

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОМОГЕННОЙ КОНДЕНСАЦИИ АРГОНА В СВЕРХЗВУКОВОМ СОПЛЕ

¹КОРЕПАНОВ М. А., ¹АЛЬЕС М. Ю., ²МИТРЮКОВА Е. А.

¹ Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, 426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

² Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7

АННОТАЦИЯ. Проведено численное моделирование течения инертного газа (аргона) в коническом микросопле с диаметром критического сечения 340 мкм. Проведены параметрические исследования по влиянию параметров торможения (начального давления) на характеристики потока и точку начала конденсации. Показано, что процесс гомогенной конденсации в рассматриваемых условиях идет, и начальное давление оказывает влияние на точку начала конденсации (точку Вильсона) и конечные размеры получаемых в сопле частиц конденсата. С ростом начального давления температура точки Вильсона растет так же как и размер частиц конденсата, что соответствует рассмотренной в работе математической модели процесса. Также отмечено отсутствие точек перегиба на кривой температуры, что может быть объяснено очень малыми размерами рассматриваемого сопла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гомогенная конденсация, коническое сопло, точка Вильсона, аргон.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие техники, выражающееся в постоянном уменьшении массогабаритных параметров и пониженное энергопотребление привели к появлению широкого спектра устройств, в которых реализуются микро- и нанотечения. В качестве примера таких устройств можно привести сверхзвуковые микросопла с диаметром критического сечения меньше 1 мм, которые могут быть использованы в микродвигателях для наноспутников [1], "аэрозольную пушку" для нанесения твердых материалов на подложку при производстве солнечных батарей и электронных микросхем по технологии Collimated Aerosol Beam Direct-Write (CAB-DW) [2], газоструйную мишень в лазерно-плазменном источнике коротковолнового излучения [3] или микросопла в экспериментальных исследованиях гомогенной конденсации различных газов и их смесей [4].

В качестве примера параметрических численных исследований свойств течения в микросоплах и за ним в зависимости от начальных свойств газа (параметров торможения) и геометрии сопла можно привести работу [3]. В ней рассматривается формирование газоструйной мишени в газоплазменном источнике ЭУФ излучения. Основными особенностями течения газа в данной установке является высокая степень расширения сопла, истечение в глубокий вакуум и, как следствие, очень низкие температуры на выходе из сопла в ядре потока (значительно ниже 100 К). При таких температурах в потоке должна иметь место гомогенная конденсация, т. к. температуры фазового перехода (конденсации) в нормальных условиях для Хе – 166.1 К, для Кг – 119.78 К, а для Аг – 87.3 К [5]. Однако, в [3] конденсация газа в ядре потока не учитывается, и отмечается, "что в конденсированном состоянии может находиться только доля вещества струи $\sim 10^{-4}$, поэтому роль конденсации здесь пренебрежимо мала". С другой стороны, например в [4, 6], отмечается, что в потоках инертных газов Аг, Кг, Хе на выходе из сопел наблюдаются кластеры до $8.5 \cdot 10^3$ атомов ксенона [6] и до 100 Å для аргона, ксенона и криптона [4] в зависимости от начальных условий, в первую очередь давления торможения.

Необходимо отметить, что для начала процесса гомогенной конденсации недостаточно достижения точки фазового перехода и необходимо некоторое переохлаждение газа [7], и точка начала конденсации носит название точки Вильсона [8], параметры в которой зависят от начальных параметров газа и геометрических размеров сопла. Так в экспериментальных исследованиях гомогенной конденсации паров воды, например [9, 10], точка Вильсона определяется по отклонению кривой давления вдоль сопла от кривой адиабатного расширения, что вызвано выделением тепла в потоке газа при конденсации. Однако, в литературе по исследованию конденсации инертных газов, в частности [4, 6], данные по точке Вильсона отсутствуют, что связано, очевидно, с очень малыми размерами сопел (диаметр критического сечения несколько сот микрометров) и техникой измерений, а размеры кластеров измеряются уже на выходе из сопла.

