2. Ferziger J. H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer Verlag, 2002. – 423p.
3. Menter F.R. Zonal two Equation k-ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows. // AIAA Paper 93-2906. – 1993.
4. Schneemann J. Auftriebmessungen in Turbulenter Umgebung. Master Thesis, Institut of Physics, University of Oldenburg, 2009.
5. The OpenFOAM Foundation. – Available at: http://www.openfoam.org/. (accessed 23 August 2016).
6. Walters D. K., D. Cokljat. A Three-Equation Eddy-Viscosity Model for Reynolds-Averaged Navier–Stokes Simulations of Transitional Flow. Journal of Fluids Engineering. – 2008, – Vol. 130. –Issue 12, –P. 121401-1214014.

УДК 519.63; 519.684

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАМИНАРНОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НЕ ПЕРЕМЕШАННОЙ СМЕСИ

***Жайнаков Аманбек Жайнакович**, д.ф.-м.н., академик НАН КР, заведующий кафедрой "ИТиММ" ИГДиГТ им.У.Асаналиева при КГТУ им. И.Раззакова, e-mail: jainakov-41@mail.ru*
***Урмашев Байдаулет Амантаевич,** к.ф.-м.н., профессор, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Республика Казахстан, 050040, г. Алматы, пр.аль-Фараби, 71, e-mail: baidaulet.urmashev@kaznu.kz*
***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*
***Макашев Ерлан Прмаганбетович,** к.ф.-м.н., доцент, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Республика Казахстан, 050040, г. Алматы, пр.аль-Фараби, 71, e-mail: makashev_yerlan@mail.ru*

В работе рассматривается численное моделирование распространения ламинарной предварительно не перемешанной смеси с помощью уравнения Навье-Стокса и уравнения переноса примеси. Для численного решения соответствующих уравнений используется схема расщепления по физическим параметрам. Для численной аппроксимации используется метод контрольного объема. На первом этапе предполагается, что перенос количества движения осуществляется только за счет конвекции и диффузии. Промежуточное поле скорости находится 5-шаговым методом Рунге – Кутта. На втором этапе, по найденному промежуточному полю скорости, находится поле давления. На третьем этапе предполагается, что перенос осуществляется только за счет градиента давления. На четвертом шаге уравнение переноса примеси находится 5-шаговым методом Рунге – Кутта.

Ключевые слова: уравнения Навье-Стокса, перенос веществ, метод контрольного объема, расщепления по физическим параметрам.

NUMERICAL SIMULATION OF SPREADING LAMINAR NON-PREMIXED SPECIES

***Zhainakov A.Zh.**, Doctor of mathematical and physical science, academician of NAN KR, e-mail: jainakov-41@mail.ru*
***Urmashev B.A.,** Candidate of mathematical and physical science, professor, al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, 050040, c. Almaty, av.al-Farabi, 71, e-mail: baidaulet.urmashev@kaznu.kz*

Issakhov A.A., *PhD, associate professor, al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, 050040, c. Almaty, av.al-Farabi, 71, e-mail: alibek.issakhov@gmail.com*
Makashev E.P., *Candidate of mathematical and physical science, associate professor, al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, 050040, c. Almaty, av.al-Farabi, 71, e-mail: makashev_yerlan@mail.ru*

The paper presents the numerical simulation of spreading laminar non-premixed mixture using the Navier-Stokes equations and species transport equation. For the numerical solution of the corresponding equations used projection method. And for numerical approximation used control volume method. In the first step it is assumed that the transfer of momentum carried out only by convection and diffusion. The intermediate velocity field is solved by 5-step Runge - Kutta method. In the second stage, based on the found intermediate velocity field, is the pressure field. In a third step it is assumed that the transfer is carried out only by the pressure gradient. In the fourth step, the species transport equation is solved by 5-step Runge - Kutta method.

Keywords: Navier-Stokes equation, species transfer, control volume method, projection method.

ВВЕДЕНИЕ

Горения используется человечеством на протяжении долгих лет и является одной из древнейших технологий. В настоящие время около 90% всей энергии, обеспечивается именно процессами горения.

В прошлом исследование горения было направлено главным образом на изучение механики сплошной среды, включая тепловыделение за счет химических реакций. Часто это тепловыделение описывалось при помощи термодинамики, что предполагает бесконечно быстрые химические реакции. В определенной степени подобный подход оказался продуктивным для описания стационарных процессов горения, но он недостаточен для понимания переходных процессов, таких как воспламенение и погасание, а также для объяснения образования вредных выбросов, тем более что проблема образования вредных выбросов при горении ископаемых топлив была, есть и будет одной из важнейших задач в будущем [1].

