

Труды МАИ. 2025. № 143
Trudy MAI. 2025. No. 143. (In Russ.)

Научная статья

УДК 532.517

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185642>

EDN: <https://www.elibrary.ru/LHVDT5>

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ГАЗА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ПОГЛОЩАЮЩИМИ СТЕНКАМИ

Юрий Алексеевич Никитченко¹, Наталья Ивановна Сергеева²✉

^{1,2}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

¹nikitchenko7@yandex.ru

²natasg777@yandex.ru ✉

Аннотация. В работе представлена физико-математическая модель течения смеси газов в плоском канале с поглощающими стенками. Рассматривается смесь двух газов, один из которых конденсируется на поверхности канала. Расчетная область канала разбита на две подобласти: в пристеночной, кинетической области решается модельное кинетическое уравнение многоатомных газов, в остальной, гидродинамической области – система уравнений двух температурной модели. Проведенные расчеты показали, что примерно на пятистах длинах свободного пробега молекулы происходит почти полная конденсация компонента. На участке интенсивной конденсации скорость обоих компонентов уменьшается (эффект диффузора), затем возрастает.

Ключевые слова: неравновесные течения, смеси газов, течение газа в плоском канале

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации, номер темы FSFF-2023-0008.

Для цитирования: Никитченко Ю.А., Сергеева Н.И. Построение модели течения многокомпонентного газа в плоском канале с поглощающими стенками // Труды МАИ. 2025. № 143. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185642>

Original article

BUILDING A MODEL OF A GAS MIXTURE FLOW IN A PLANE CHANNEL WITH ABSORBING WALLS

Yuri A. Nikitchenko¹, Natalia I. Sergeeva²✉

^{1,2}Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russia

¹nikitchenko7@yandex.ru

²natasg777@yandex.ru✉

Abstract: The paper presents a physical and mathematical model of the flow of a mixture of gases in a plane channel with absorbing walls. The model considers a mixture of two gases, one of which condenses on the surface of the channel. The surface temperature is lower than the temperature of the gas mixture at the entrance to the channel. The computational domain of the channel is divided into two subdomains: in the near-wall, kinetic domain, the model kinetic equation of polyatomic gases is solved, while in the remaining, hydrodynamic domain, a system of equations of a two-temperature model is solved.

The Knudsen number calculated from the cross-section of the channel is 0.01, which corresponds to the upper boundary of the transition region. The computational grids of the computational domains have the following characteristics. The grid step of the hydrodynamic domain, both in the longitudinal and transverse directions, is equal to the average free path of the molecule. The grid step of the kinetic domain in the longitudinal direction is five times the free path. The grid step in the transverse direction near the channel surface is 0.1 of the free path.

In the area of the two-temperature model and the model kinetic equation crossover, an approximating Navier-Stokes type function is constructed by the parameters of the two-temperature model. The model kinetic equation is integrated along the longitudinal axis of the velocity space and is solved only along the transverse axis.

The boundary conditions on the surface of the channel were set as follows: - for the non-condensable component, the diffuse law of reflection of molecules was adopted,

- for the condensed component, in the case of its condensation, the density and pressure were assumed to be equal to the pressure of the saturated vapor of this component; if the density of the molecular flux falling on the surface became less than the density of the molecular flux created by the liquid phase, then the diffuse law of reflection of molecules from the surface was adopted.

The calculations showed that at approximately five hundred mean free paths of the molecule, almost complete condensation of the component occurs. In the area of intensive condensation, the speed of both components decreases (diffuser effect), and then increases.

Keywords: nonequilibrium flows, gas mixtures, gas flow in a plane channel

Funding: The work was carried out as part of a state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (topic number FSFF-2023-0008)

For citation: Nikitchenko Yu.A., Sergeeva N.I. Building a model of a gas mixture flow in a plane channel with absorbing walls. *Trudy MAI*. 2025. No. 143. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185642>

Введение

В настоящее время описание высоконерасовновесных течений смесей газов является весьма актуальной задачей. К таким течениям относятся обтекания химически активных и конденсирующих газ поверхностей.

Течение в прямом цилиндрическом или плоском канале является одной из таких задач. Подобные течения изучались в рамках большого количества работ [1, 2, 3]. В данных работах решение задачи представлено для однокомпонентного газа. Течения многокомпонентных газов представлены в работах [4, 5].

Существуют различные подходы к исследованию неравновесных течений. Так, в [6] и [7] достаточно подробно описаны решения для различных видов каналов. Решения были получены для свободномолекулярного режима течения, также показаны результаты решения модельных кинетических уравнений для однокомпонентного газа. В классической работе [8] рассмотрены также течения многокомпонентных газов.

