITY IN THE TRANSVERSE JET BY NUMERICAL SIMULATION METHODS

Issakhov A.A., PhD, associate professor, al-Farabi Kazakh National University named after, Republic of Kazakhstan, 050040, c. Almaty, av.al-Farabi, 71, e-mail: alibek.issakhov@gmail.com
Baitureyeva A.R., 2nd year master student, al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, 050040, c. Almaty, av.al-Farabi, 71, e-mail: abaitur@yandex.kz

Abstract. The relevance of air pollution and the consequent environmental impact problems increases from year to year. All over the world there is a global growth of industry, what leads to the increasing number of thermal power plants, nuclear power plants, factories, etc. Produced emissions enter the atmosphere, spread through the air and settle on the ground surface what carries to serious consequences for flora, fauna and human health. In order to preserve the integrity of the environment, there is a need to assess and control emissions. The most appropriate way to assess it is the compilation of a mathematical model. Such a model takes into account the different physical, meteorological and chemical factors involved in the dissemination of emissions through the atmosphere. The purpose of this paper is to solve the model problem, which allows to validate the correctness of the chosen mathematical model and numerical algorithm of its numerical solution.

Keywords: Navier-Stokes equations, mass transfer, numerical simulation, air pollution, concentration.

Введение. Непрерывное развитие и рост численности населения в городских районах, ряд проблем, связанных с окружающей средой, таких как вырубка лесов, выброс токсичных

материалов, выбросов твердых отходов, загрязнение воздуха и многое другое, привлекают к себе гораздо больше внимания, чем когда-либо прежде. Повсеместно развивается промышленность, вследствие чего растет количество фабрик, заводов, ТЭС, АЭС, которые производят большое количество загрязняющих веществ. Выбросы приводят к различным экологическим проблемам, которые наносят вред здоровью человека и окружающей среде [1].

Каждый год в окружающую среду выбрасываются десятки миллионов тонн газообразных оксидов серы и углерода. Доля ТЭС в антропогенных выбросах этих оксидов составляет 45-65% и 15-45% соответственно [13]. Попадая в атмосферу, газообразные выбросы распределяются в воздухе, вступают в химические реакции, и опадают в виде сухих и жидких осадков на окружающую поверхность земли (растения, почву, воду, строения и т.д.).

Для моделирования подобных масштабных явлений, необходимо решить модельную задачу для проверки корректности выбранной математической модели и численного алгоритма. В этих целях в данной работе исследуется движение вещества, выходящего из трубы перпендикулярно основному течению в канале. Входные условия для выхода из трубы и поперечного течения описаны различными профилями скоростей. Отношения скоростей

выражается через $R = \frac{U_{jet}}{U_{crossflow}} = 1,5$. В работе сравниваются результаты для различных

профилей скоростей и их влияние на дальнейшее движение вещества. Вещество В, выходящее из трубы вступает в реакцию с веществом А основного течения, в результате образуется вещество С. Исследована концентрация каждого из них. Вещества подобраны таким образом, что число Дамкелера равно 1. Само течение несжимаемое. Расчеты проводились с помощью программного комплекса ANSYS Fluent. Аналогичное исследование проводили зарубежные исследователи [9], и целью данной работы было сравнение полученных данных с их результатами.

СХЕМА И РАЗМЕРЫ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ

На следующем рисунке приведена схема и размеры расчетной области. Вещество А входит через левую границу inlet 1, вещество В через вход трубы inlet 2, выход находится в правой границе – outlet.

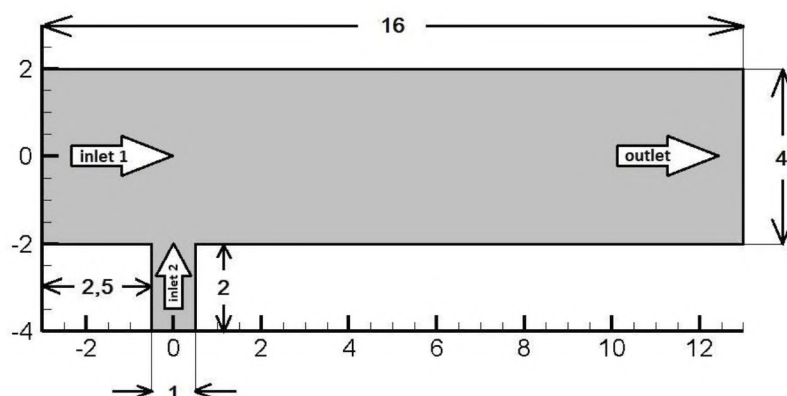


Рис. 1 – Схема расчетной области.

