Для цитирования: А.А. Сидоров, А.К. Ястребов. Интеграция модуля численного решения кинетического уравнения в CFD-пакет для задачи объемной конденсации при истечении парогазовой смеси через сопло. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 65-75. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-65-75

For citation: A. A. Sidorov, A.K. Yastrebov. Integration of the numerical solution module of the kinetic equation into the CFD package for the volume condensation problem of the vapor-gas mixture flow through a nozzle. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 65-75. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-65-75

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING**

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-65-75

**ИНТЕГРАЦИЯ МОДУЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ В
CFD-ПАКЕТ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ПАРОГАЗОВОЙ
СМЕСИ ЧЕРЕЗ СОПЛО**

А.А. Сидоров, А.К. Ястребов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, Россия

Резюме. Цель. Интеграция модуля численного решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам в CFD-пакет. Применение модуля к задаче объемной конденсации при сверхзвуковом истечении парогазовой смеси через сопло в двумерной постановке, сравнение результатов с экспериментальными данными сторонних авторов. **Метод.** В настоящей работе задача об объемной конденсации при сверхзвуковом истечении парогазовой смеси через сопло решается методами конечных элементов в двумерной постановке с использованием пользовательских функций UDF. **Результат.** Представлен модуль для численного решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам, выполненный в виде пользовательской функции UDF, интегрированной в расчетный CFD-пакет. **Вывод.** Применение модуля к задаче об объемной конденсации при истечении парогазовой смеси через сопло дало качественное во всех областях и количественное согласование в области интенсивной конденсации с экспериментальными данными. Представлены распределения температур, давлений, степени пересыщения как вдоль центральной оси, так и на плоскости, ограниченной контуром расчетной области. Показано, что модуль не зависит от типа решателя (стационарный или нестационарный).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90247.

Ключевые слова: объемная конденсация, CFD, методы конечных элементов, прямое численное решение, кинетическое уравнение, сверхзвук, сопло

**INTEGRATION OF THE NUMERICAL SOLUTION MODULE OF THE KINETIC EQUATION
INTO THE CFD PACKAGE FOR THE VOLUME CONDENSATION PROBLEM
OF THE VAPOR-GAS MIXTURE FLOW THROUGH A NOZZLE**

A.A. Sidorov, A.K. Yastrebov

National Research University «MPEI»,
14 Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

Abstract. Objective. Integrating the numerical solution module of the kinetic equation for the droplet size distribution function in a CFD package. Application of the module to volumetric condensation at the supersonic flow of a vapor-gas mixture through a nozzle in a two-dimensional formulation, comparison of the results with experimental data of third-party authors. **Methods.** In this paper, the problem of volume condensation in the supersonic flow of a vapor-gas mixture through a nozzle is

*solved by finite element methods in a two-dimensional formulation using user-defined functions. **Results.** A module for the numerical solution of the kinetic equation for the droplet size distribution function is presented as a user-defined function integrated into the calculated CFD package. **Conclusion.** The module application to volumetric condensation for a vapor-gas mixture flow through the nozzle gave a qualitative agreement in all areas and a quantitative agreement in the area of intense condensation with measurement data. The distributions of temperatures, pressures, and the degree of supersaturation are presented both along the central axis and on the plane bounded by the contour of the computational domain. It is shown that the module does not depend on the solver type (stationary or non-stationary).*

Acknowledgments. The research was carried out with the financial support of the RFBR in the framework of the scientific project No. 19-38-90247.

Keywords: volume condensation, CFD, finite element methods, direct numerical solution, kinetic equation, supersonic sound, nozzle

Введение. Явление объемной конденсации достаточно широко распространено в природе и технике, однако, ввиду высокой сложности описания сильно неравновесных систем, существует несколько подходов к решению такого рода задач. Одним из таких методов является решение кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам [1].

Ранее авторами в работе [2] было рассмотрено сверхзвуковое истечение парогазовой смеси через сопло в одномерном приближении. Однако некоторые задачи требуют рассмотрения в двумерном и даже трехмерном виде.