Имеется ряд работ по микроканалам. Так, в [9] построено решение на основе БГК-модели для течения разреженного газа в канале. В работе [10] исследуются течения в каналах с помощью CFD – методов.

Имеются также экспериментальные работы по исследованию течений в различных каналах [11, 12].

Имеется работа, где в рамках уравнений Навье–Стокса рассматривается течение вязкой несжимаемой жидкости между неподвижными параллельными проницаемыми стенками [13]. Также имеется много работ, посвященных исследованиям ламинарно-турбулентных переходов в каналах [14,15]

Также имеется ряд работ, посвященных течениям в каналах с перфорированными стенками [16, 17, 18, 19]. В данных работах рассматривается течения, аналогичные двумерному течению Пуазейля в плоском канале, но в предположении, что в стенках канала имеются отверстия, через которые прокачивается газ. Также имеются работы, посвященные постановке граничных условий в высоконервных потоках [20].

Цель работы

Целью настоящей работы является разработка физико-математической модели течения высоконервного многокомпонентного газа в канале с поглощающими стенками.

Основные задачи работы:

1. Адаптация двухтемпературной модели к решению задачи о течении в канале.

2. Разработка метода решения кинетической модели на разреженной расчетной сетке.

1. Постановка задачи

Во некоторых работах, упомянутых выше, движение газов в канале описывалось с помощью методов механики сплошной среды, что справедливо для малых чисел Кнудсена. Однако, в сильнонеравновесных областях при числах Кнудсена $Kn \approx 10^{-2}$ модели сплошной среды выдают значительные ошибки. Более того, модели сплошной среды не описывает взаимодействие с поглощающей поверхностью физически корректно. Таким образом, следует использовать кинетические методы описания течения.

В данной работе рассмотрен плоский канал шириной h . Рассчитывается течение двухкомпонентной смеси газа, один из компонентов которой конденсируется поверхностями стенок. В данной работе расчетная область канала построена следующим образом. Имеется пристеночная область, где решается модельное кинетическое уравнение для смеси газов, полученное в работах [21, 22]. Также имеется область, где решаются уравнения гидродинамики. На границе между областями находится область сшивания кинетической и гидродинамической моделей.

Схема задачи показана на рис. 1.1. В силу симметрии канала рассматривается нижняя его половина. Поток движется слева направо.

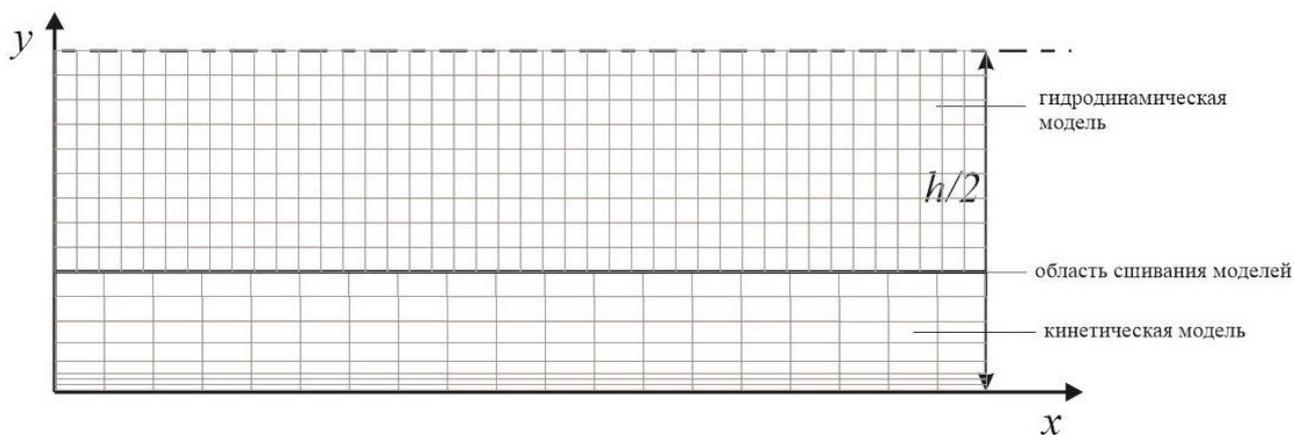


Рис.1.1. Схема течения

Граничные условия были поставлены следующим образом: на левой границе заданы давление и плотность потока, на правой границе задано распределение скорости неконденсируемого компонента смеси. Распределение скорости конденсируемого компонента задается на левой границе и принимается равным распределению неконденсируемого компонента, полученного после очередного шага по времени.

Граничные условия на поверхности канала выставлялись следующим образом:

- для неконденсируемого компонента принимался диффузный закон отражения молекул,
- для конденсируемого компонента, в случае его конденсации, плотность и давление принимались равными давлению насыщенного пара этого компонента; если плотность молекулярного потока, падающего на поверхность, становилась меньше плотности молекулярного потока, создаваемого жидкой фазой, то принимался диффузный закон отражения молекул от поверхности.

