

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ПЛОТНОСТЯМИ В СПУТНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Д.А. Голоднов

golodnovda@student.bmstu.ru

SPIN-код: 1108-0841

Е.Д. Сокуренок

sokurenkoed@student.bmstu.ru

SPIN-код: 8769-6173

Р.А. Комаров

komarovra@student.bmstu.ru

SPIN-код: 5296-5117

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Выполнено моделирование течения газов с различными плотностями в программном комплексе Simcenter STAR-CCM+. Объекты исследования — струи гелия, углекислого газа и воздуха, инжектируемые в спутный поток воздуха, движущегося в канале, через осесимметричное сопло. Описаны математическая модель, базирующаяся на осредненных уравнениях Рейнольдса для смеси несжимаемых газов, замыкаемых стандартной линейной k - ϵ -моделью, приведены результаты расчета полей средних скоростей. Выполнена валидация расчетной методики по данным физических экспериментов, опубликованных в открытой печати.

Ключевые слова

Водородная безопасность, стационарное струйное течение газов с различными плотностями, стандартная линейная k - ϵ -модель турбулентности, программный комплекс Simcenter STAR-CCM+, математическая модель, инжекция струй газов в канал через сопло

Поступила в редакцию 08.12.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Постановка задачи. Для обоснования водородной безопасности атомных электростанций [1, 2] необходимо разработать расчетные методики, позволяющие качественно моделировать турбулентные течения сред существенно различной плотности (пар, воздух, водород). Наиболее перспективным методом решения этой задачи можно считать использование вычислительной гидродинамики CFD (англ. *computational fluid dynamics*), хорошо зарекомендовавшей себя при анализе гидродинамики и тепломассообмена в активных зонах ядерных реакторов [3–5]. Методики, основанные на CFD, позволяют получить большой объем информации о различных характеристиках потоков, но достоверность этих результатов требует подтверждения (валидации). Валидация, как правило, проводится путем сравнения результатов численного моделирования физических экспериментов, имеющих близкую к исследуемому процессу или явлению природе, с результатами измерений.

В настоящей работе рассмотрено численное моделирование стационарного струйного течения газов различной плотности (гелий, углекислый газ, воздух) в спутном потоке воздуха в обосновании разработки расчетной методики для обоснования водородной безопасности на АЭС. Эксперимент, предлагаемый

авторами статьи для валидации, опубликован в работе [6] и входит в классическую базу данных экспериментов ERCOFTAC [7].

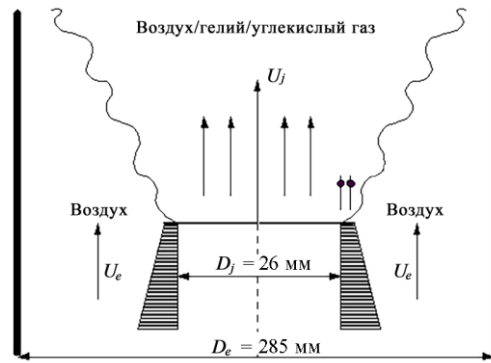


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Целью эксперимента является исследование развития турбулентных осесимметричных струй переменной плотности в области ближнего поля вблизи выхода из сопла. Используемая экспериментальная установка показана на рис. 1. Турбулентная осесимметричная вертикальная струя толщиной 0,8 мм выходит из сопла диаметром $D_j = 26$ мм. Область, окружающая сопло, представляет собой призматический изолированный пластиковый канал квадратного сечения 285×285 мм высотой 1,2 м. Скорость струи на выходе U_j из сопла изменяется от 10 (для углекислого газа) до 32 м/с (для гелия), скорость спутного потока воздуха U_e — от 0,89 до 0,92 м/с. Теплофизические свойства газов принимаются постоянными (табл. 1) [8].