Геометрия и вычислительная сетка были построены с помощью ANSYS Fluent. Все величины задавались в метрах. Основная часть канала была разделена сеткой 640 на 160, область трубы 40 на 80. В итоге количество узлов составило 106 481.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Подробный обзор последних работ по течению струи в поперечном потоке можно найти в работе [11]. Предыдущие авторы численно исследовали поле скорости [3, 11], а пассивное скалярное поле концентрации рассматривалось в работе [12]. А также численное моделирование поля скорости было рассмотрено в работах [4]. На сегодняшний день для исследования течения струи в поперечном потоке все чаще применяют численное моделирование. В работах [2, 7] моделируется течения струи в поперечном потоке с помощью осредненных по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) и полученные численные результаты поле скорости сравниваются с экспериментальными данными. В работе [6] численно моделируется с помощью метода крупных вихрей (LES), которые дают гораздо лучшие результаты, чем RANS подход. В работе [10] были получены хорошие согласованность средних скоростей и турбулентной интенсивности с помощью прямого численного моделирования (DNS), с экспериментальными результатами [5]. Для численного моделирования данного процесса в основу математической модели легли уравнения Навье-Стокса, состоящие из уравнения неразрывности и уравнений движения.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Для расчета концентрации были использованы уравнения неразрывности для компонентов Y_A и Y_B .

$$\rho \left(u \frac{\partial Y_A}{\partial x} + w \frac{\partial Y_A}{\partial z} \right) = \rho \Gamma_A \left(\frac{\partial^2 Y_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y_A}{\partial z^2} \right) - k_1 Y_A Y_B \quad (4)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial Y_B}{\partial x} + w \frac{\partial Y_B}{\partial z} \right) = \rho \Gamma_B \left(\frac{\partial^2 Y_B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y_B}{\partial z^2} \right) - k_2 Y_A Y_B \quad (5)$$

Согласно закону Дальтона Y_C вычисляется следующим образом:

$$Y_C = 1 - Y_A - Y_B \quad (6)$$

Здесь u, w – компоненты скорости, ρ – плотность, μ – динамическая вязкость, Γ_A, Γ_B – коэффициенты диффузии, k_1, k_2 – константы скорости реакции.

ГРАНИЧНЫЕ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Граничные условия задавались следующим образом: для inlet 1 и inlet 2 – ‘Velocity-inlet’, для outlet – ‘Pressure-outlet’, для стен – ‘Wall’.

Начальные условия: для входа основного канала inlet 1 были рассмотрены различные варианты профиля скорости u :

$$u1: u = u^* \quad (7)$$

$$u2: u = u^* \left(1 - e^{-4.5 \left(1 - \frac{r^2}{4} \right)} \right), \quad r = y \quad (8)$$

$$u3: u = u^* \left(1 - e^{-5 \left(1 - \frac{r^2}{4} \right)} \right), \quad r = y \quad (9)$$

$$u4: u = u^* \left(1 - e^{-5.5 \left(1 - \frac{r^2}{4} \right)} \right), \quad r = y \quad (10)$$

Остальные параметры задавались постоянными: $w = 0$, $Y_A = 1$, $Y_B = 0$.

Для входа трубы inlet 2: $u = 0$, $w = 2Ru^* (1 - 4l^2)$, $Y_A = 0$, $Y_B = 1$, где $l = x$.

Здесь u^* варьируется в зависимости от выбранного вещества. За вещества А и В был выбран кислород O_2 . Для получения необходимого числа $Re = \frac{\rho u_{\cos sflow} D}{\mu} = 25$, и с

учетом того, что динамическая вязкость кислорода равна $\mu = 1,919e-05$ кг·м²/с, плотность $\rho = 1,299874$ кг/м³, то скорость $u^* = 0,000369074233$ м/сек. Гидравлический диаметр $D = 1$ м, коэффициент диффузии был задан, как $0,67737051$ м/сек².