В качестве единиц измерения физических величин, входящих в систему уравнений, приняты:

скорость – $\sqrt{RT_A}$,

время – $h/\sqrt{RT_A}$,

геометрический размер – h ,

длина свободного пробега – $\frac{\mu_A}{p_A} \sqrt{RT_A}$,

число Кнудсена – $\frac{\mu_A}{p_A \sqrt{RT_A} h}$,

вязкость – μ_A ,

концентрация – n_A ,

плотность – ρ_A ,

температура – T_A ,

напряжение – $\rho_A RT_A$, где индекс «А» означает параметры атмосферы.

Давление на входе в канал составляло 1.2, число Кнудсена 10^{-2} , что соответствует каналу с поперечным сечением примерно 1 мм. Удлинение канала принято равным 15.

2. Физико-математическая модель

В качестве кинетической модели в пристеночном слое было использовано модельное кинетическое уравнение для смеси газов, ранее полученное в работах [23, 24]. В этой модели параметры газа (плотность, скорость, температура, коэффициент вязкости и т.п.) обозначены верхними индексами K для рассматриваемого компонента и N – для фонового. Модельное кинетическое уравнение K -компонента смеси многоатомных газов в общем случае имеет вид:

$$\frac{\partial f^K}{\partial t} + \xi_\alpha \frac{\partial f^K}{\partial x_\alpha} = \nu^{KK} (f^{+KK} - f^K) + \sum_{N \neq K} \nu_N^K (f_N^{+K} - f^K) \quad (2.1)$$

Здесь $f(t, x_1, x_2, x_3, \xi_1, \xi_2, \xi_3, \varepsilon)$ – функция распределения молекул по скоростям, ξ_i – проекция молекулярной скорости, ε – энергия вращения молекулы. ν^{KK} и ν_N^K – частоты KK и KN столкновений. f^{+KK} и f_N^{+K} – функции распределения молекул после KK и KN столкновений. Повторяющийся подстрочный греческий индекс подразумевает суммирование одночлена по всем значениям соответствующей координаты (нотация Эйнштейна).

Для сокращения объема памяти вычислительного средства и уменьшения количества вычислительных операций модельное кинетическое уравнение было упрощено до следующего вида:

$$\xi_y \frac{\partial f^K}{\partial y} = \nu^{KK} (f^{+KK} - f^K) + \nu_N^K (f_N^{+K} - f^K)$$

Для кинетической модели использовалась сетка с увеличенным по оси x шагом и составляла 5 длин свободного пробега молекул (рис. 1.1). По оси y применялась сетка с переменным шагом, которая составляла одну длину пробега области сшивания и 0.1 длину пробега у поверхности канала.

Размер кинетической области по оси y составлял три длины свободного пробега молекулы. Таким образом, в силу малого размера этой области, кинетическая модель, по существу, лишь формировала граничные условия для гидродинамической модели. Это позволило физически адекватно взаимодействие газа с конденсирующей поверхностью.

Для решения кинетического уравнения был применялся метод с разностями против молекулярного потока в двух направлениях ($\xi_y > 0$ и $\xi_y < 0$).

В качестве гидродинамической модели была использована двухтемпературная модель. Подробное описание модели приведено в [23, 24]. Выражения для поступательной и вращательной температур были получены интегрированием модельного кинетического уравнения (2.1) по пространству скоростей. В общем виде уравнения для температур выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_t^K}{\partial t} + u_\alpha^K \frac{\partial T_t^K}{\partial x_\alpha} + \frac{2}{3} T_t^K \frac{\partial u_\alpha^K}{\partial x_\alpha} + \frac{2}{3} \frac{P_{\alpha\beta}^K}{\rho^K R^K} \frac{\partial u_\alpha^K}{\partial x_\alpha} + \frac{2}{3} \frac{1}{\rho^K R^K} \frac{\partial \varphi_\alpha^K}{\partial x_\alpha} = v^{KK} (T_t^{+K} - T_t^K) + \\ + \sum_{N \neq K} v_N^K \left((T_t^{+K} - T_t^K) + \frac{1}{3R^K} \left(\frac{m^N}{m^K + m^N} \right)^2 (\mathbf{u}^N - \mathbf{u}^K)^2 \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial T_r^K}{\partial t} + u_\alpha^K \frac{\partial T_r^K}{\partial x_\alpha} + \frac{1}{\frac{5-3\gamma^K}{2(\gamma^K-1)} \rho^K R^K} \frac{\partial \omega_\alpha^K}{\partial x_\alpha} = v^K (T_r^{+K} - T_r^K) + \sum_{N \neq K} v_N^K \left((T_r^+)^K_N - T_r^K \right)$$