Таблица 1

Теплофизические свойства газов

Параметр	Значение		
	Воздух (Air)	Гелий (He)	Углекислый газ (CO ₂)
Плотность, кг/м ³	1,381	0,193	1,9334
Вязкость, мкПа · с	16,360	17,800	12,800

Математическая модель. Математическая модель базируется на осредненных уравнениях Рейнольдса [9, 10] для смеси несжимаемых газов, замыкаемых стандартной k - ϵ -моделью:

– балансе массы

$$\sum_j \frac{\partial(\rho V_j)}{\partial x_j} = 0;$$

– балансе количества движения

$$\sum_j \rho V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_k} + \rho g_i + \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \mu_\tau \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \right);$$

– балансе массовой фракции

$$\rho \sum_j V_j \frac{\partial Y}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_\tau}{Sc_\tau} \right) \frac{\partial Y}{\partial x_j} \right],$$

где ρ — плотность; V_j — проекции вектора скорости; x_j — координаты; p — давление; g_i — проекции вектора массовой силы тяжести; μ , μ_τ — молекулярная и турбулентная вязкость, соответственно; $Sc = 1,0$, $Sc_\tau = 0,9$ — молекулярное и турбулентное число соответственно; Y — массовая фракция среды струи.

Плотность смеси определяется как

$$\rho = \left[\frac{Y}{\rho_j} + \frac{1-Y}{\rho_e} \right]^{-1},$$

где ρ_j и ρ_e — плотность инжектируемого газа и воздуха, соответственно.

Турбулентная вязкость определяется кинетической энергией турбулентности k и скоростью диссипации турбулентной энергии ε :

$$\mu_\tau = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}.$$

Стандартная линейная k - ε -модель описывается уравнениями

$$\rho \sum_j V_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_\tau \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon;$$

$$\rho \sum_j V_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_{\varepsilon 1} \mu_\tau \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon \right).$$

Коэффициенты стандартной линейной k - ε -модели приведены ниже [9]:

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 4}$	σ_k	σ_ε
0,09	1,44	1,92	-0,33	1,0	1,3

Расчетная область и граничные условия. Расчетная область представляет собой квадратную призму 285×285 мм высотой 1,19 м, на нижнем торце которой располагается осесимметричное цилиндрическое сопло внутренним диаметром 26 мм, толщиной 0,8 мм и высотой 30 мм (рис. 2). Входной участок сопла протяженностью 500 мм (расположенный ниже границы призмы) предназначен для формирования профиля скорости на выходе из сопла, соответствующего условиям стабилизированного турбулентного течения [6]. Поверхности сопла и стенок канала рассматривались как гидравлически гладкие. На входных

границах задавались постоянные по сечению распределения скорости (табл. 2), интенсивность и масштаб турбулентности. Такие граничные условия обеспечивали значения скорости потока на оси в выходном сечении сопла (U) 32, 12 и 10 м/с при инъекции гелия, воздуха и углекислого газа, соответственно. Интенсивность турбулентности принимали равной 4 %, масштаб турбулентности на входе в сопло — 1 мм, на входе в канал — 10 мм. На выходной границе задавали условие стабилизированного течения.

Таблица 2

Граничные условия

Параметр	Значение		
	Воздух (Air)	Гелий (He)	Углекислый газ (CO ₂)
Средняя скорость газа на входе в сопло $U_{ср}$, м/с	9,55	27,5	8,15
Скорость воздуха в спутном потоке U_e , м/с	0,92	0,89	0,91

Расчетная стенка. Расчетная сетка (рис. 3) состоит из призматических усеченных контрольных объемов с характерным поперечным размером 10 мм и получена автоматическим генератором. В центральной части сформирована цилиндрическая область объемного контроля диаметром 100 мм, где выполнено сгущение расчетной сетки в поперечном направлении (характерный поперечный размер 2,5 мм, продольный размер 10 мм). На поверхности сопла аналогичным способом сформирована область объемного контроля, где выполнено сгущение расчетной сетки. Область между выходным сечением и поперечным сечением, отстоящим от выходного на расстоянии 900 мм, получена экструзией по закону гиперболического тангенса в осевом направлении с коэффициентом растяжения 1,4 и числом слоев 40. Общее число ячеек сетки 168 411.