Постановка задачи. Глобальная задача настоящего исследования – подготовка универсального модуля решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам, позволяющего проводить исследования фазовых переходов в проточных частях машин и аппаратов криогенной техники, без существенных ограничений по рассматриваемой геометрии и жестких требований к расчетным режимам. С развитием новых технологий, в частности, трехмерного компьютерного моделирования процессов теплообмена и гидродинамики методами конечных объемов (CFD) появилась возможность проектировать сложные машины и агрегаты с существенно меньшими экономическими и временными затратами. Вместе с тем при стремительном росте интереса к CFD-исследованиям современные расчетные пакеты не способны охватить весь спектр научно-инженерных задач. В частности, несмотря на требования турбомашиностроения, модели фазовых переходов, которые с достаточной точностью описывают протекающие процессы, до сих пор не были включены в стандартный функционал.

Методы исследования. В настоящей работе подготовка модуля и его последующая интеграция в расчетный пакет производится на примере решения задачи об объемной конденсации при истечении парогазовой смеси через сопло в двумерной нестационарной постановке. В качестве первого приближения для оценки эффективности работы модуля ставится задача качественного согласования с имеющимися экспериментальными данными [3].

Рассматривается парогазовая смесь, состоящая из азота N₂, выступающего в качестве неконденсирующегося газа-носителя, и паров тяжелой воды D₂O. Выбор компонентов смеси обусловлен наличием экспериментальных данных [3]. Теплофизические свойства компонентов смеси принимаются зависимыми от температуры, [4-6] уравнения термогазодинамики решаются в приближении сжимаемого идеального газа. Задача решается в однотемпературном приближении, в рамках которого температура капель считается равной температуре газовой фазы. Такой подход является оправданным в случае малой концентрации конденсирующегося компонента в смеси [7]. В настоящей работе количество пара в смеси не превышает 3% по объему. Процессы в пограничном слое, а также турбулентность не учитываются [8].

Математическое описание термогазодинамики включает в себя систему уравнений, состоящую из уравнений Навье – Стокса для сжимаемого газа, а также уравнения диффузии. В работе используется уравнение состояния для идеального газа. Ударные волны не моделируются, поэтому объемная вязкость не учитывается в уравнениях движения [10]. Используется си-

стема уравнений для сжимаемого газа, включающая в себя уравнения неразрывности, движения, и энергии:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \tau; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = \nabla [\vec{u} \cdot \tau + \vec{q}] + S_e; \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – плотность; $\vec{u}$ – скорость; p – давление, τ – тензор вязких напряжений, q – тепловой поток, E – полная энергия, H – полная энтальпия, T – температура, S_e – объемный источник энергии.

Дополнительное уравнение диффузии, представляющее собой закон сохранения массы для каждого q -го компонента смеси, выглядит следующим образом [11]:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (C_q \rho_q) + \nabla \cdot (C_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_m + \sum_{p=1}^n \left(\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp} \right), \quad (2)$$

где ρ_q – плотность q -того компонента смеси, C_q – его объемная доля, $\dot{m}_{pq}$ – поток массы между p -тым и q -тым компонентом смеси, $\dot{m}_{qp}$ – поток массы между q -тым и p -тым компонентом смеси; S_m – объемный источник массы.

Очевидно, что сумма объемных долей компонентов должна быть равна единице:

$$\sum_{q=1}^n C_q = 1, \quad (3)$$

Кинетическое уравнение для функции распределения капель по размерам в общем виде записывается следующим образом [1]:

$$\frac{\partial f_r}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla f_r + \frac{\partial}{\partial r} (\dot{r} f_r) = \frac{I}{\rho} \delta(r - r_{cr}), \quad (4)$$

где f_r – функция распределения капель по размерам, нормированная на количество капель в единице массы, δ – дельта-функция Дирака, I – скорость нуклеации, $\dot{r}$ – скорость роста капель, r_{cr} – критический радиус капель.

Для того чтобы определить интегральные характеристики конденсационного аэрозоля, например, числовую плотность капель в единице массы, средний размер капель, а также произвести расчет объемных источников массы и энергии, следует рассмотреть моменты функции распределения [12]:

$$\Omega_n = \int_{r_{cr}}^{\infty} r^n f_r dr, \quad (5)$$

Так, например, числовая плотность капель определяется через нулевой момент функции распределения $N_d = \rho \Omega_0$, а средний радиус капель численно равен отношению первого к нулевому моменту: $\bar{r} = \Omega_1 / \Omega_0$.