В ANSYS Fluent все расчеты производятся в действительных размерах, поэтому в данном случае были указаны реальные параметры.

Таблица 1
Граничные условия

Параметры	inlet 1	inlet 2	wall	outlet
u	См. (7) – (10)	$u = 0$	$u = 0$	$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$
w	$w = 0$	См. (12)	$w = 0$	$\frac{\partial w}{\partial x} = 0$
p	Ур. (2)	$p = p_{атм}$	Ур. (3)	Ур. (2)
Y_A	$Y_A = 1$	$Y_A = 0$	$\frac{\partial Y_A}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial Y_A}{\partial x} = 0$
Y_B	$Y_B = 0$	$Y_B = 1$	$\frac{\partial Y_B}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial Y_B}{\partial x} = 0$

Для дискретизации системы уравнений (1) – (6) используется метод контрольного объема [8]. Для этого представим уравнения Навье - Стокса и уравнение для концентрации в виде интегральных законов сохранения для произвольного фиксированного объема Ω с границей $d\Omega$ [8].

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 2 представлены результаты для профиля вертикальных и горизонтальных скоростей при профиле начальной скорости u_3 для основного канала.

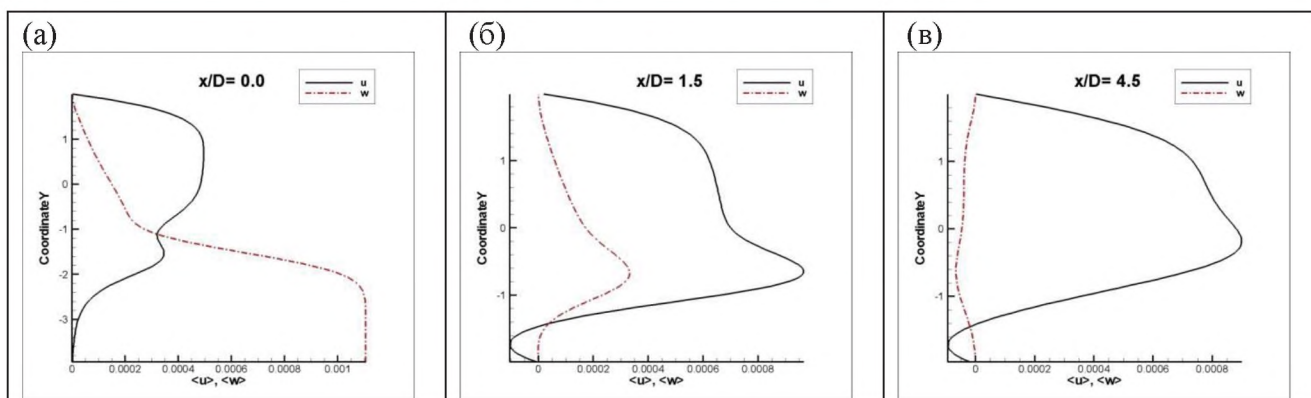


Рис. 2 – Профили вертикальной и горизонтальной компоненты скорости: (а) $x/D=0.0$, (б) $x/D=1.5$, (в) $x/D=4.5$ [м].

Ниже на рисунке 3 представлены профили скорости u для различных вариантов начальных скоростей на разных дистанциях. Наглядно видно, что различия между профилями u_2 , u_3 и u_4 практически нет, но профиль u_1 разительно отличается от них. Отсюда следует вывод, что важно задавать скорость через профиль, так как это значительно влияет на результат и более корректно описывает реальные физические процессы.