В связи с этим представляется интересным провести математическое моделирование процесса расширения инертного газа (аргона) в сверхзвуковом коническом микросопле с целью определения параметров процесса конденсации. Ограничениями при описании процесса могут быть чрезвычайно низкие температуры при расширении в вакуум, а также очень малое время пребывания газа при термодинамических условиях необходимых для гомогенной конденсации из-за очень малых размеров сопел, использованных при экспериментальных исследованиях [4, 6].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для моделирования процесса конденсации необходимо было получить данные по термодинамическим свойствам аргона Ag в газообразном и конденсированном состоянии. Кроме того, в связи с узким диапазоном существования Ag в жидком состоянии (83.8 ÷ 87.3 К) и малой вероятностью конденсации в этом диапазоне температур, для рассмотрения процесса конденсации был принят Ag в твердом состоянии. Проведен поиск и анализ литературы по термодинамическим свойствам Ag в газообразном и конденсированном состоянии [11–16]. В результате были построены функции для термодинамических свойств (энтальпия, энтропия, теплоемкость) Ag в диапазоне температур ниже 298 К. Для газовой фазы была использована база данных по термодинамическим свойствам веществ ИВТАН ТЕРМО [12], что оказалось возможно из-за свойств Ag как инертного газа, в работе [14] показано постоянство теплоемкости инертных газов при температурах выше 24 К. Для определения свойств конденсированной (твердой) фазы были использованы данные [13], а также данные по теплоте сублимации Ag [15]. В результате были построены зависимости термодинамических свойств Ag и получена расчетная зависимость давления насыщенных паров от температуры:

$$\ln p_1 = \frac{S^0 - S_z^0}{R_0} - \frac{I^0 - I_z^0}{R_0 T} = \frac{S^0 - S_z^0}{R_0} - \frac{\Delta H_{cond}}{R_0 T}, \quad (1)$$

где S^0 – энтропия газовой фазы [12], S_z^0 – энтропия твердой фазы [13], ΔH_{cond} – теплота сублимации [15].

В таблице приведено сравнение экспериментальных данных по давлению насыщенного пара Ag [13, 16] в сравнении с результатами расчетов по формуле (1).

Из таблицы видно, что погрешность расчетных данных по сравнению с экспериментом во всей области температур составляет не более 3%. Однако, следует отметить, что в математической модели процесса конденсации значение имеет разница между давлением газа в потоке и давлением насыщения, поэтому полученные значения можно считать удовлетворительным приближением.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных

T, К	P_s экс, бар	p_1 формула (1), бар
87.29	1.01300	1.01301
83.78	0.68750	0.68780
81.78	0.52396	0.52496
77.49	0.27838	0.27938
73.12	0.11274	0.11374
69.43	0.06395	0.06495
65.49	0.02929	0.02931
60	0.00836	0.00846
55	0.00204	0.00207
50	0.00037	0.00038
45	$4.7 \cdot 10^{-5}$	$4.8 \cdot 10^{-5}$
40	$3.5 \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{-6}$
35	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$1.3 \cdot 10^{-7}$
30	0.0	0.0

Моделирование течения аргона по сверхзвуковому соплу проводилось в одномерной постановке в переменных плотность-энергия (температура) [17]. Система уравнений рассматривается со следующими общепринятыми допущениями [8]:

– до появления необходимого числа сверхкритических кластеров ($N = 10^{15} \text{ м}^{-3}$) [17] их ростом пренебрегается, а после их образования процесс нуклеации считается прекратившимся и рассматривается только рост сверхкритических зародышей;

– в связи с малым размером зарождающейся фазы (число Стокса $Stk \ll 1$) используется модель односкоростного и однотемпературного потока, теплота конденсации отнесена к плотности всего потока, и теплоемкость среды принята постоянной.

Система уравнений [17] для определения параметров потока до начала роста частиц (до появления необходимого количества сверхкритических кластеров) содержит уравнения для числа (концентрации) сверхкритических кластеров (2), массы сверхкритических кластеров (3), плотности газовой фазы (4), температуры потока (5), скорости потока (6), текущей координаты сопла (7):

$$\frac{dN}{dt} = I_g, \quad (2)$$

$$\frac{dm}{dt} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{M^2}{M^2 - 1} \cdot \frac{\rho}{F(x)} \cdot \frac{dF}{dx} \cdot V - I_g \cdot g_{cr} \cdot m_1, \quad (4)$$

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{(k-1)M^2}{M^2 - 1} \cdot \frac{T}{F(x)} \cdot \frac{dF}{dx} \cdot V + I_g \cdot g_{cr} \cdot m_1 \cdot \frac{\Delta H_{cond}}{\rho_0 C_V} \cdot \frac{k_{sv}}{z}, \quad (5)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{M^2 - 1} \cdot \frac{V}{F(x)} \cdot \frac{dF}{dx} \cdot V, \quad (6)$$

$$\frac{dx}{dt} = V, \quad (7)$$

где $I_g = K_k n_{g-1} n_{g-2}$ – скорость образования сверхкритических кластеров [17], n_{g-1} , n_{g-2} – концентрации докритических кластеров, при слиянии которых образуется сверхкритический кластер, K_k – постоянная скорости коагуляции, g_{cr} – число частиц в сверхкритическом кластере, m – масса кластера, которая при начале роста кластеров может быть принята равной массе сверхкритического кластера $m_0 = m_1 \cdot g_{cr}$, или при постепенном накоплении сверхкритических кластеров разных размеров, например, при быстром

охлаждении (течения в сверхзвуковых соплах) – $m_0 = (\rho_0 - \rho)/N$, $m_1 = \frac{\mu_1}{1000 \cdot N_A}$ – масса

моночастицы газа, кг, μ_1 – мольная масса газа, г/моль. Как показывают расчеты, при течениях в соплах скорость конденсации увеличивается очень быстро [8, 17, 18], так что большую часть начальных зародышей новой фазы составляют критические кластеры, соответствующие термодинамическим условиям в момент перехода расчета к их росту.