Физическое описание процесса горения является весьма сложной задачей в связи с многообразием явлений, происходящих от момента воспламенения до самого процесса горения. Несмотря на последние достижения, необходимость в изучении процесса горения продолжает оставаться весьма актуальной проблемой. Процесс сгорания топлива является основным процессом, в котором теплота топлива превращается в механическую работу [2, 3, 5, 6].

Использование численных методов моделирования, ориентированных на применение суперкомпьютеров, значительно расширяет возможности математического моделирования, позволяя включить в модель факторы, не учитываемые ранее. Детальный анализ динамики горения топлив предполагает строгий учет всех физических процессов, в том числе процессов конвективного теплообмена между свежим газом и продуктами горения и конструктивными элементами оболочки [4, 11].

Пламена с предварительно не перемешанной смесью имеют более сложную химию, чем пламена с предварительно перемешанной смесью. В области, обогащенной горючим, происходит горение богатой смеси, а в области, обогащенной воздухом, происходит горение бедной смеси. Фронт пламени, который обычно характеризуется интенсивным свечением, располагается в зоне стехиометрической смеси, поскольку, как будет показано ниже, в этой зоне температура максимальна. В отличие от пламен с предварительно перемешанной смесью, пламена с предварительно не перемешанной смесью не распространяются самопроизвольно в сторону свежей непрореагировавшей смеси, и поэтому их нельзя охарактеризовать скоростью распространения ламинарного пламени [1].

В данной работе численно моделируется распространения ламинарной предварительно не перемешанной смеси, так как для эффективного образования пламени процесс, распространения и перемешивания играет очень большую роль.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассматривается развитие круглой струи водорода в коаксиальном потоке кислорода. Безразмерные диаметры струи и потока равны d_1=1, d_2=5, соответственно. Общая длина канала равнялась L_1=40. Зона смешения начинается от кромки сопла, образуется реагирующая смесь, которая распространяется в предварительно не перемешанной смеси в струе водорода и коаксиального потока кислорода в канале. Для моделирования распространения ламинарного предварительно не перемешанной смеси используется уравнения Навье-Стокса, состоящие из уравнения неразрывности и уравнений движения.

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{1}$$

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

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

Для расчета распространения вещества для ламинарного предварительно не перемешанной смеси были использованы уравнения переноса примеси для компонентов Y_A и Y_B.

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

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

Согласно закону Дальтона Y_C вычисляется следующим образом:

$$Y_C=1-Y_A-Y_B \tag{6}$$

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

ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ

Для численного решения уравнения (1) – (6) используется схема расщепления по физическим параметрам [7-10]. Для численной аппроксимации используется метод контрольного объема. На первом этапе предполагается, что перенос количества движения осуществляется только за счет конвекции и диффузии. Промежуточное поле скорости находится 5-шаговым методом Рунге – Кутта [9, 10]. На втором этапе, по найденному промежуточному полю скорости, находится поле давления. Уравнение Пуассона для поля давления решается методом Якоби [8, 9, 10]. На третьем этапе предполагается, что перенос

осуществляется только за счет градиента давления. На четвертом шаге так же, как и уравнения движения, 5-шаговым методом Рунге – Кутта численно решается уравнение для переноса примеси. При решении уравнения для концентрации также применяется метод конечных объемов и аналогичные вычисления как для уравнения:

$$\text{I)}\quad \int_{\Omega}\frac{\vec{u}^{*}-\vec{u}^{n}}{\tau}d\Omega=-\oint_{\partial\Omega}\left(\nabla(\vec{u}^{n}\,\vec{u}^{*}-\tau_{ij})-\nu\Delta\vec{u}^{*}\right)n_i d\Gamma,$$

$$\text{II)}\quad \oint_{\partial\Omega}(\Delta p)d\Gamma=\int_{\Omega}\frac{\nabla\vec{u}^{*}}{\tau}d\Omega,$$

$$\text{III)}\quad \frac{\vec{u}^{n+1}-\vec{u}^{*}}{\tau}=-\nabla p,$$

$$\text{IV)}\quad \int_{\Omega}\frac{C^{*}-C^{n}}{\tau}d\Omega=-\oint_{\partial\Omega}\left(\nabla\vec{u}^{n}\,C^{*}-\chi\Delta C^{*}\right)n_i d\Gamma.$$

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для численного моделирования перемешивания вещества А и В были выбраны кислород O_2 и водород H_2. Также выбираются соответствующие параметры: динамическая вязкость, плотность, коэффициент диффузии и скорости реакции ($O_2+2H_2\xrightarrow{k_1}2H_2O$) для кислорода и водорода. В данной работе скоростной режим задается в двух вариантах, во втором варианте скорость берется два раза больше чем в первом варианте.