Иногда также используется функция распределения частиц по размерам, нормированная в единицу объема:

$$f = \rho f_r, \quad (6)$$

Для решения кинетического уравнения, по аналогии с кинетической теорией газов, может использоваться моментный метод, который позволяет получить эквивалентную систему уравнений для первых четырех моментов ($n=0..3$) функции распределения.

Для этого уравнение умножается на r^n и интегрируется по всем значениям радиуса капля, при этом, в случае, когда скорость роста не зависит от радиуса капли, система принимает вид:

$$\frac{d\Omega_n}{dt} = n \dot{r} \Omega_{n-1} + \frac{I}{\rho} r_{cr}^n - \vec{v} \nabla \Omega_n, \quad (7)$$

Капли жидкости могут образовываться из-за случайных флуктуаций в паре, находящемся близко к температуре насыщения. Если температура пара больше температуры насыщения или равна ей, то капли испаряются. В пересыщенном паре капля растет, если ее радиус больше критического:

$$r_{cr} = \frac{2\sigma(T)}{\rho_l(T)RT \ln s}, \quad (8)$$

где $s = p_v/p_s(T)$ – степень пересыщения, σ – коэффициент поверхностного натяжения, R – индивидуальная газовая постоянная, ρ_l – плотность конденсата.

В данной работе для расчета скорости нуклеации используется классическая формула Френкеля – Зельдовича [13]:

$$I = A_0 \exp \left[-\frac{A}{T^3 (\ln s)^2} \right], \quad (9)$$

где $A_0 = (\alpha/\rho_l(T))(p_v/RT)^2 \sqrt{2\mu_v \sigma(T)N_A^3/\pi}$, $A = 16\pi N_A (\sigma(T)/R)^3 (\mu_v/\rho_l(T))^2/3$, α – коэффициент конденсации.

Для определения скорости роста капля используется формула Герца – Кнудсена для однотемпературной постановки [14,15]:

$$r = \frac{\alpha p_s}{p_l(T)} \left(\frac{s-1}{\sqrt{2\pi R_v T}} \right) \quad (10)$$

Рождение новой фазы, т.е. капля конденсата, а также теплообмен, при выполнении необходимых условий, учитывается через объемные источники массы S_m и энергии S_e . При этом объемные источники в рассматриваемой задаче состоят из двух слагаемых, первое слагаемое отвечает за вклад за счет образования капель, а второе за счет их роста.

Объемный источник массы конденсата записывается следующим образом:

$$S_m = \frac{4}{3} \pi r_{cr}^3 \rho_l(T) I + 4\pi \rho_l(T) \rho(T) \dot{r} \Omega_2, \quad (11)$$

где Ω_2 – второй момент функции распределения капель по размерам. Очевидно, что сток массы для паровой фазы равен S_m по модулю и противоположен по знаку.

Объемный источник энергии имеет следующий вид:

$$S_e = S_m L(T), \quad (12)$$

где $L(T)$ – теплота парообразования.

Использование источниковых членов позволяет существенно упростить решение задачи, так, например, нет необходимости отдельно определять температуру смеси, или считать в явном виде межфазный тепловой поток, расчетный пакет уже имеет необходимые для этого инструменты. В работах других авторов похожей тематики [16, 17] рассматривается объемная конденсация только с учетом образования капель в потоке, однако известно, что последующий рост капель вносит существенный вклад в характеристики потока [18]. Такой подход объясняется тем, что при решении задачи об объемной конденсации только с учетом образования капель нет необходимости решать кинетическое уравнение (4), что сильно усложняет задачу, однако, определить полный спектр характеристик конденсационного аэрозоля при таком подходе не представляется возможным.

Еще одна проблема современных исследований – решение задач в одномерной постановке, ввиду сложности описания систем для задач более высокой размерности. В настоящей работе обе проблемы решены: с одной стороны решение включает в себя как образование капель, так и их рост, а с другой используется сторонний CFD-решатель, позволяющий исследовать объемную конденсацию в двумерных и трехмерных задачах.

Описание модуля решения кинетического уравнения. Интегрируемый в CFD-пакет модуль, позволяющий решать кинетическое уравнение для функции распределения капель по размерам, представляет собой алгоритм, реализуемый посредством пользовательских функций UDF (User Defined Functions), базирующийся на использовании UDM (user-defined memory) – дополнительных ячеек пользовательской памяти, в которые загружаются результаты работы, пригодные для последующей постобработки.