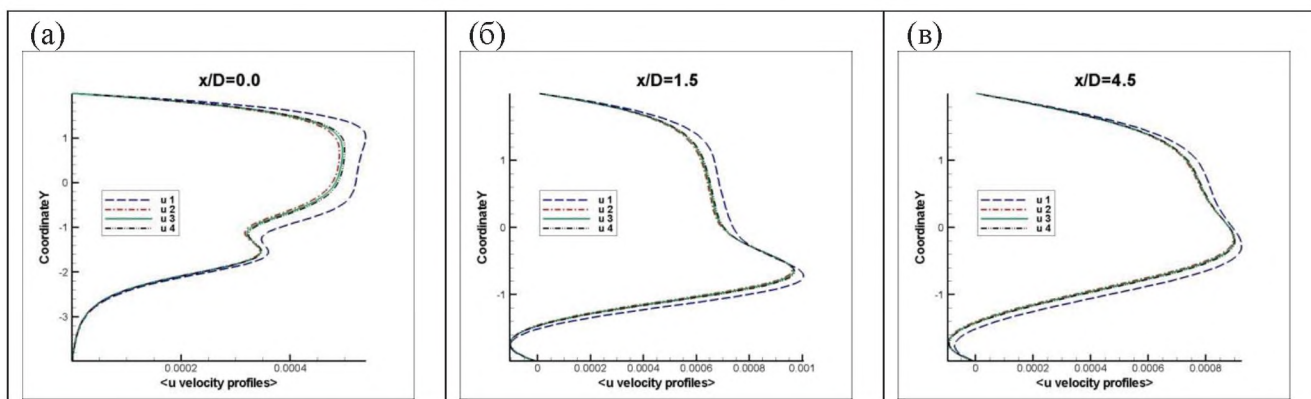


Рис. 3 – Сравнение профилей скоростей на различных дистанциях: (а) $x/D=0.0$, (б) $x/D=1.5$, (в) $x/D=4.5$.

На рисунках 4, 5 и 6 проиллюстрированы результаты профиля концентрации веществ А, В и полученного в результате реакции вещества С на различных сечениях соответственно.

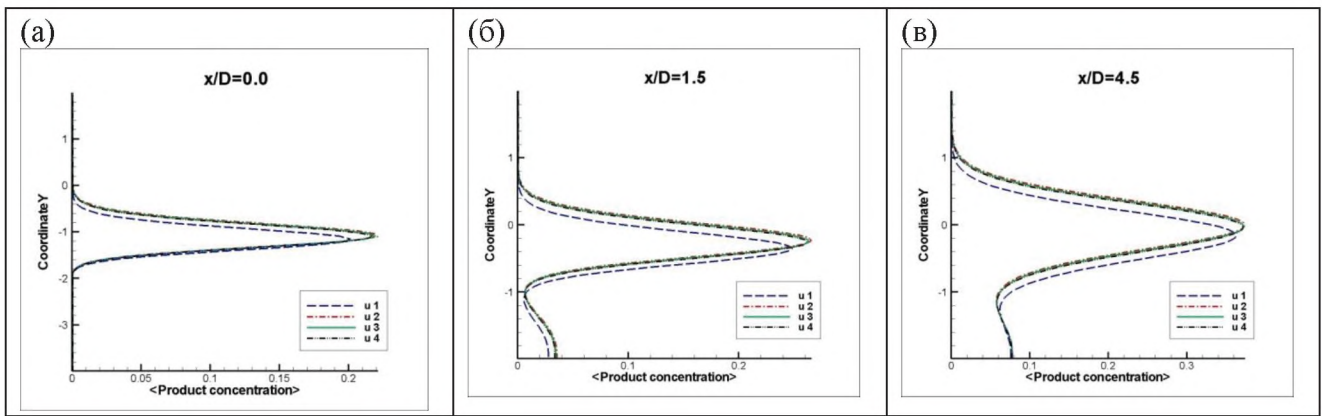


Рис. 4– Профили концентраций продукта реакции С на различных дистанциях для различных профилей начальной скорости: (а) $x/D=0.0$, (б) $x/D=1.5$, (в) $x/D=4.5$.