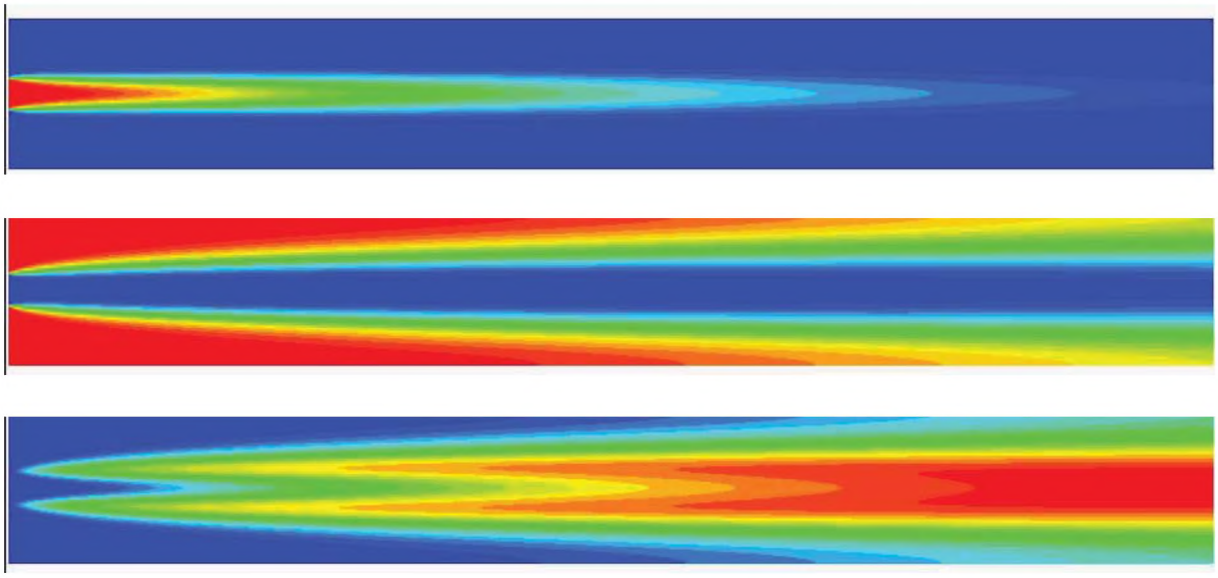

Рис. 1 – Результаты распространения веществ в канале: (а) вещества А, (б) вещества В, (в) вещества С.

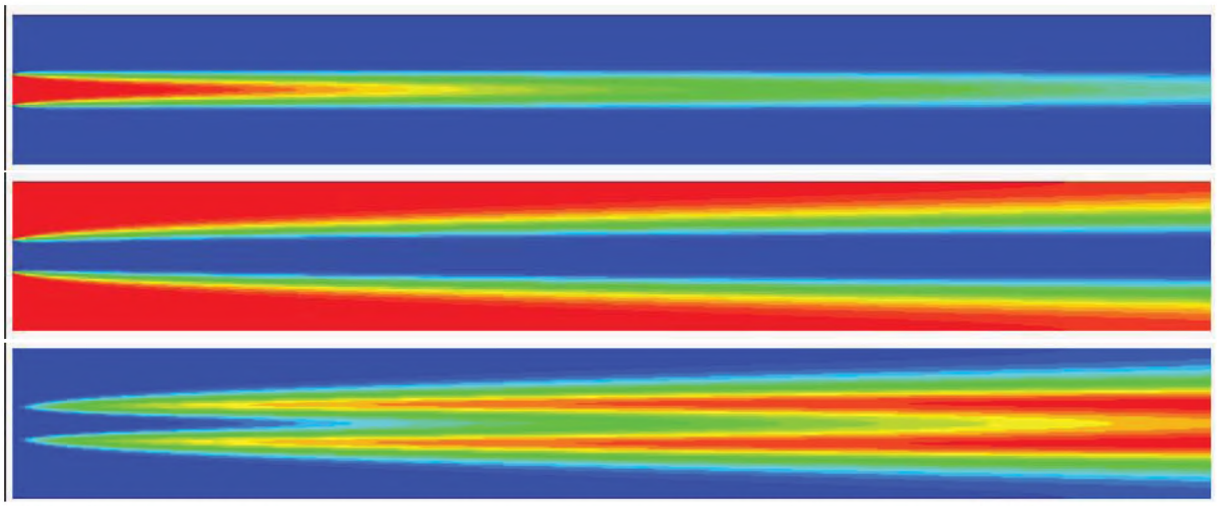

Рис. 2 – Результаты распространения веществ в канале: (а) вещества А, (б) вещества В, (в) вещества С.