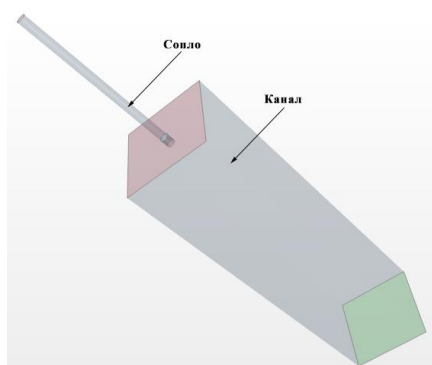


Рис. 2. Расчетная область



Рис. 3. Расчетная сетка

Описание данных для верификации. В эксперименте получены данные о полях осредненной скорости в струе при инъекции различных газов. Поле скоростей определяли с помощью лазерной системы доплеровской велосимет-

рии DANTEC 57N10 с погрешностью $\pm 0,11\%$. Распределения величины, обратной осевой скорости, вдоль оси сопла показаны на рис. 4. Распределения осевой скорости в поперечном направлении на расстоянии $15D_j$ приведены на рис. 5 (L_u — полуширина струи в рассматриваемом сечении: расстояние от оси струи до координаты, в которой осевая скорость в два раза меньше максимальной скорости). Согласно экспериментальным данным, поперечное распределение скорости хорошо аппроксимируется зависимостью

$$\frac{V(x, r) - V_e(x)}{V_j(x) - V_e(x)} = \exp\left\{-0,693\left(\frac{r}{L_u}\right)^2\right\}, \quad (*)$$

где V_j — максимальная скорость (на оси) в рассматриваемом сечении; V_e — скорость в спутном потоке (меняется вдоль оси в результате инъекции воздуха в струю и вытеснения из пограничного слоя на стенках канала).

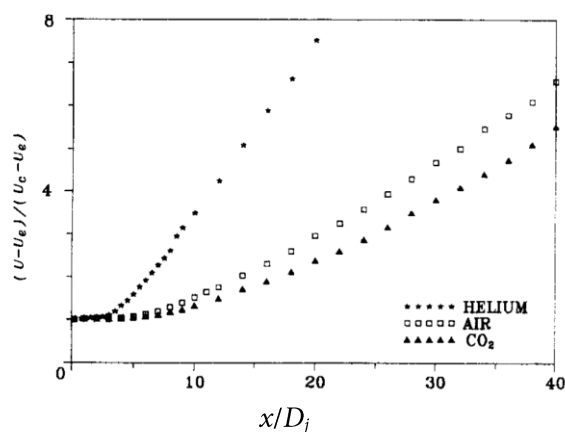


Рис. 4. Экспериментальное распределение безразмерной величины, обратной осевой скорости, вдоль оси сопла

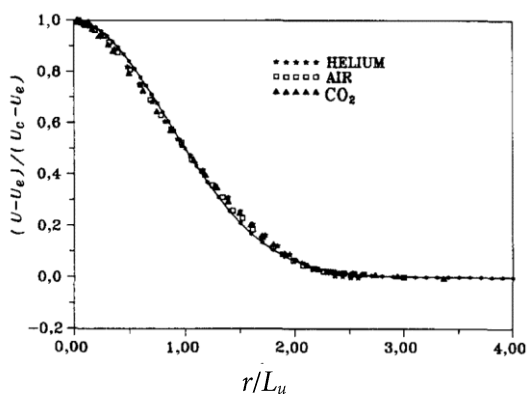


Рис. 5. Экспериментальное распределение безразмерной осевой скорости в поперечном направлении для осевой координаты $x/D_j = 15$

Результаты расчета. Распределения осевой скорости в среднем сечении канала при инъекции различных газов построены в программе STAR CCM+ Version 2019.3.1 (14.06.013) и приведены на рис. 6–8.