В уравнении для плотности (4) второе слагаемое учитывает отвод массы при образовании сверхкритических кластеров, который очень мал практически до самого начала конденсации из-за очень низких значений скорости конденсации I_g . В уравнении температуры (5) второе слагаемое учитывает выделение тепла при образовании сверхкритических кластеров, при этом в связи с тем, что в малых кластерах ($g < 300$) число связей между частицами намного меньше их числа в жидкости, в выражении учитывается множитель k_{sv}/z [17].

На втором этапе производится расчет роста частиц новой фазы, а образование новых сверхкритических кластеров прекращается из-за снижения пересыщения в связи с переходом вещества из газовой фазы в конденсированную. В этом случае система уравнений будет содержать уравнения концентрации сверхкритических кластеров (8), изменения массы сверхкритических кластеров для условий свободномолекулярного режима (9), плотности газовой фазы (10), температуры потока (11):

$$\frac{dN}{dt} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{dm}{dt} = \alpha_{ак} \cdot 4\pi \cdot r_{cr}^2 \cdot \frac{p_1 - p_s}{\sqrt{2\pi \frac{R_0}{\mu_1} T}}, \quad r_{cr} = r_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \cdot \frac{m}{m_1}}, \quad (9)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{M^2}{M^2 - 1} \cdot \frac{\rho}{F(x)} \cdot \frac{dF}{dx} \cdot V - N \cdot \frac{dm}{dt}, \quad (10)$$

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{(k-1)M^2}{M^2 - 1} \cdot \frac{T}{F(x)} \cdot \frac{dF}{dx} \cdot V + N \frac{dm}{dt} \cdot \frac{\Delta H_{cond}}{\rho_0 C_V}. \quad (11)$$

Уравнения для скорости (6) и текущей координаты сопла (7) остаются неизменными, а $\alpha_{ак} = 0.6$ – коэффициент аккомодации, r_1 – радиус единичной частицы (молекулы).

Во всех уравнениях $F(x)$ – площадь поперечного сечения сверхкритической части сопла, $\frac{dF}{dx}$ – производная, которую для простоты расчетов можно задать аналитически.

На каждом шаге интегрирования по времени по известным параметрам состояния ρ , T производится расчет состава смеси с учетом докритических кластеров (сверхкритические при этом из расчета исключаются) [19].

Моделирование микротечения аргона проводится для конического микросопла Лавалья с радиусом критического сечения 170 мкм, углом раствора конуса 8.6° и степенью расширения 36.6. Давление торможения варьируется в диапазоне от 2 до 6 бар, температура торможения составляет 200 К, размеры сопла и параметры потока взяты в соответствии с [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 – 3 приведены результаты расчета (температура потока и радиус частиц конденсированной фазы от точки Вильсона) для течения аргона в указанном сопле. В качестве изменяемого параметра использовано давление торможения со значениями 2, 4 и 6 бар. Из сравнения результатов, представленных на рис. 1 – 3 видно, что с понижением давления торможения снижается температура точки Вильсона, а также уменьшается размер частиц конденсата, сформировавшихся в сопле. Оба этих факта соответствуют

рассматриваемой математической модели. Во-первых, в соответствии с общепринятым допущением сначала рассматривается процесс накопления сверхкритических кластеров (до $N = 10^{15} \text{ м}^{-3}$) в соответствии с уравнением (2), в котором скорость образования сверхкритических кластеров пропорциональна произведению концентраций докритических кластеров, значения которых увеличиваются с ростом давления в потоке, т. е. чем выше давление в потоке, тем быстрее идет накопление сверхкритических кластеров, а точка Вильсона сдвигается вверх по потоку в область более высоких температур. Во-вторых, рост кластеров описывается выражением (9), где массовый поток конденсирующегося вещества пропорционален разности давления в потоке (давления моногаза) и давления насыщенного пара при температуре потока, т. е. чем выше давление в потоке, тем больше поток конденсирующейся массы и тем быстрее растут частицы (наклон кривой радиуса частиц для $p_0 = 2$ бар ниже, чем для 4 и 6 бар).