На рисунках 1 и 2 представлены численные результаты распространения веществ А, В, С для разных скоростей. Как видно из рисунка 1 при малых скоростях, перемешивания вещества С происходит примерно с середины канала. А на рисунке 2 видно что при увеличение скорости в два раза перемешивания вещества С происходит дальше от середины канала т.е. процесс перемешивания начинается позже.

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. В данной работе было рассмотрено численное моделирования распространения ламинарного предварительно не перемешанной смеси, которые описываются с помощью уравнения Навье-Стокса, состоящие из уравнения неразрывности и уравнений движения, а также уравнения переноса примеси для компонентов А, В, С. Полученные численные результаты показали, что изменение скоростного профиля имеет очень важное значения для перемешивания вещества, так как процесс горения большой степени зависит от эффективного перемешивания вещества.

Список литературы

1. Варнатц Ю.Горение физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ /Ю.Варнатц, У. Маас, Р. Диббл . Пер. с англ. Г.Л. Агафонова. Под ред. П.А. Власова. — М.: ФИЗМАТЛИТ.- 2003. - 352 с.
2. Вибе И.И. Теория двигателей внутреннего сгорания: Конспект лекций /И.И.. Вибе.- Челябинск: Изд-во Челябин. политехи, ин-та, 1974.-252 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей.; Под. ред. Орлина А.С. Круглова М.Г. М.-Машиностроение.- 1980.288 с.
4. Ильина М.А.Моделирование конвективного и радиационного теплообмена в ДВС с искровым зажиганием. Проблемы гидродинамики и тепломассообмена: Сборник научн. статей /М.А Ильина, П.К Сеначин, М.Ю. Свердлов .-Под ред. А.М. Сагапакова.- Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 1999. С. 73-80.
5. Клепов Ю.В. Самовоспламенение метаноловоздушной смеси перед фронтом пламени в камере сгорания ДВС /Ю.В. Клепов // Кинетика и горение. Матер. VIII Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Черноголовка: Изд-во ОИХФ АН СССР, 1986. С. 54-57.

6. Петриченко Р.М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания: Учебное пособие /Р.М.. Петриченко Л.-Изд-во Ленингр. ун-та.- 1983.- 244 с.

7. Chung T. J. Computational Fluid Dynamics. Cambridge University Press, 2002 - p. 1012.

8. Issakhov A. Large eddy simulation of turbulent mixing by using 3D decomposition method. Issue 4 // J. Phys.: Conf. Ser. 318. pp. 1282-1288. -2011. doi:10.1088/1742-6596/318/4/042051.

9. Issakhov A. Mathematical modeling of the discharged heat water effect on the aquatic environment from thermal power plant // International Journal of Nonlinear Science and Numerical Simulation, 16(5). -2015, -229-238 pp., doi:10.1515/ijnsns-2015-0047.

10. Issakhov A. Mathematical modeling of the discharged heat water effect on the aquatic environment from thermal power plant under various operational capacities // Applied Mathematical Modelling (2015), Volume 40, Issue 2, -2016, - 1082-1096 pp. http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2015.06.024.

11. Zhapbasbaev U.K., Makashev E.P. Diffusion combustion of a system of plane supersonic hydrogen jets in a supersonic flow. Combustion explosion and shock waves. 39(4), pp. 415-422.

УДК 519.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕПЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ НАГНЕТАНИЯ ПАРА

Жумагулов Бакытжан Турсынович, *д.т.н., профессор, Национальная инженерная академия Республики Казахстан, Казахстан, 050000, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 80,*
e-mail: nia_rk@mail.ru
Темирбеков Нурлан Муханович, *д.ф-м.н., профессор, Казахстанский инженерно-технологический университет, Казахстан, 050060, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 93 Г/5,*
e-mail: temirbekov@rambler.ru
Байгереев Досан Ракимгалиевич, *Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, Казахстан, 070000, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева 19,* e-mail: dbaigereyev@gmail.com

Работа посвящена моделированию трехфазных неизотермических течений в пористой среде с использованием концепции глобального давления, позволяющей исключить градиенты капиллярных давлений из уравнения для давления с помощью введения замены переменных – глобального давления. Приведена новая постановка данной задачи относительно глобального давления, температуры и двух насыщенностей. Получена априорная оценка для решения разностной задачи. Рассматривается модельная задача оптимального управления для изучаемой модели, которая заключается в минимизации отклонения температуры пласта от заданного распределения температуры к определенному моменту времени разработки посредством управления массового расхода теплоносителя на нагнетательных скважинах. Применен градиентный метод для решения поставленной задачи оптимального управления.

Ключевые слова: трехфазная неизотермическая фильтрация, метод конечных разностей, априорная оценка, оптимальное управление, градиентный метод.