В качестве исходных данных в решатель CFD-пакета загружается расчетная сетка, затем определяется тип граничных условий и задаются начальные условия. Для рассматриваемой в настоящей работе задачи в качестве граничных условий выбирается *Pressure inlet* на входе и *Pressure outlet* на выходе, задаются: полное давление смеси, объемная доля компонентов на входе, а также начальная температура.

Также выбирается тип решателя. Предложенный модуль не имеет ограничений на тип решателя, поэтому может использоваться как для стационарных, так и для нестационарных расчетов. Затем происходит интеграция модуля в решатель CFD-пакета, с последующей инициализацией решения (т.е. присвоением начальных значений параметров в каждой ячейке сетки).

Следом запускается решатель, который останавливается после достижения определенного, заранее заданного уровня невязок для стационарного расчета, либо по окончании так же заранее заданного количества шагов по времени для нестационарного расчета. По окончании расчета производится постобработка полученных результатов – строятся распределения величин в сечениях, на стенках, векторные поля скоростей, а также распределения величин вдоль заранее выбранной траектории при необходимости.

Сам же алгоритм (рис. 1) работает следующим образом: после подгрузки модуля в решатель в каждой расчетной ячейке на каждом шаге по времени (для нестационарного решателя) или на каждой итерации (для стационарного решателя) производится расчет числа Маха M .

Если полученное значение превышает единицу, т.е. течение сверхзвуковое, проверяется условие наличия в данной ячейке паровой фазы (объемная доля пара $C(\text{var})$ должна быть больше нуля). Если паровая фаза присутствует, то определяется степень пересыщения S , а если при этом степень пересыщения выше 1, то производится расчет скорости нуклеации капель I , критического радиуса r_{cr} и скорости роста капель $\dot{r}$, на основании чего производится решение системы моментных уравнений.

По результатам решения моментов уравнений производится расчет источниковых членов S_e и S_m , величины которых, в свою очередь, передаются в решатель. Алгоритм повторяется до тех пор, пока не будет либо прекращен пользователем, либо по достижении заданной точности.

В настоящий момент, конденсация в дозвуковой части сопла не учитывается, т.к. экспериментальные данные не содержат такой информации для сравнения.

Рис. 1. Блок-схема алгоритма работы модуля решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам

Fig. 1. Block diagram of the operation algorithm of the module for solving the kinetic equation for the droplet size distribution function

В работе рассматривается плоское щелевое сопло в двумерном виде, представленное на рис. 2.

Рис. 2. Общий вид расчетного сопла

Fig. 2. General view of the design nozzle

Размеры расчетного сопла приведены в табл. 1.

Таблица 1. Размеры расчетного сопла

Table 1. Dimensions of the design nozzle

Позиция Position	Размерность Dimension	Обозначение Designation	Значение Meaning
Общая длина Total length	м	L	0.1590
Длина до критического сечения Length to throat		L1	0.0640
Длина сужающейся части Tapered length		L2	0.0430
Высота критического сечения Cut-off height		h0	0.0050
Высота входного сечения Inlet section height		h1	0.0075
Высота выходного сечения Outlet height		h2	0.0106
Угол раскрытия Opening angle	град	β	1.7700

Фактически, рассматриваемая область является продольным центральным сечением трехмерного сопла. Расчетная сетка представляет собой разбиение области на элементы конечных размеров.

В настоящей работе пограничный слой расчетной сеткой не моделируется, ввиду чего призматические элементы вблизи границ отсутствуют. Расчеты проводились на сетке с гексаэлементами, средний размер которых не превышал 0.1 мм, общее количество элементов ~170000. Фрагмент расчетной сетки представлен на рис. 3.

Рис 3. Фрагмент расчетной сетки
 Fig 3. Fragment of the computational grid

Обсуждение результатов. В ходе настоящего исследования были получены распределения относительного давления p/p_0 , температуры смеси T , степени пересыщения s , а также объемной доли образовавшегося конденсата как вдоль центральной оси x (представлена на рис. 2), так и на плоскости, ограниченной контуром расчетной области.