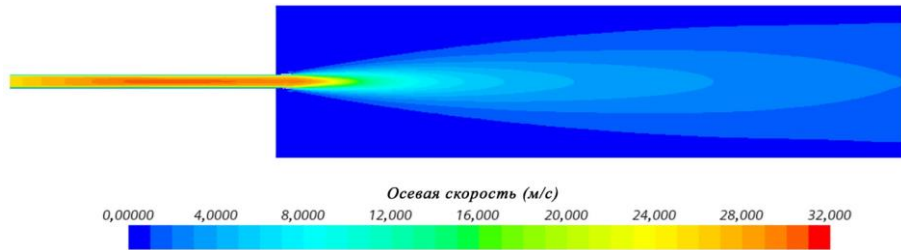


Рис. 6. Распределение осевой скорости при инъекции водорода

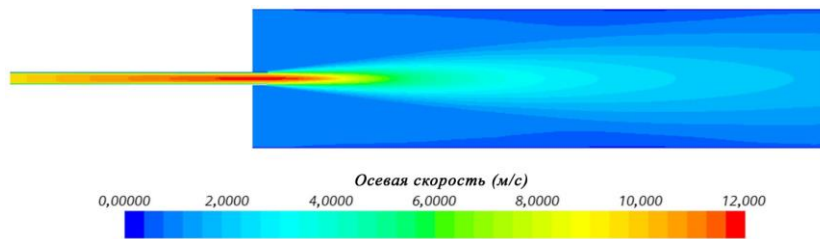


Рис. 7. Распределение осевой скорости при инъекции воздуха

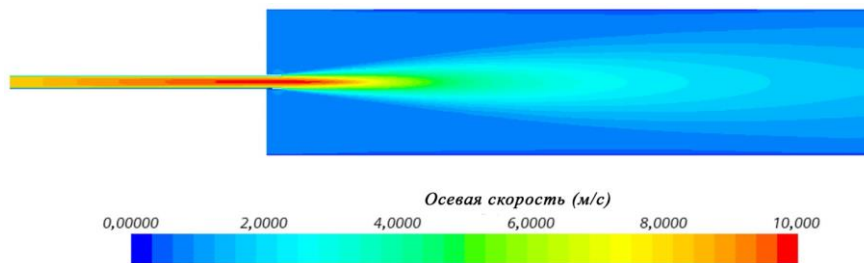


Рис. 8. Распределение осевой скорости при инъекции углекислого газа

Сравнение и анализ расчетных и экспериментальных данных. Сравнение расчетных и экспериментальных распределений безразмерной скорости вдоль оси сопла построены в программе STAR-CCM+ Version 2019.3.1 (14.06.013) и приведены на рис. 9. Безразмерная скорость получена как отношение разности абсолютного значения осевой скорости и скорости спутного потока U_e к разности скорости на оси в сопле U_j и скорости спутного потока.

Расчетные распределения безразмерной скорости (обезразмеривание согласно представлению формулы (*)) в поперечном направлении на расстоянии $15D_j$ (420 мм) в сравнении с экспоненциальным законом (*) построены в программе STAR-CCM+ Version 2019.3.1 (14.06.013) и показаны на рис. 10–12 (расчетные значения обозначаются точками, экспоненциальный закон — линией).

Значения полуширины струи $L_{и}$ для рассматриваемого сечения для всех газов составили 34,5 мм.