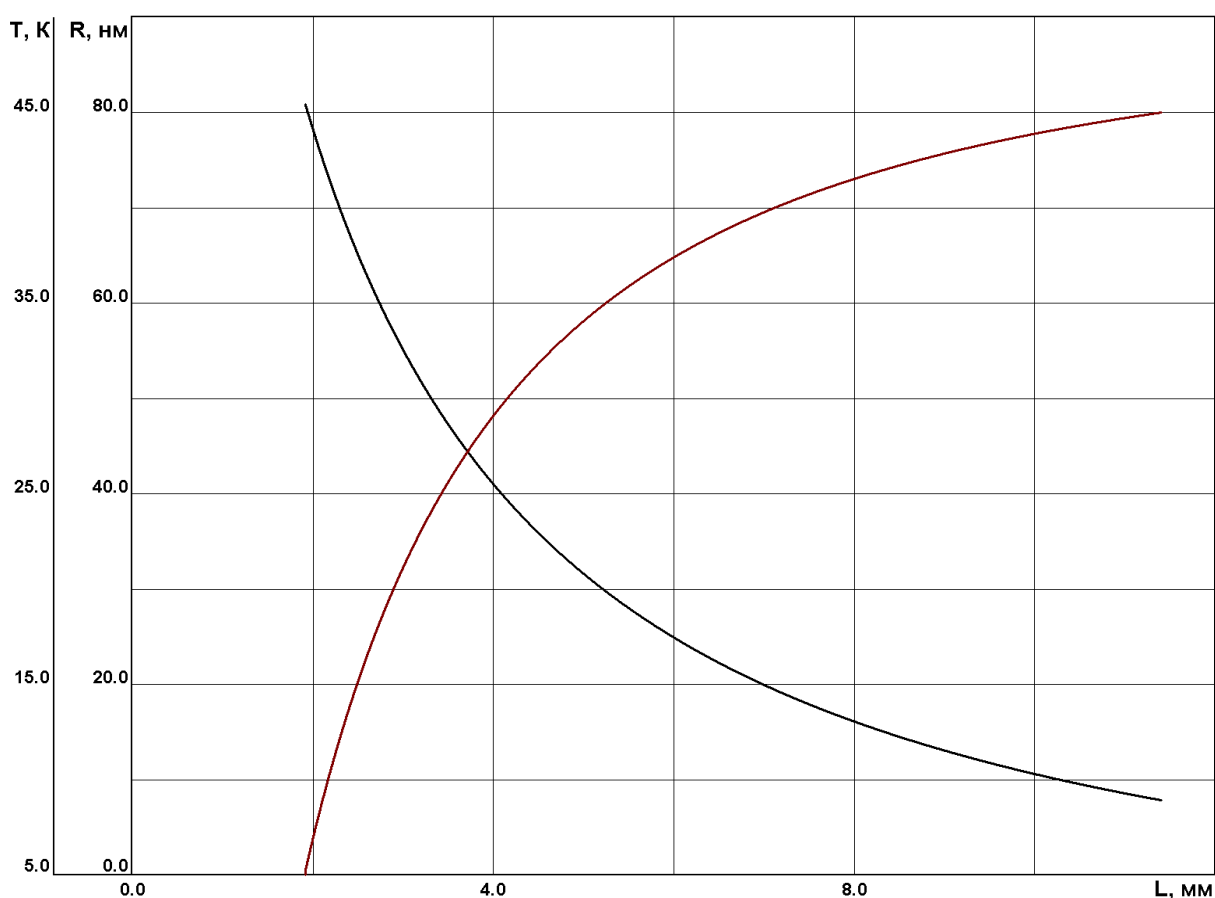


Рис. 1. Параметры потока после точки Вильсона для $p_0 = 6$ бар

Расчетный размер конденсированных частиц на выходе из сопла составляет около 35 нм для $p_0 = 2$ бар и 160 нм для $p_0 = 6$ бар, а согласно экспериментальным данным [4] размер частиц аргона на выходе из сопла составил чуть более 100 \AA (10 нм). Такое существенное различие расчетных и экспериментальных данных можно объяснить тем, что при моделировании в данной работе рассматривалось течение идеального газа, т. е. не учитывается вязкое трение, которое для микросопел будет оказывать существенное влияние на параметры потока и приводить в первую очередь к повышению температуры потока. Этот эффект может привести к более медленному расширению потока в сопле [20] и, соответственно, к замедлению снижения температуры в потоке, а, как следствие, к смещению точки Вильсона вниз по потоку и замедлению роста конденсированной фазы. Но для уточнения этого эффекта необходимо проведение численных исследований в двумерной осесимметричной постановке для течения вязкого теплопроводного сжимаемого газа, что не являлось задачей данного исследования.