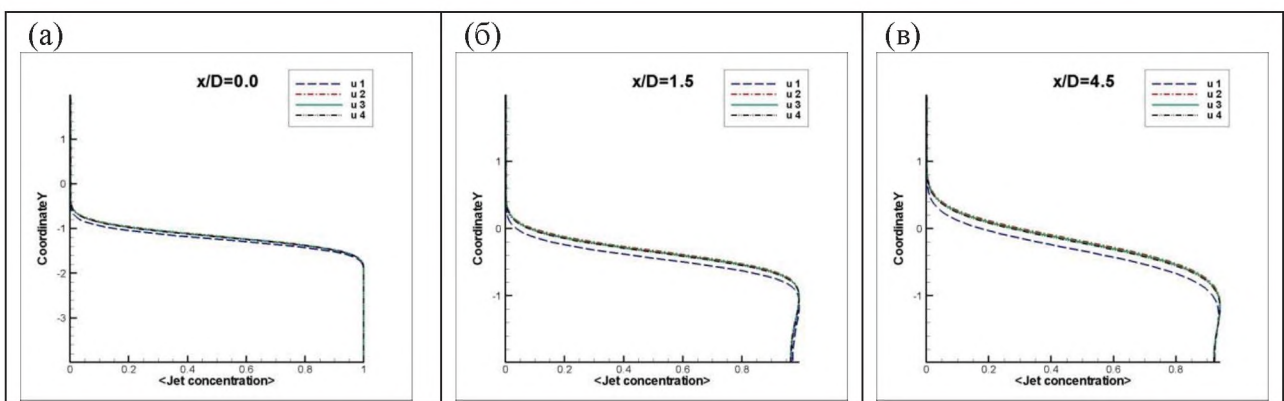


Рис. 5– Профили концентраций вещества В на различных дистанциях для различных профилей начальной скорости: (а) $x/D=0.0$, ((б) $x/D=1.5$, (в) $x/D=4.5$.

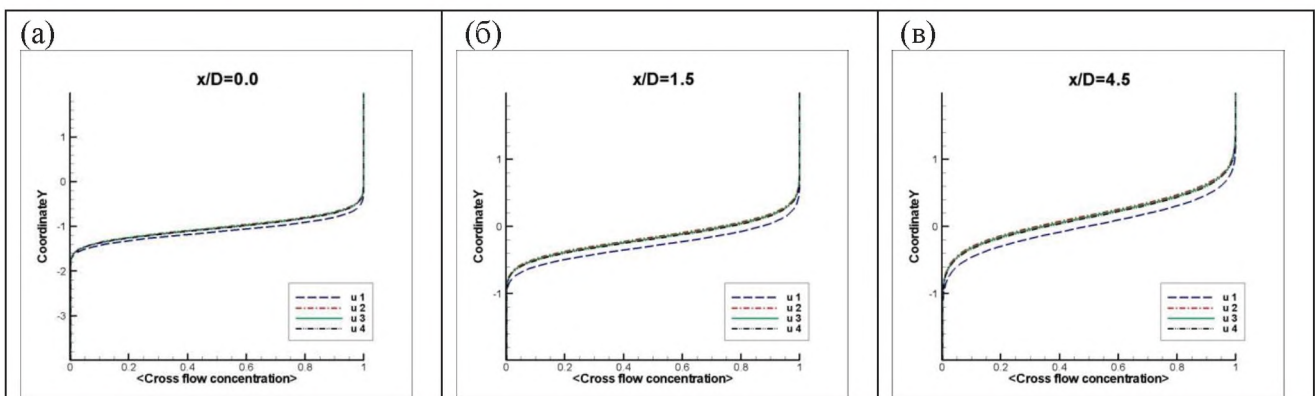


Рис. 6 – Профили концентраций вещества А на различных дистанциях для различных профилей начальной скорости: (а) $x/D=0.0$, (б) $x/D=1.5$, (в) $x/D=4.5$.

На рисунке 7 показаны линии тока течения и значения скорости на всей расчетной области.

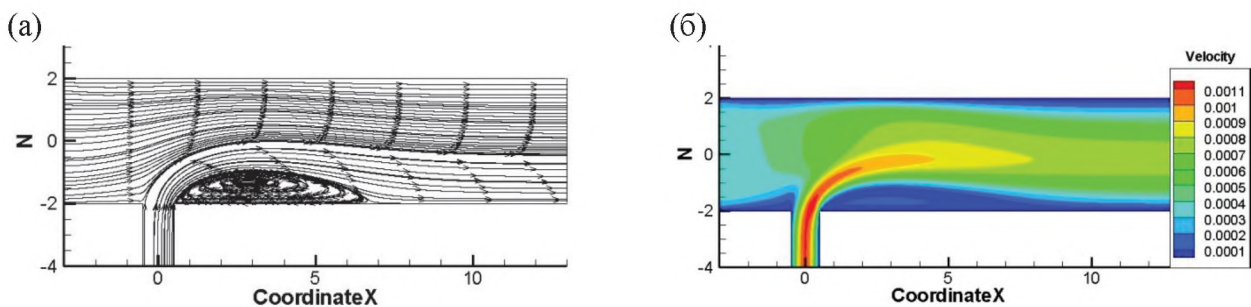


Рис. 7 – Линии тока скоростей, Контур скорости

На рисунках 8-10 представлен сравнительный анализ результатов распространения концентраций, полученных в ходе данной работы и результатов, полученных зарубежными исследователями [9], где C_1 , C_2 , C_3 – концентрации веществ А, В и С соответственно.