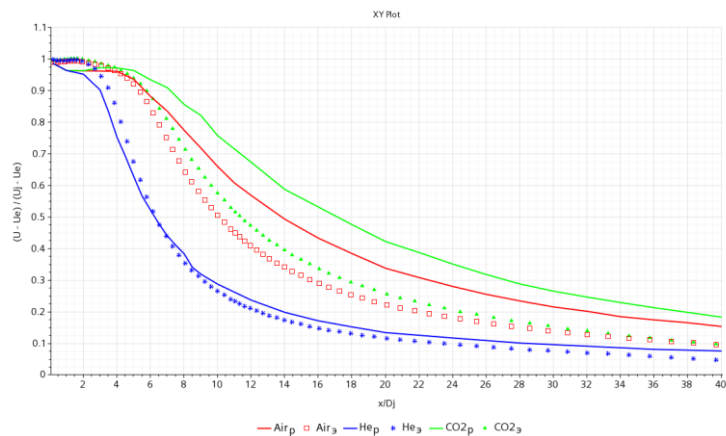


Рис. 9. Расчетные и экспериментальные распределения безразмерной скорости вдоль оси сопла при инъекции различных газов: расчетные значения обозначаются индексом «р», экспериментальные – «Э»

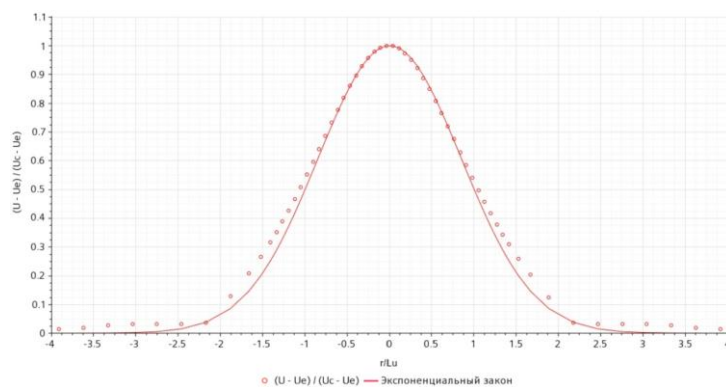


Рис. 10. Расчетные распределения безразмерной скорости в поперечном направлении на расстоянии 420 мм за соплом при инъекции гелия

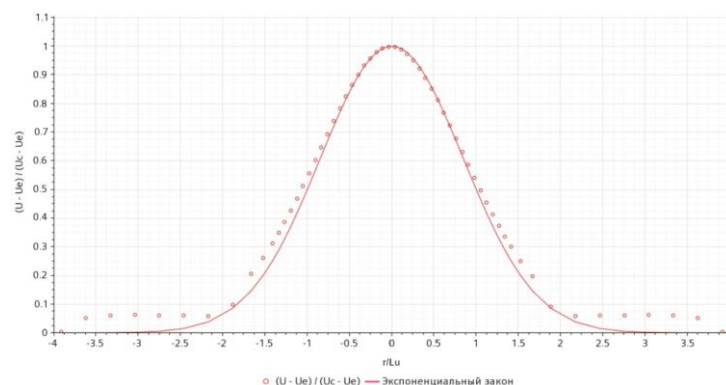


Рис. 11. Расчетные распределения безразмерной скорости в поперечном направлении на расстоянии 420 мм за соплом при инъекции воздуха

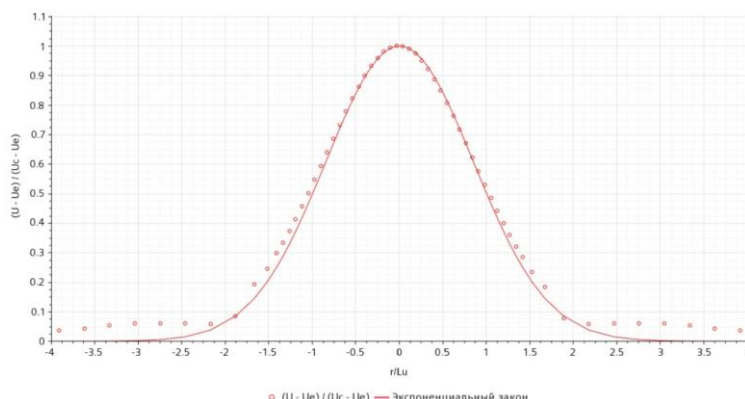


Рис. 12. Расчетные распределения безразмерной скорости в поперечном направлении на расстоянии 420 мм за соплом при инъекции углекислого газа