Рабочий режим, на котором производилось сравнение с экспериментальными данными: начальное давление смеси $p_0 = 60400$ Па, начальная температура смеси $T_0 = 298.15$ К, паросодержание ~ 2% по объему от неконденсирующегося компонента.

В работах [3, 19, 20] приведены распределения относительного давления p/p_0 и температуры смеси T , по которым проводится сравнение с расчетными величинами. Сравнение полученных в данной работе результатов расчетов с экспериментальными данными [3, 19, 20] представлено на рис.4.

Используются следующие обозначения кривых: 1 и 3 – экспериментальные и расчетные данные для течения газа без конденсации, 2 и 4 – экспериментальные и расчетные данные при истечении парогазовой смеси с учетом конденсации.

Рис. 4. А – распределение относительного давления p/p_0 вдоль центральной линии, Б – распределение температуры вдоль центральной линии

Fig. 4. A - distribution of relative pressure p / p_0 along the central line, B - temperature distribution along the central line

На рис. 5–8 представлены распределения величин на плоскости, ограниченной контуром расчетной области: давление смеси, температура смеси, степень пересыщения, а также распределение объемной доли жидкости.

Рис. 5. Распределение давления
Fig. 5. Pressure distribution

Рис. 6. Распределение температуры
Fig. 6. Temperature distribution

Рис. 7. Распределение степени пересыщения
Fig. 7. Distribution of the degree of supersaturation

На рис. 8 представлено распределение объемной доли жидкости, получившейся в результате конденсации

Рис. 8. Распределение объемной доли конденсата
Fig. 8. Distribution of the volume fraction of condensate

На рис. 9 представлены распределения степени пересыщения вдоль центральной линии, полученные для двух типов решателей: 1 – для стационарного (Steady), 2 – нестационарного (Transient) с шагом по времени 10^{-5} с. Для нестационарного решателя показана зависимость после установления стационарного состояния.

Видно, что отличий нет. Таким образом, можно считать, что используемый модуль не имеет ограничений на тип решателя, так как его применение для разных решателей приводит к одинаковым результатам для стационарного процесса.

Рис. 9. Распределения степеней пересыщения для двух типов решателей:

1 – стационарный решатель, 2 – нестационарный

Fig. 9. Distributions of degrees of supersaturation for two types of solvers: 1 - stationary solver, 2 - non-stationary

Вывод. Модуль для решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам успешно интегрирован в среду CFD-пакета. Получены результаты, близкие к экспериментальным, достигнуто качественное во всех областях и количественное согласование в области интенсивной конденсации с экспериментальными данными.

Для достижения количественного согласования результатов планируется следующее: во-первых, необходимо провести исследование сеточной сходимости, т.е. исключить влияние разбиения расчетной области на результат, а во-вторых, необходимо использование более точных зависимостей теплофизических свойств от температуры для компонентов смеси.

Выявлено, что полученный модуль может применяться для решения с использованием любого типа решателя – стационарного или нестационарного. Планируется продолжить работу и использовать модуль для решения задач в трехмерной постановке, в том числе и для задач объемной конденсации в лопастных машинах и аппаратах криогенной техники.

Библиографический список:

1. Стернин Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974.
2. Сидоров А.А., Ястребов А.К. Влияние геометрических характеристик канала и свойств парогазовой смеси на объемную конденсацию при течении в сопле // Теплоэнергетика. 2018. № 1. С. 68-76.
3. H. Pathak, K. Mullick, S. Tanimura, B. E. Wyslouzil. Nonisothermal Droplet Growth in the Free Molecular Regime. //Aerosol Science and Technology, 47:1310–1324, 2013.
4. Crabtree A. Thermophysical Properties of Saturated Light and Heavy Water for Advanced Neutron Source Applications. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM- 12322, 1993.
5. Herrig S., Thol M. A Reference Equation of State for Heavy Water //J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 47, No. 4, 2018.
6. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., 1972 г., 720 стр.
7. N.M. Kortsenshteyn, A.K. Yastrebov. Interphase heat transfer during bulk condensation in the flow of vapor – gas mixture // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 55. pp 1133 – 1140.
8. Pope S. B. Turbulent Flows. Cambridge University Press, 2000, 771 с.