Полная система уравнений в безразмерном виде для плоского канала для двухкомпонентного газа приведена ниже:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{\partial \rho^K}{\partial t} + u_x^K \frac{\partial \rho^K}{\partial x} + u_y^K \frac{\partial \rho^K}{\partial y} + \rho^K \left(\frac{\partial u_x^K}{\partial x} + \frac{\partial u_y^K}{\partial y} \right) = 0 \\
\frac{\partial u_x^K}{\partial t} + u_x^K \frac{\partial u_x^K}{\partial x} + u_y^K \frac{\partial u_x^K}{\partial y} + \frac{1}{\rho^K} \left(\frac{\partial P_{xx}^K}{\partial x} + \frac{\partial P_{xy}^K}{\partial y} \right) = v_N^K \frac{m^N}{m^K + m^N} (u_x^N - u_x^K) \\
\frac{\partial u_y^K}{\partial t} + u_x^K \frac{\partial u_y^K}{\partial x} + u_y^K \frac{\partial u_y^K}{\partial y} + \frac{1}{\rho^K} \left(\frac{\partial P_{xy}^K}{\partial x} + \frac{\partial P_{yy}^K}{\partial y} \right) = v_N^K \frac{m^N}{m^K + m^N} (u_y^N - u_y^K) \\
\frac{\partial T_t^K}{\partial t} + u_x^K \frac{\partial T_t^K}{\partial x} + u_y^K \frac{\partial T_t^K}{\partial y} + \frac{2}{3} T_t^K \left(\frac{\partial u_x^K}{\partial x} + \frac{\partial u_y^K}{\partial y} \right) + \\
\frac{2}{3} \frac{1}{n^K} \left\{ p_{xx}^K \frac{\partial u_x^K}{\partial x} + p_{xy}^K \left(\frac{\partial u_x^K}{\partial x} + \frac{\partial u_y^K}{\partial y} \right) + p_{yy}^K \frac{\partial u_y^K}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_x^K}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_y^K}{\partial y} \right\} = \\
v^{KK} (T_t^{+K} - T_t^K) + v_N^K \left((T_t^{+K} - T_t^K) + \frac{m^K}{3} \left(\frac{m^N}{m^K + m^N} \right)^2 (\mathbf{u}^N - \mathbf{u}^K)^2 \right) \\
\frac{\partial T_r^K}{\partial t} + u_x^K \frac{\partial T_r^K}{\partial x} + u_y^K \frac{\partial T_r^K}{\partial y} + \frac{2(\gamma^K - 1)}{(5 - 3\gamma^K) n^K} \left(\frac{\partial \omega_x^K}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y^K}{\partial y} \right) = \\
v_K^K (T_r^{+K} - T_r^K) + v_N^K \left((T_r^+)^K - T_r^K \right)
\end{array} \right.$$

Здесь $P_{xx}^K = n^K T_t^K + p_{xx}^K$, $P_{yy}^K = n^K T_t^K + p_{yy}^K$,

$$p_{xx}^K = -\frac{4}{3} \mu^K \frac{\partial U_x^K}{\partial x} + \frac{2}{3} \mu^K \frac{\partial U_y^K}{\partial y}, \quad p_{yy}^K = -\frac{4}{3} \mu^K \frac{\partial U_y^K}{\partial y} + \frac{2}{3} \mu^K \frac{\partial U_x^K}{\partial x},$$

$$p_{xy}^K = -\mu^K \left(\frac{\partial U_x^K}{\partial y} + \frac{\partial U_y^K}{\partial x} \right),$$

$$\varphi_x^K = -\frac{15}{4} \frac{\mu^K}{m^K} \frac{\partial T_t^K}{\partial x}, \quad \varphi_y^K = -\frac{15}{4} \frac{\mu^K}{m^K} \frac{\partial T_t^K}{\partial y},$$

$$\omega_x^K = -\frac{5 - 3\gamma^K}{2(\gamma^K - 1)} \frac{\mu^K}{m^K} \frac{\partial T_r^K}{\partial x}, \quad \omega_y^K = -\frac{5 - 3\gamma^K}{2(\gamma^K - 1)} \frac{\mu^K}{m^K} \frac{\partial T_r^K}{\partial y}$$

Вязкость компонента определяется в работе [25] и имеет следующий вид:

$$\mu^K = \frac{n^K T_t^K}{v^{KK} + v_N^K}$$

Для решения двухтемпературной модели был использован метод прогонки с разделением по времени. Шаг сетки принимался постоянным и составлял длину пробега молекул.