Средние значения отклонений расчетных значений скорости V_c от экспериментальных данных V_e определяются в соответствии с формулой

$$\sigma = \frac{1}{V_e(0)h} \int_0^h \sqrt{(V_c(l) - V_e(l))^2} dl,$$

где l — направление линии длиной h , вдоль которой происходит сравнение расчетных и экспериментальных данных.

Значение средних отклонений приведены в табл. 3.

Таблица 3

Средние отклонения расчетных и экспериментальных данных

Инжектируемый газ	Продольное распределение (см. рис. 9)	Поперечное распределение (см. рис. 10–12)
He	2,8	2,9
Воздух	9,0	2,1
CO ₂	12,3	2,7

Среднее отклонение осевого распределения скорости при инъекции водорода составило 2,8 %, воздуха — 9,0 %, углекислого газа — 12,3 %. При этом качественное соответствие обеспечено: при инъекции гелия скорость наиболее интенсивно уменьшается с удалением от сопла, при инъекции углекислого газа — наименее интенсивно.

Средние отклонения поперечных распределений скорости от экспоненциального закона (*) составили менее 2,6 %.

Заключение. Выполнено численное моделирование течения струй газа различной плотности в спутном потоке воздуха. Получены данные о полях осредненной осевой скорости и проведено их сравнение с данными экспериментов. Показано что, среднее отклонение осевого распределения скорости при инъекции водорода составило 2,8 %, воздуха — 9,0 %, углекислого газа — 12,3 %. При

этом качественное соответствие обеспечено: при инъекции гелия скорость наиболее интенсивно уменьшается с удалением от сопла, при инъекции углекислого газа — наименее интенсивно.

Средние отклонения поперечных распределений скорости от экспоненциального закона (8) составили менее 3,0 %.

Литература

- [1] Кириллов И.А., Харитонов Н.Л., Шарафутдинов Р.Б. и др. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы. *Ядерная и радиационная безопасность*, 2017, № 2(84), с. 26–37.
- [2] Molkov V. Hydrogen safety research: state-of-the-art. *Proc. 5th Int. Sem. on Fire and Explosion Hazards*, 2003, art. 28e43.
- [3] Солонин В.И., Марков П.В. Гидродинамика сотовой решетки-интенсификатора, создающей конвективный перенос, для реакторных установок с водой под давлением. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2011, № 3, с. 18–25. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-3-18-25>
- [4] Марков П.В., Солонин В.И. Влияние способа дистанционирования на гидродинамику семистержневого пучка тепловыделяющих элементов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2013, № 1, с. 38–48.
- [5] Гетья С.И., Крапивцев В.Г., Марков П.В. и др. Моделирование температурных неоднородностей в пучке твэлов ТВС ВВЭР-1000. *Атомная энергия*, 2013, т. 114, № 1, с. 55–57.
- [6] Amielh M., Djeridane T., Anselmet F., et al. Velocity near-field of variable density turbulent jets. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1996, vol. 39, no. 10, pp. 2149–2164. DOI: [https://doi.org/10.1016/_0017-9310\(95\)00294-4](https://doi.org/10.1016/_0017-9310(95)00294-4)
- [7] Circular air jet. *cfд.mace.manchester.ac.uk: веб-сайт*. URL: <http://cfд.mace.manchester.ac.uk/ercofac/doku.php?id=cases:case038> (дата обращения: 22.11.2020).
- [8] Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Наука, 1972.
- [9] STAR-CCM+. User guide. Version 2019.3.1. Siemens, 2020.
- [10] Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб., БГТУ, 2001.