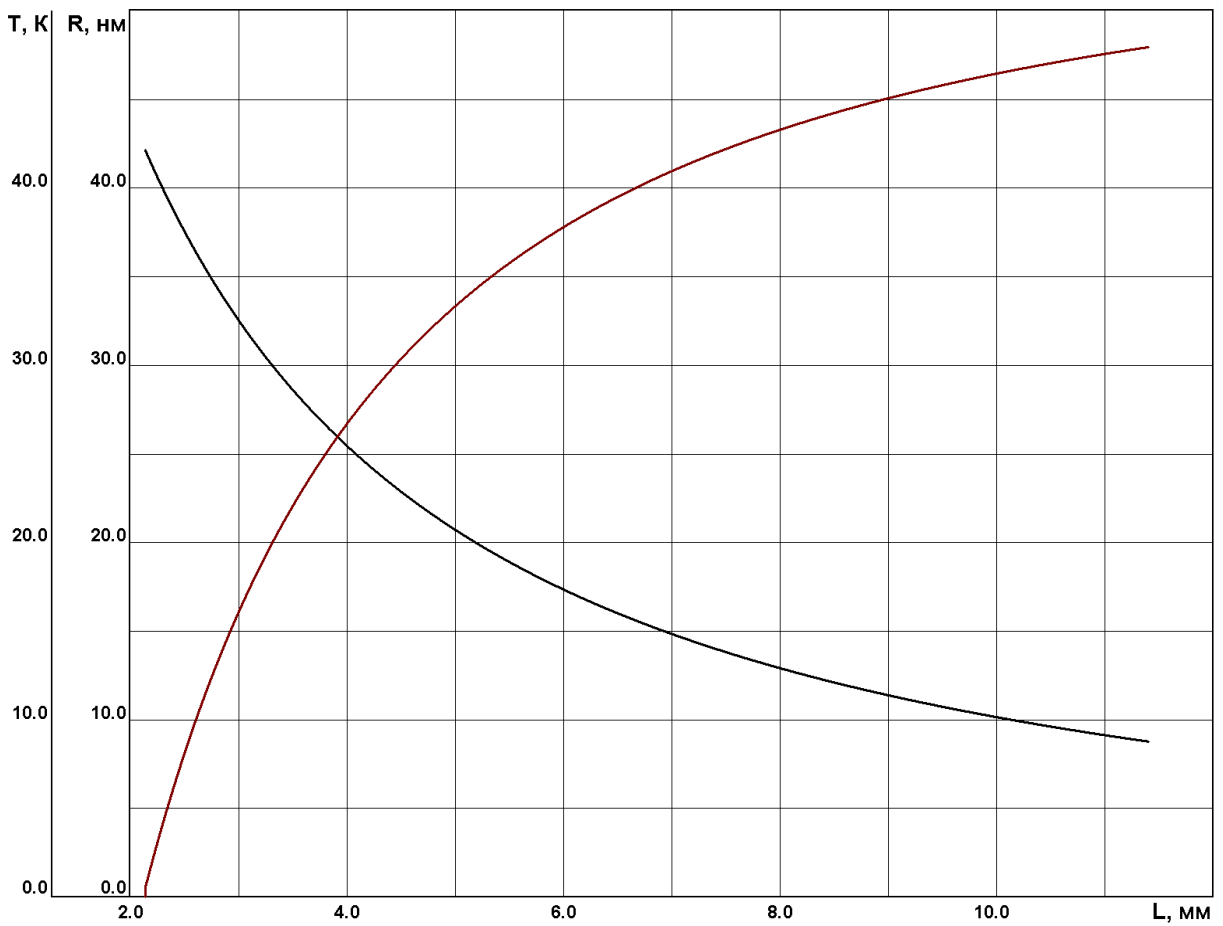


Рис. 2. Параметры потока после точки Вильсона для $p_0 = 4$ бар

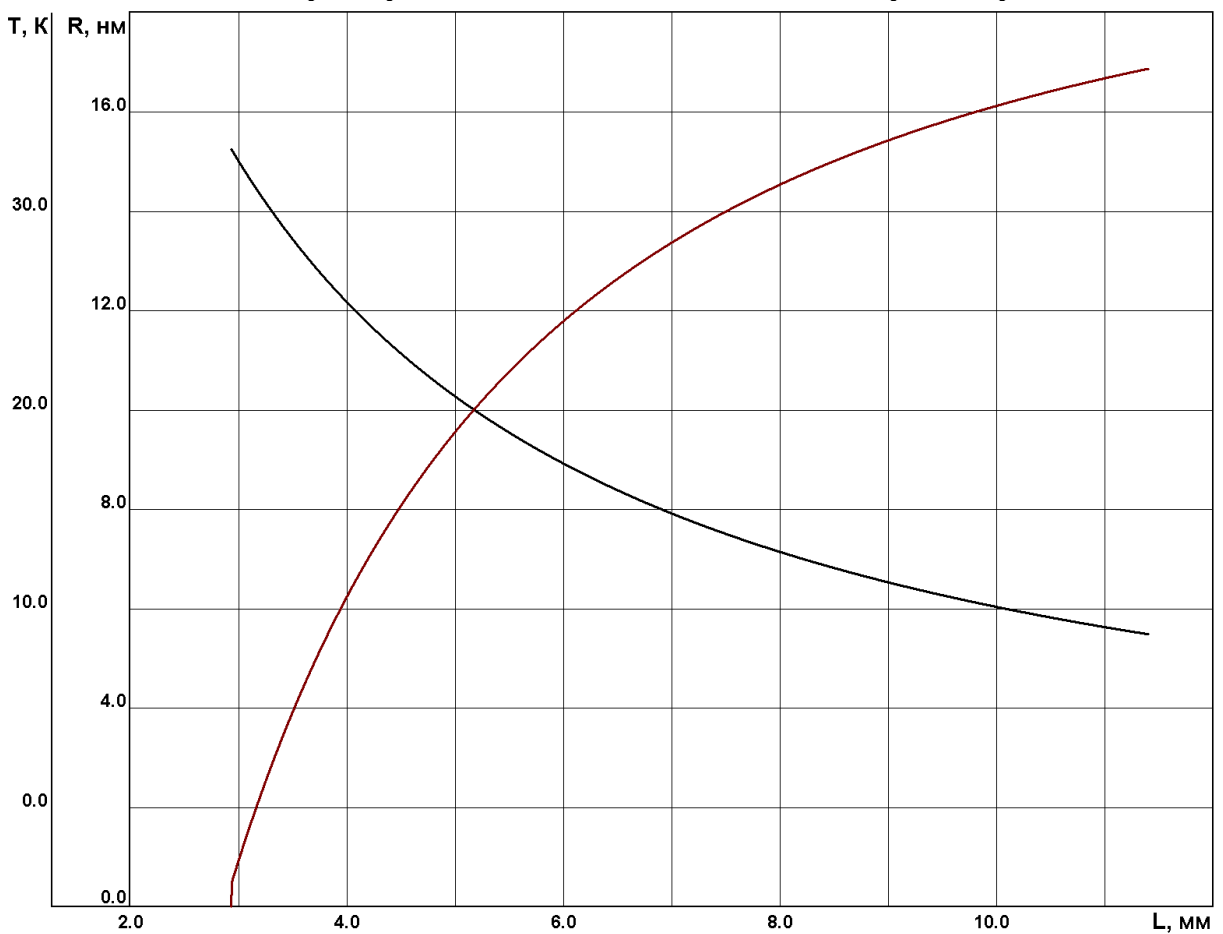


Рис. 3. Параметры потока после точки Вильсона для $p_0 = 2$ бар

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате моделирования конденсации аргона в сверхзвуковом сопле при допущении невязкого течения, были получены параметры, характеризующие поток в зависимости от давления торможения. Показано, что с ростом давления увеличивается температура в точке начала конденсации (точке Вильсона), она смещается вверх по соплу, а размер частиц конденсата растет. Отличие полученных результатов по размерам конденсированной фазы от экспериментальных данных [4, 6] можно объяснить малым размером сопла и необходимостью учета вязких эффектов, что является темой для дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якутин А. В. Исследование рабочих процессов в микродвигательных установках // Электронный журнал "Труды МАИ". 2011. № 45. С. 33.
2. Кудрявцев А. Н., Шершнев А. А. Течение запыленного газа в сверхзвуковом микросопле: эффект аэродинамической фокусировки // Динамика многофазных сред: сборник трудов XIV Всероссийского семинара. Новосибирск: Изд-во ИТПМ СО РАН, 2015. С. 49-53.
3. Гарбарук А. В., Демидов Д. А., Калмыков С. Г., Сасин М. Э. Расчетное оптимизационное исследование газоструйной мишени в лазерно-плазменном источнике коротковолнового излучения // Журнал технической физики. 2011. Т. 81, № 6. С. 20-29.
4. Данильченко А. Г., Коваленко С. И., Самоваров В. Н. Экспериментальная проверка соотношения Хагены для больших кластеров, сформировавшихся в коническом сопле // Письма в Журнал технической физики. 2008. Т. 34, № 23. С. 87-94.
5. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
6. Gnatchenko E. V., Nechay A. N., Samovarov V. N., Tkachenko A. A. Polarization bremsstrahlung from xenon atoms and clusters: A cooperative effect contribution // Physical Review A, 2010, vol. 82, iss. 1, pp. 012702(1-6).
7. Анисимов М. П. Нуклеация: теория и эксперимент // Успехи химии. 2003. Т. 72, № 7. С. 664-705.
8. Гидаспов В. Ю., Пирумов У. Г., Иванов И. Э., Северина Н. С. Модели образования наночастиц в потоках газа: Учебно-методический комплекс. Калуга, М.: Эйдос, 2011. 214 с.