3. Анализ полученных результатов

При проведении расчетов температура поверхности принималась 274 К, а давление насыщенного пара конденсируемого компонента 0.01 кПа.

На 3.1 показано распределение скорости по оси x для обоих компонент газа и расход газа для второго компонента. Данные зависимости показывают уменьшение расхода газа для конденсируемого компонента, что объясняется его поглощением стенками канала. Также видно, что на участке от $x = 0$ до $x = 5$ наблюдается снижение скорости обоих компонент газа. Это объясняется интенсивным поглощением одного из компонент газа на данном участке, что приводит к эффекту, схожему с происходящим в диффузоре. Кроме того, имеет место эффект межкомпонентного взаимодействия, при котором конденсируемый компонент увлекает к стенке неконденсируемый компонент. После данного участка, в связи с тем, что значительная часть конденсируемого компонента поглощена, происходит увеличение скорости обоих компонентов за счет градиента давлений по длине канала.

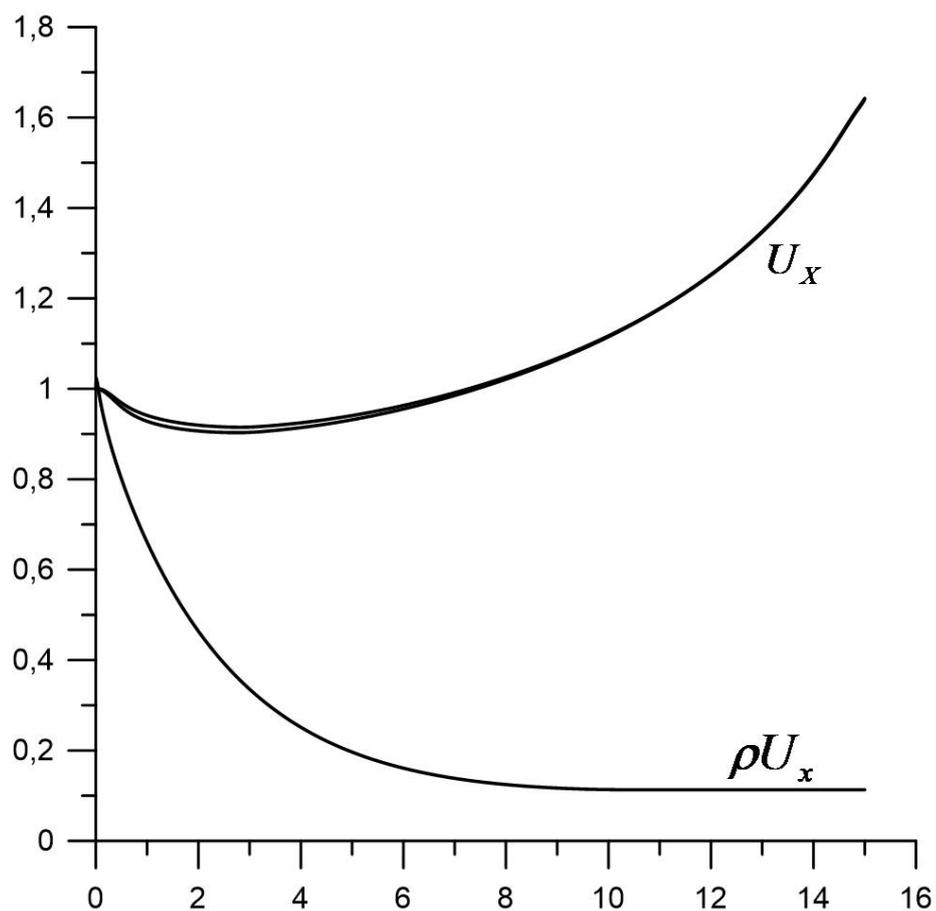


Рис. 3.1. – Распределение скоростей обеих компонент и массового расхода конденсируемого компонента по длине канала

На рис. 3.2. показаны линии тока обеих компонент газа в канале. Видно, что интенсивное поглощение конденсируемого компонента происходит на первой трети длины канала. Также видно слабое отклонение линий тока неконденсируемого компонента от оси симметрии канала за счет межмолекулярных взаимодействий компонентов.