9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. Издание 6-е. М.: Физматлит, 2015. 728 с. (Теоретическая физика, т. VI).
10. Fluent Theory guide 14, <https://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>.
11. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем: Учебное пособие для вузов – М.: Издательство МЭИ, 2000, 374 стр.
12. Корценштейн Н.М., Самуйлов Е.В., Ястребов А.К. Новый метод моделирования объемной конденсации пересыщенного пара // Теплофизика высоких температур, 2009, том 47, №1, с. 1-12.
13. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. С. 271-294.
14. И.Н. Шишкова, А.К. Ястребов. Расчет потока массы пара при изотермической конденсации на сферических каплях в широком диапазоне чисел Кнудсена на основе решения кинетического уравнения Больцмана // Коллоидный журнал, 2016. Т. 78, № 5. С. 660 – 667.
15. И.Н. Шишкова, А.К. Ястребов. Исследование испарения и конденсации в присутствии наночастиц // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77. № 5. С. 669 – 675.
16. Xuewen C., Yang L., Xuerui Z., Dan G. Jiang B. Supersonic refrigeration performances of nozzles and phase transition characteristics of wet natural gas considering shock wave effects // Case Studies in Thermal Engineering Volume 24, 100833.
17. A. Giesen, A. Kowalik & P. Roth (2004) Iron-atom condensation interpreted by a kinetic model and a nucleation model approach, Phase Transitions: A Multinational Journal, 77:1-2, 15-129.
18. Shishkova I.N., Kryukov A.P., Levashov V.Y. Vapour–liquid jointed solution for the evaporation–condensation problem // International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 141, October 2019, Pages 9-19.
19. Pathak, K. Mullick, S. Tanimura, B. E. Wyslouzil. The structure of D2O-nonane nanodroplets // The Journal of Chemical Physics 140, 224318 (2014);
20. H. Pathak, S. Tanimura, B. E. Wyslouzil. Binary nucleation rates for ethanol/water mixtures in supersonic Laval nozzles: Analyses by the first and second nucleation theorems// The Journal of Chemical Physics 139, 174311 (2013).

References:

1. Sternin L.Ye. Osnovy gazodinamiki dvukhfaznykh techeniy v soplakh. M.: Mashinostroyeniye, 1974. [Sternin L.Ye. Fundamentals of gas dynamics of two-phase flows in nozzles. Moscow: Mechanical Engineering, 1974. (In Russ)]
2. Sidorov A.A., Yastrebov A.K. Vliyaniye geometricheskikh kharakteristik kanala i svoystv parogazovoy smesi na ob'yemnyuyu kondensatsiyu pri techenii v sople // Teploenergetika. 2018. № 1. S. 68-76. [Sidorov A.A., Yastrebov A.K. Influence of the geometric characteristics of the channel and the properties of the vapor-gas mixture on the volumetric condensation during the flow in the nozzle // Teploenergetika. 2018.No. 1.pp. 68-76. (In Russ)]
3. H. Pathak, K. Mullick, S. Tanimura, B. E. Wyslouzil. Nonisothermal Droplet Growth in the Free Molecular Regime. //Aerosol Science and Technology, 47:1310–1324, 2013. [H. Pathak, K. Mullick, S. Tanimura, B. E. Wyslouzil. Nonisothermal Droplet Growth in the Free Molecular Regime. // Aerosol Science and Technology, 47: 1310–1324, 2013. (In Russ)]
4. Crabtree A. Thermophysical Properties of Saturated Light and Heavy Water for Advanced Neutron Source Applications. Oak Ridge National Laboratory, ORNL / TM-12322, 1993.
5. Herrig S., Thol M. A Reference Equation of State for Heavy Water // J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 47, No. 4, 2018.
6. Vargaftik N.B. Handbook on the thermophysical properties of gases and liquids. M., 1972, 720 pages.
7. N.M. Kortsenshteyn, A.K. Yastrebov. Interphase heat transfer during bulk condensation in the flow of vapor - gas mixture // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 55. P. 1133 - 1140.
8. Pope S. B. Turbulent Flows. Cambridge University Press, 2000, 771 pp.
9. Landau L. D., Lifshits Ye. M. Gidrodinamika. Izdaniye 6-ye. M.: Fizmatlit, 2015. 728 s. (Teoreticheskaya fizika, t. VI). [Landau L.D., Lifshits E.M. Hydrodynamics. Edition 6. Moscow: Fizmatlit, 2015.728 p. (Theoretical physics, vol. VI). (In Russ)]
10. Fluent Theory guide 14, <https://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>. Labuntsov D.A., Yagov V.V. Mechanics of two-phase systems: Textbook for universities - Moscow: MPEI Publishing House, 2000, 374 pp.
11. Labuntsov D.A., Yagov V.V. Mekhanika dvukhfaznykh sistem: Uchebnoye posobiye dlya vuzov – M.: Izdatel'stvo MEI, 2000, 374 str. [Labuntsov D.A., Yagov V.V. Mechanics of two-phase systems: Textbook for universities - Moscow: MPEI Publishing House, 2000, 374 pp. (In Russ)]
12. Kortsenshteyn N.M., Samuylov Ye.V., Yastrebov A.K. Novyy metod modelirovaniya ob'yemnoy kondensatsii peresyshchennogo para // Teplofizika vysokikh temperatur, 2009, tom 47, №1, s. 1-12. [Kortsenshteyn N.M., Samuylov Ye.V., Yastrebov A.K. A new method for modeling the volumetric condensation of supersaturated steam // Thermophysics of high temperatures, 2009, Vol 47, no. 1-12. (In Russ)]
13. Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheyndlin A.Ye. Tekhnicheskaya termodinamika. M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2008. S. 271-294. [Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheindlin A.E. Technical thermodynamics. M.: Publishing house MEI, 2008.S. 271-294. (In Russ)]