9. Bakhtar F., Zidi K. Nucleation phenomena in flowing high-pressure steam: experimental results // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 1989, vol. 203, no. 3, pp. 195-200.
10. Dykas S., Majkut M., Stozik M., Smolka K. Experimental research on coarse water formation in steam condensing flow on a transition through the shock wave // Journal of Physics: Conference Series, 2014, vol. 530, pp. 012023.
11. Jacobsen R. T., Penoncello S. G., Lemmon E. W. Thermodynamic properties of cryogenic fluids // In book: Innovations in Mechanical Engineering. Boston, MA: Springer, 1997, pp. 31-287.
12. Очков В. Ф., Пискотин С. А., Лоскутова Т. М., Гибадуллин И. А. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Электронный справочник. М.: Наука, 1978-2004 гг. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/OIVT/IVTANThermo/Rus/index.htm> (дата обращения 25.02.2021).
13. Рабинович В. А., Вассерман А. А., Недоступ В. И., Векслер Л. С. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона. М.: Изд-во стандартов, 1975. 636 с.
14. Fenichel H., Serin B. Low-temperature specific heats of solid neon and solid xenon // Physical Review, 1966, vol. 142, no. 2, pp. 490-495.
15. Ferreira A. G. M., Lobo L. Q. The sublimation of argon, krypton, and xenon // The Journal of Chemical Thermodynamics, 2008, vol. 40, pp. 1621-1626.
16. Свойства вещества: аргон. URL: <http://chemister.ru/Database/properties.php?dbid=1&id=228> (дата обращения 10.09.2018).
17. Корепанов М. А., Груздь С. А. Математическое моделирование течений с гомогенной конденсацией // Химическая физика и мезоскопия. 2015. Т. 17, № 1. С. 55-63.

18. Корепанов М. А., Груздь С. А. Математическое моделирование турбулентных течений с гомогенной конденсацией в сверхзвуковых соплах // Химическая физика и мезоскопия. 2016. Т. 18, № 3. С. 370-380.

19. Корепанов М. А., Груздь С. А. Расчет давления насыщенного пара с учетом малых агломератов // Химическая физика и мезоскопия. 2013. Т. 15, № 2. С. 223-230.

20. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970. 904 с.

Numerical Simulation of Homogeneous Condensation of Argon in a Supersonic Nozzle

¹Korepanov M. A., ¹Alies M. Yu., ²Mitryukova E. A.