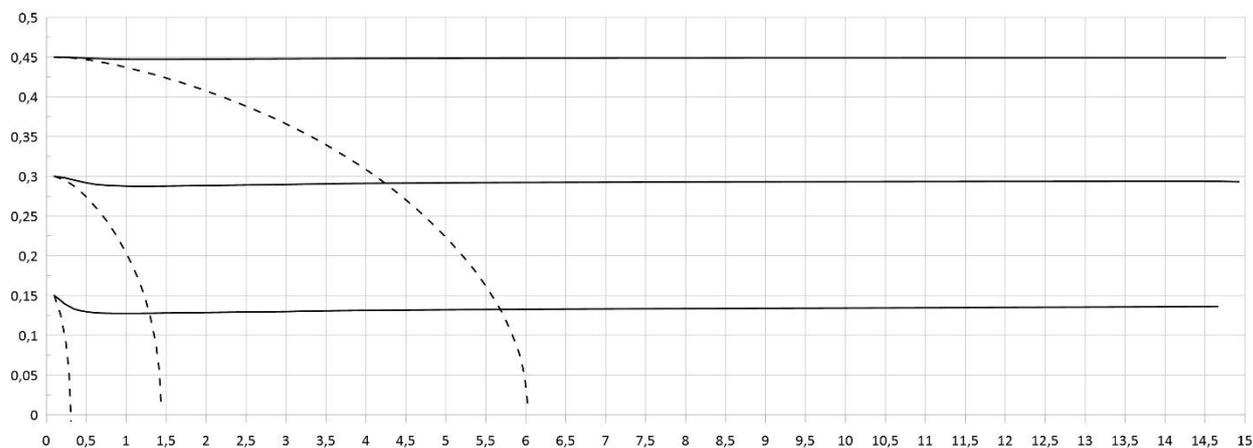


Рис. 3.2. – Линии тока в канале. Сплошные линии – неконденсируемый компонент, пунктир – конденсируемый компонент. Масштаб по оси у увеличен в 10 раз. Линии сетки не соответствуют рис.1.1.

Заключение

Разработана физико-математическая модель сильнонеравновесного течения в канале с поглощающими стенками. Разработанная модель позволяет физически адекватно выставлять граничные условия на конденсирующей поверхности (поглощающей поверхности), не требуя больших объемов памяти и количества вычислительных операций.

Показано, что за счет конденсации одного из компонентов, а также за счет межкомпонентного взаимодействия скорость второго компонента замедляется даже при наличии градиента давления вдоль канала.

Список источников

1. Минаков А.В., Лобасов А.С., Дектерев А.А. Моделирование гидродинамики и конвективного теплообмена в микроканалах // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5, № 4. С. 481-48.
2. Колодежнов В.Н., Веретенников А.С. Течение в цилиндрическом канале нелинейной вязкопластической жидкости // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168169>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-09](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-09)
3. Гулакова С.В., Попов В.Н. Аналитическое решение уравнения Вильямса в задаче о течении Пуазейля с использованием зеркально-диффузной модели взаимодействия молекул газа со стенками канала // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, № 4. С. 130-137.
4. Lorenzani S. A microchannel flow application of a linearized kinetic Bhatnagar-Gross-Krook-type model for inert gas mixtures with general intermolecular forces // Physics of Fluids. 2019. Vol. 31, P. 072001. DOI: [10.1063/1.5098013](https://doi.org/10.1063/1.5098013)
5. Sabouri M., Darbandi M. Numerical study of species separation in rarefied gas mixture flow through micronozzles using DSMC // Physics of Fluids. 2019. Vol. 31, P. 042004. DOI: [10.1063/1.5083807](https://doi.org/10.1063/1.5083807)
6. Кошмаров Ю.А., Рыжов Ю.А. Прикладная динамика разреженного газа. - М.: Машиностроение, 1977. - 184 с.
7. Шарипов Ф.М., Селезнев В.Д. Движение разреженных газов в каналах и микроканалах. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – 230 с.
8. Коган М.Н. Динамика разреженного газа. - М.: Наука, 1967. - 440 с.

9. Лукашев В.В., Попов В.Н., Юшканов А.А. Математическое моделирование процессов переноса в плоских каналах // Журнал Средневолжского математического общества. 2011. Т. 13, № 2. С. 81–91.
10. Минаков А.В., Лобасов А.С., Дектерев А.А. Моделирование гидродинамики и конвективного теплообмена в микроканалах // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5, № 4. С. 481-488.
11. Иванов А.И. Экспериментальное исследование течения газа вблизи перфорированных стенок трансзвуковой аэродинамической трубы // Ученые записки ЦАГИ. 1987. Т. 18, № 3. С. 131-135.
12. Tikekar M., Shiv S.G., Agrawal A. Measurement and modeling of pulsatile flow in microchannel // Microfluidics and Nanofluidics. 2010. Vol. 9, Issue 6. P. 1225-1240. DOI: [10.1007/s10404-010-0642-z](https://doi.org/10.1007/s10404-010-0642-z)
13. Сизых Г.Б. Течение пуазейлевского типа в канале с проницаемыми стенками // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: физико-математические науки. 2022. Т. 26, № 1. С. 190-201. DOI: [10.14498/vsgtu1900](https://doi.org/10.14498/vsgtu1900)
14. Хатунцева О.Н. Об учете влияния стохастических возмущений на решения уравнений Навье-Стокса в задаче Хагена-Пуазейля // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=93311>
15. Хатунцева О.Н. О нахождении критического числа Рейнольдса ламинарно-турбулентного перехода в задаче Хагена-Пуазейля // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=96567>