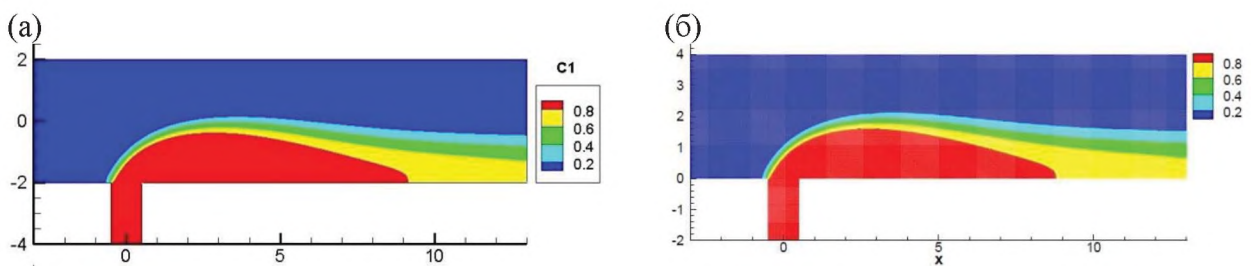


Рис. 8 – Результаты распространения вещества А: (а) результаты, полученные в ходе выполнения данной работы, (б) результаты [9].

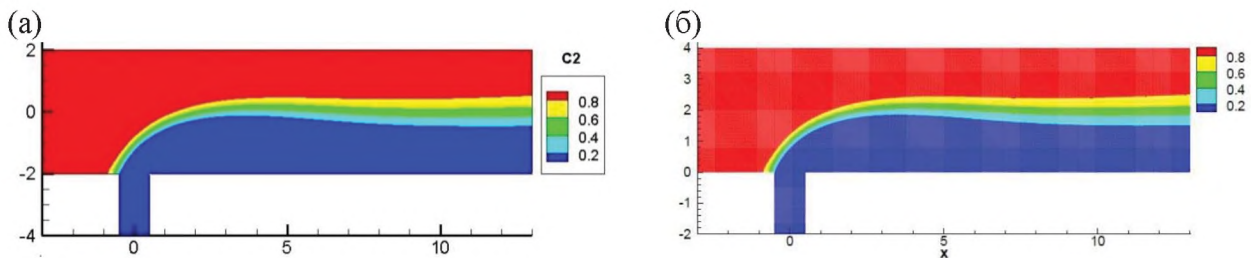


Рис. 9 – Результаты распространения вещества В: (а) результаты, полученные в ходе выполнения данной работы, (б) результаты [9].

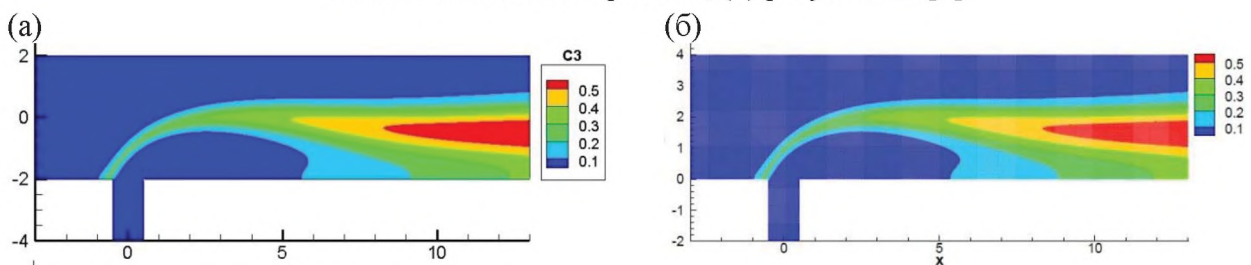


Рис. 10 – Результаты распространения вещества С: (а) результаты, полученные в ходе выполнения данной работы, (б) результаты [9].