¹ Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

² Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

SUMMARY. Numerical simulation of the flow of an inert gas (argon) in a conical micronozzle with a critical cross section diameter of 340 μm is carried out. Parametric studies of the influence of the parameters of deceleration (initial pressure) on the characteristics of the flow and the point of the beginning of condensation have been carried out. It is shown that the process of homogeneous condensation under the considered conditions is going on, and the initial pressure affects the point of the onset of condensation (Wilson point) and the final sizes of the condensate particles obtained in the nozzle. With an increase in the initial pressure, the Wilson point temperature increases as well as the size of the condensate particles, which corresponds to the mathematical model of the process considered in the work. The absence of inflection points on the temperature curve was also noted, which can be explained by the very small dimensions of the considered nozzle. The difference between the calculation results and experimental data can be explained by the fact that the simulation in this work considered the flow of an ideal gas, i.e., the viscous friction is not taken into account, which for micro nozzles will have a significant effect on the flow parameters and lead, first of all, to an increase in the flow temperature.

KEYWORDS: homogeneous condensation, conical nozzle, Wilson point, argon.

REFERENCES

1. Yakutin A. V. Issledovanie rabochikh protsessov v mikrodivigatel'nykh ustanovkakh [Investigation of working processes in rocket micropropulsion system]. *Elektronnyy zhurnal "Trudy MAI"* [Electronic journal "Proceedings of the MAI"], 2011, no. 45, pp. 33. (In Russian).

2. Kudryavtsev A. N., Shershnev A. A. Techenie zapylennogo gaza v sverkhzvukovom mikrosople: effekt aerodinamicheskoy fokusirovki [Dusty gas flow in a supersonic micro-nozzle: aerodynamic focusing effect]. *Dinamika mnogofaznykh sred: sbornik trudov XIV Vserossiyskogo seminarara* [Dynamics of multiphase media: collection of works of the XIV All-Russian seminar]. Novosibirsk: ITPM SO RAN Publ., 2015, pp. 49-53. (In Russian).