16. Панасенко А.В., Даньков Б.Н., Архиреева Е.Ю. Результаты расчета трансзвукового течения газа в плоском канале, разделенном перфорированными стенками // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т. 19, № 4. DOI: <http://doi.org/10.33257/PhChGD.19.4.772>
17. Блохин А.М., Семенко Р.Е. Поиск стационарных течений пуазейлевского типа для несжимаемой полимерной жидкости в каналах с перфорированными стенками // Прикладная механика и техническая физика. 2022. № 1. С. 33-41. DOI: [10.15372/PMTF20220105](http://doi.org/10.15372/PMTF20220105)
18. Блохин А.М., Ткачёв Д.Л. Неустойчивость по Ляпунову стационарных течений полимерной жидкости в канале с перфорированными стенками: математический сборник. – М.: Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук. 2022. Т. 213, № 3. С. 3–20.
19. Нейланд В.М. Оптимальная проницаемость стенок аэродинамической трубы при малых сверхзвуковых скоростях // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1989. № 4. С. 187-189.
20. Березко М.Е. Влияние выбора граничных условий на результаты расчета пристеночных течений // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=164197>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-09](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-09)
21. Никитченко Ю.А., Попов С.А., Сергеева Н.И. Система модельных кинетических уравнений для многокомпонентного газа // Теплофизика высоких температур. 2023. Т. 61, № 5. С. 736–743. DOI: [10.31857/S0040364423050113](https://doi.org/10.31857/S0040364423050113)

22. Никитченко Ю.А., Сергеева Н.И. Модельное кинетическое уравнение для смеси одно и многоатомных газов // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. 2024. № 1. С. 56–67. DOI: [10.18384/2949-5067-2024-1-56-67](https://doi.org/10.18384/2949-5067-2024-1-56-67)
23. Жданов В.М., Алиевский М.Я. Процессы переноса и релаксации в молекулярных газах. - М.: Наука, 1989. - 336 с.
24. Никитченко Ю.А. О целесообразности учета коэффициента объемной вязкости в задачах газовой динамики // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 2018. № 2. С. 128-138.
25. Никитченко Ю.А., Сергеева Н.И. Особенности формирования ударных волн в газовой смеси в зависимости от концентрации ее компонентов // Теплофизика высоких температур. 2024. Т. 62, № 5. С. 704–712. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0040364424050085>

References

1. Minakov A.V., Lobasov A.S., Dekterev A.A. Modeling of Hydrodynamics and Convective Heat Transfer in Microchannels. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred.* 2012. Vol. 5, No. 4. P. 481-48. (In Russ.)
2. Kolodezhnov V.N., Veretennikov A.S. Flow in a cylindrical channel of a nonlinear viscoplastic fluid. *Trudy MAI.* 2022. No. 125. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168169>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-09](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-09)

3. Gulakova S.V., Popov V.N. Analytical Solution of the Williams Equation in the Poiseuille Flow Problem Using the Mirror-Diffusion Model of Gas Molecules' Interaction with the Channel Walls. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2015. Vol. 85, No. 4. P. 130-137. (In Russ.)
4. Lorenzani S. A microchannel flow application of a linearized kinetic Bhatnagar-Gross-Krook-type model for inert gas mixtures with general intermolecular forces. *Physics of Fluids*. 2019. Vol. 31, P. 072001. DOI: [10.1063/1.5098013](https://doi.org/10.1063/1.5098013)
5. Sabouri M., Darbandi M. Numerical study of species separation in rarefied gas mixture flow through micronozzles using DSMC. *Physics of Fluids*. 2019. Vol. 31, P. 042004. DOI: [10.1063/1.5083807](https://doi.org/10.1063/1.5083807)
6. Koshmarov Yu.A., Ryzhov Yu.A. *Prikladnaya dinamika razrezhennogo gaza* (Applied Dynamics of Rarefied Gas). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. 184 P.
7. Sharipov F.M., Seleznev V.D. *Dvizhenie razrezhennykh gazov v kanalakh i mikrokanalakh* (Motion of Rarefied Gases in Channels and Microchannels). Ekaterinburg: UrO RAN Publ., 2008. 230 p.
8. Kogan M.N. *Dinamika razrezhennogo gaza* (Dynamics of Rare Gas). Moscow: Nauka Publ., 1967. 440 p.
9. Lukashev V.V., Popov V.N., Yushkanov A.A. Mathematical Modeling of Transfer Processes in Flat Channels. *Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva*. 2011. Vol. 13, No. 2. P. 81–91. (In Russ.)
10. Minakov A.V., Lobasov A.S., Dekterev A.A. Modeling of Hydrodynamics and Convective Heat Transfer in Microchannels. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2012. Vol. 5, No. 4. P. 481-488. (In Russ.)