Заключение. Решение упрощенной модельной задачи позволяет провести валидацию корректности выбранной математической модели и численного метода решения, которые в дальнейшем можно будет использовать в расчетах более сложных турбулентных моделей.

Было рассмотрено движение вещества, вытекающего из трубы, в основном поперечном течении канала. Физические параметры, такие как плотность, динамическая вязкость, гидравлический диаметр и скорость, были подобраны таким образом, чтобы получить малое число Рейнольдса для ламинарного течения. Вследствие того, что в сложных турбулентных моделях расчета распространения выбросов ТЭС и АЭС рассматривается концентрация и массовое соотношение различных химических веществ, в математической модели необходимо было учесть возможность расчета концентрации. Так как элементы выбросов под воздействием химических и физических параметров смешиваются, образуя новые компоненты, в модель и численный алгоритм была включена возможность расчета химической реакции. Полученные численные результаты показали, что изменение степени экспоненты в профиле скорости не имеет значительного влияния на течение, однако задание скорости в виде константы дает значительную ошибку в расчетах.

Список литературы

1. Дукенбаев К. Энергетика Казахстана. Технический аспект / К. Дукенбаев. – Алматы.- 2001 . - 312 с.
2. Acharya, S., Tyagi, M., Hoda, A. Flow and heat transfer predictions for film-cooling. Ann. NY Acad. Sci. 934.- 2001. - 110-125 pp.
3. Andreopoulos, J., Rodi, W. Experimental investigation of jets in a crossflow // J. Fluid Mech. 138.- 1984. - 93-127 pp.
4. Broadwell, J. E., Breidenthal, R. E. Structure and mixing of a transverse jet in incompressible flow // J. Fluid Mech. 148.- 1984.- 405-412 pp.
5. Camussi R., Guj G., Stella A. Experimental study of a jet in a crossflow at very low Reynolds number // Journal of Fluid Mechanics. Volume 454. - 2002. - 113-144 pp.
6. Chai, X., Iyer, P. S., Mahesh, K. Numerical study of high speed jets in crossflow // Journal of Fluid Mechanics, Volume 785.- 2015. - 152-188 pp.
7. Chochua, G., Shyy, W., Thakur, S., Brankovic, A., Lienau, K., Porter, L., Lischinsky, D. A computational and experimental investigation of turbulent jet and crossflow interaction. Numer. Heat Transfer A 38.- 2000. - 557-572 pp.
8. Chung T. J. Computational Fluid Dynamics. Cambridge University Press, 2002 - p. 1012.
9. Falconi C. J., Denev J. A., Frohlich J. and Bockhorn H. A test case for microreactor flows - a two-dimensional jet in crossflow with chemical reaction, Internal Report, available at: <http://www.ict.uni-karlsruhe.de/index.pl/themen/dns/index.html>: "2d test case for microreactor flows. Internal report. 2007 July 20, 2007.
10. Livescu, D., Jaber, F. A., Madnia C. K. Passive-scalar wake behind a line source in grid turbulence // Journal of Fluid Mechanics. Volume 416.- 2000. - 117-149 pp.
11. Margason, R. J. Fifty years of jet in crossflow research. In AGARD Symp. on a Jet in Cross Flow, Winchester, UK.-AGARD CP . - 1993.- p. 534.
12. Shan, J. W., Dimotakis, P. E. Reynolds-number effects and anisotropy in transverse-jet mixing // J. Fluid. Mech. 566.-2006. - 47-96 pp.
13. U.S. Environmental Protection Agency, Clean Air Markets Division, available at: <https://ampd.epa.gov/ampd/>
14. Zavila O. Physical Modeling of Gas Pollutant Motion in the Atmosphere, Advances in Modeling of Fluid Dynamics, Dr. Chaoqun Liu (Ed.), InTech, 2012, DOI: 10.5772/48405.

УДК 621.038

БИР ЭЛЕКТРОНДУУ ЭЛЕМЕНТТЕРДИ МОДЕЛДЕШТИРҮҮ

Кожоева Сурабюбю Тургашевна, к.т.н, доцент, Ж.Баласагын ат. КУУ, Кыргызстан, 720011, г.Бишкек, ул. Осмонкула 40А, e-mail: suura@mail.ru