3. Garbaruk A. V., Demidov D. A., Kalmykov S. G., Sasin M. E. Computational optimization analysis of a gas-jet target in a laser-plasma short-wave radiation source. *Technical Physics*, 2011, vol. 56, no. 6, pp. 766-775. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S1063784211060053>

4. Danylchenko O. G., Kovalenko S. I., Samovarov V. N. Experimental verification of the Hagen relation for large clusters formed in a conical nozzle. *Technical Physics Letters*, 2008, vol. 34, no. 121, pp. 1037-1040. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S1063785008120146>

5. Vargaftik N. B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook on the thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow: Nauka, 1972. 720 p.

6. Gnatchenko E. V., Nechay A. N., Samovarov V. N., Tkachenko A. A. Polarization bremsstrahlung from xenon atoms and clusters: A cooperative effect contribution. *Physical Review A*, 2010, vol. 82, iss. 1, pp. 012702(1-6). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.82.012702>

7. Anisimov M. P. Nucleation: Theory and Experiment. *Russian Chemical Reviews*, 2003, vol. 72, no. 7, pp. 591-628. (In Russian). <https://doi.org/10.1070/RC2003v072n07ABEH000761>

8. Gidasov V. Yu., Pirumov U. G., Ivanov I. E., Severina N. S. *Modeli obrazovaniya nanochastits v potokakh gaza: Uchebno-metodicheskiy kompleks* [Models of the formation of nanoparticles in gas flows: Educational-methodical complex]. Kaluga, Moscow: Eydos Publ., 2011. 214 p.

9. Bakhtar F., Zidi K. Nucleation phenomena in flowing high-pressure steam: experimental results. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 1989, vol. 203, no. 3, pp. 195-200. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1989_203_027_02
10. Dykas S., Majkut M., Stozik M., Smolka K. Experimental research on coarse water formation in steam condensing flow on a transition through the shock wave. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 530, pp. 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/530/1/012023>
11. Jacobsen R. T., Penoncello S. G., Lemmon E. W. Thermodynamic properties of cryogenic fluids. In book: *Innovations in Mechanical Engineering*. Boston, MA: Springer, 1997, pp. 31-287. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1798-0>
12. Ochkov V. F., Piskotin S. A., Loskutova T. M., Gibadullin I. A. *Termodinamicheskie svoystva individual'nykh veshchestv. Elektronnyy spravochnik* [Thermodynamic properties of individual substances. Electronic reference book.]. Moscow: Nauka Publ., 1978-2004. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/TTHB/2/OIVT/IVTANThermo/Rus/index.htm> (accessed February 25, 2021).
13. Rabinovich V. A., Vasserman A. A., Nedostup V. I., Veksler L. S. *Teplofizicheskie svoystva neona, argona, kriptona i ksenona* [Thermophysical properties of neon, argon, krypton and xenon]. Moscow: Izd-vo standartov, 1975. 636 p.
14. Fenichel H., Serin B. Low-temperature specific heats of solid neon and solid xenon. *Physical Review*, 1966, vol. 142, no. 2, pp. 490-495. <https://doi.org/10.1103/PHYSREV.142.490>
15. Ferreira A. G. M., Lobo L. Q. The sublimation of argon, krypton, and xenon. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2008, vol. 40, pp. 1621-1626. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jct.2008.07.023>
16. Svoystva veshchestva: argon [Properties of the substance: argon]. (In Russian). URL: <http://chemister.ru/Database/properties.php?dbid=1&id=228> (accessed September 10, 2018).
17. Korepanov M. A., Gruzd' S. A. Matematicheskoe modelirovanie techeniy s gomogennoy kondensatsiyey [Mathematical modeling of flow with homogeneous condensation]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2015, vol. 17, no. 1, pp. 55-63. (In Russian).
18. Korepanov M. A., Gruzd' S. A. Matematicheskoe modelirovanie turbulentnykh techeniy s gomogennoy kondensatsiyey v sverkhzvukovykh soplakh [Mathematical modeling of turbulent flow with homogeneous condensation in the supersonic nozzle]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2016, vol. 18, no. 3, pp. 370-380. (In Russian).
19. Korepanov M. A., Gruzd' S. A. Raschet davleniya nasyshchennogo para s uchetom malyykh aglomeratov [The calculation of the saturated vapor pressure including small agglomerates]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2013, vol. 15, no. 2, pp. 223-230. (In Russian).
20. Loytsyanskiy L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas]. Moscow: Nauka Publ., 1970. 904 p.

Корепанов Михаил Александрович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: kma@udman.ru

Альес Михаил Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, директор УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: aliesmy@mail.ru

Митрюкова Екатерина Александровна, аспирант ИЖГТУ имени М.Т.Калашникова