11. Ivanov A.I. Experimental study of gas flow near perforated walls of a transonic wind tunnel. *Uchenye zapiski TSAGI*. 1987. Vol. 18, No. 3. P. 131-135. (In Russ.)
12. Tikekar M., Shiv S.G., Agrawal A. Measurement and modeling of pulsatile flow in microchannel. *Microfluidics and Nanofluidics*. 2010. Vol. 9, Issue 6. P. 1225-1240. DOI: [10.1007/s10404-010-0642-z](https://doi.org/10.1007/s10404-010-0642-z)
13. Sizykh G.B. Poiseuille-type flow in a channel with permeable walls. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: fiziko-matematicheskie nauki*. 2022. Vol. 26, No. 1. P. 190-201. (In Russ.). DOI: [10.14498/vsgtu1900](https://doi.org/10.14498/vsgtu1900)
14. Khatuntseva O.N. On accounting for stochastic disturbances effect on Navier-Stokes equations solution in Hagen-Poiseuille problem. *Trudy MAI*. 2018. No. 100. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93311>
15. Khatuntseva O.N. On finding the critical Reynolds number of laminar-turbulent transition in Hagen-Poiseuille problem. *Trudy MAI*. 2018. No. 101. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=96567>
16. Panasenko A.V., Dan'kov B.N., Arkhireeva E.Yu. Results of Calculation of Transonic Gas Flow in a Flat Channel Divided by Perforated Walls. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoi dinamike*. 2018. Vol. 19, No. 4. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.33257/PhChGD.19.4.772>
17. Blokhin A.M., Semenko R.E. Search for Stationary Poiseuille-Type Flows for an Incompressible Polymer Fluid in Channels with Perforated Walls. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2022. No. 1. P. 33-41. (In Russ.). DOI: [10.15372/PMTF20220105](https://doi.org/10.15372/PMTF20220105)

18. Blokhin A.M., Tkachev D.L. *Neustoichivost' po Lyapunovu statsionarnykh techenii polimernoj zhidkosti v kanale s perforirovannymi stenkami: matematicheskii sbornik* (Lyapunov Instability of Stationary Flows of a Polymer Fluid in a Channel with Perforated Walls: Mathematical Collection). Moscow: Matematicheskii institut im. V.A. Steklova Rossiiskoi akademii nauk Publ., 2022. Vol. 213, No. 3. P. 3–20.
19. Neiland V.M. Optimal Permeability of Wind Tunnel Walls at Low Supersonic Speeds. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*. 1989. No. 4. P. 187-189. (In Russ.).
20. Berezko M.E. Influence of the choice of boundary conditions on the results of the calculation of wall mounted flows. *Trudy MAI*. 2022. No. 122. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164197>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-09](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-09)
21. Nikitchenko Yu.A., Popov S.A., Sergeeva N.I. System of Model Kinetic Equations for a Multicomponent Gas. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2023. Vol. 61, No. 5. P. 736–743. (In Russ.). DOI: [10.31857/S0040364423050113](https://doi.org/10.31857/S0040364423050113)
22. Nikitchenko Yu.A., Sergeeva N.I. Model kinetic equation for a mixture of mono- and polyatomic gases. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta prosveshcheniya. Seriya: Fizika-Matematika*. 2024. No. 1. P. 56–67. (In Russ.). DOI: [10.18384/2949-5067-2024-1-56-67](https://doi.org/10.18384/2949-5067-2024-1-56-67)
23. Zhdanov V.M., Alievskii M.Ya. *Protsessy perenosa i relaksatsii v molekulyarnykh gazakh* (Transfer and Relaxation Processes in Molecular Gases). Moscow: Nauka Publ., 1989. 336 p.
24. Nikitchenko Yu.A. On the expediency of taking into account the coefficient of volumetric viscosity in gas dynamics problems. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*. 2018. No. 2. P. 128-138. (In Russ.).

25. Nikitchenko Yu.A., Sergeeva N.I. Features of the formation of shock waves in a gas mixture depending on the concentration of its components. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2024. Vol. 62, No. 5. P. 704–712. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0040364424050085>

Статья поступила в редакцию 01.08.2025

Одобрена после рецензирования 04.08.2025

Принята к публикации 25.08.2025

The article was submitted on 01.08.2025; approved after reviewing on 04.08.2025; accepted for publication on 25.08.2025