Голоднов Дмитрий Александрович — студент кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Сокуренок Евгений Дмитриевич — студент кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Комаров Роман Анатольевич — студент кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Марков Павел Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Голоднов Д.А., Сокуренок Е.Д., Комаров Р.А. Моделирование стационарного струйного течения газов с различными плотностями в спутном потоке воздуха. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 02(55). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-02-671>

SIMULATION OF A STATIONARY JET FLOW OF GASES WITH DIFFERENT DENSITIES IN A COCURRENT AIR FLOW

D.A. Golodnov

golodnovda@student.bmstu.ru

SPIN-code: 1108-0841

E.D. Sokurenko

sokurenkoed@student.bmstu.ru

SPIN-code: 8769-6173

R.A. Komarov

komarovra@student.bmstu.ru

SPIN-code: 5296-5117

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The authors carried out a simulation of the flow of gases with different densities in the Simcenter STAR-CCM+ software package. The objects of study are jets of helium, carbon dioxide and air, injected into the cocurrent flow of air moving in the channel through an axisymmetric nozzle. A mathematical model based on the averaged Reynolds equations for a mixture of incompressible gases closed by a standard linear $k - \epsilon$ -model is described, the results of calculating the fields of average velocities are presented. The calculation method was validated according to the data of physical experiments published in the open press.

Keywords

Hydrogen safety, stationary jet flow of gases with different densities, standard linear $k - \epsilon$ turbulence model, Simcenter STAR-CCM+ software package, mathematical model, injection of gas jets into the channel through a nozzle

Received 08.12.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Kirillov I.A., Kharitonova N.L., Sharafutdinov R.B., et al. Hydrogen safety for nuclear power plants with light water reactor units. Current state of the problem. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'* [Nuclear and Radiation Safety Journal], 2017, no. 2(84), pp. 26–37 (in Russ.).
- [2] Molkov V. Hydrogen safety research: state-of-the-art. *Proc. 5th Int. Sem. on Fire and Explosion Hazards*, 2003, art. 28e43.
- [3] Solonin V.I., Markov P.V. Hydrodynamics of a mixing grid-intensifier, developing a convective transfer for pressurized water reactors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2011, no. 3, pp. 18–25. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-3-18-25> (in Russ.).
- [4] Markov P.V., Solonin V.I. Influence of spacer type on fluid dynamics of 7-rod fuel assembly. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2013, no. 1, pp. 38–48 (in Russ.).
- [5] Getya S.I., Krapivtsev V.G., Markov P.V., et al. Modeling temperature nonuniformities in a fuel-element bundle of a VVER-1000 fuel-assembly. *Atomnaya energiya*, 2013, vol. 114, no. 1, pp. 55–57 (in Russ.). (Eng. version: *At. Energy*, 2013, vol. 114, no. 1, pp. 69–72. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9673-3>)
- [6] Amielh M., Djeridane T., Anselmet F., et al. Velocity near-field of variable density turbulent jets. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1996, vol. 39, no. 10, pp. 2149–2164. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00294-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00294-4)

- [7] Circular air jet. *cfm.mace.manchester.ac.uk: website*. URL: <http://cfm.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/doku.php?id=cases:case038> (accessed: 22.11.2020).
- [8] Vargaftik N.B. Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey [Handbook on thermal physical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1972 (in Russ.).
- [9] STAR-CCM+. User guide. Version 2019.3.1. Siemens, 2020.
- [10] Belov I.A., Isaev S.A. Modelirovanie turbulentnykh techeniy [Simulation of turbulent flows]. Sankt-Petersburg, BGTU Publ., 2001 (in Russ.).

Golodnov D.A. — Student, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Sokurenko E.D. — Student, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Komarov R.A. — Student, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Markov P.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Golodnov D.A., Sokurenko E.D., Komarov R.A. Simulation of a stationary jet flow of gases with different densities in a cocurrent air flow. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 02(55). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-02-671.html> (in Russ.).