14. I.N. Shishkova, A.K. Yastrebov. Raschet potoka massy para pri izotermicheskoy kondensatsii na sfericheskikh kaplyakh v shirokom diapazone chisel Knudsen na osnove resheniya kineticheskogo uravneniya Bol'tsmana // Kolloidnyy zhurnal, 2016. T. 78, № 5. S. 660 – 667. [I. N. Shishkova, A.K. Yastrebov. Calculation of the vapor mass flow during isothermal condensation on spherical drops in a wide range of Knudsen numbers based on the solution of the Boltzmann kinetic equation // Colloid Journal, 2016. V. 78, No. 5. pp. 660 - 667. (In Russ)]
15. I.N. Shishkova, A.K. Yastrebov. Issledovaniye ispareniya i kondensatsii v prisutstvii nanochastits // Kolloidnyy zhurnal. 2015. T. 77. № 5. S. 669 – 675. [I.N. Shishkova, A.K. Yastrebov. Investigation of evaporation and condensation in the presence of nanoparticles // Colloid journal. 2015. Vol. 77. No. 5. pp. 669 - 675 (In Russ)]
16. Xuewen C., Yang L., Xuerui Z., Dan G. Jiang B. Supersonic refrigeration performances of nozzles and phase transition characteristics of wet natural gas considering shock wave effects // Case Studies in Thermal Engineering Vol.24, 100833.
17. Giesen, A. Kowalik & P. Roth (2004) Iron-atom condensation interpreted by a kinetic model and a nucleation model approach, Phase Transitions: A Multinational Journal, 77:1-2, 15-129.
18. Shishkova I.N., Kryukov A.P., Levashov V.Y. Vapour–liquid jointed solution for the evaporation–condensation problem // International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 141, October 2019, pp.9-19.
19. Pathak, K. Mullick, S. Tanimura, B. E. Wyslouzil. The structure of D2O-nonane nanodroplets // The Journal of Chemical Physics 140, 224318 (2014);
20. H. Pathak, S. Tanimura, B. E. Wyslouzil. Binary nucleation rates for ethanol/water mixtures in supersonic Laval nozzles: Analyses by the first and second nucleation theorems// The Journal of Chemical Physics 139, 174311 (2013).

Сведения об авторах:

Сидоров Александр Андреевич, аспирант, e-mail: SidorovAAn@mpei.ru

Ястребов Арсений Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры низких температур, e-mail: YastrebovAK@mpei.ru

Information about the authors:

Alexander A. Sidorov, Graduate Student, e-mail: SidorovAAn@mpei.ru

Arseniy K. Yastrebov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Low temperatures, e-mail: YastrebovAK@mpei.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 25.01.2021.

Принята в печать 22.02.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 25.01.2021.

Accepted for publication 22.02.2021.