

Для цитирования: Бухаров А.В., Вишневский Е.В., Гиневский А.Ф. Численное моделирование охлаждения струй водорода и дейтерия применительно к установкам по получению криогенных монодисперсных мишеней. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (1): 8-17.
DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-8-17

For citation: Boukharov A.V., Vishnevsky E.V., Ginevsky A.F. Numerical simulation of cooling jet from hydrogen and deuterium as applicable to installations on receiving cryogenic monodisperse targets. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 8-17. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-8-17

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.56: 621.039

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-8-18

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СТРУЙ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСТАНОВКАМ ПО ПОЛУЧЕНИЮ КРИОГЕННЫХ МОНОДИСПЕРСНЫХ МИШЕНЕЙ

Бухаров А.В.¹, Гиневский А.Ф.³, Вишневский Е.В.²

¹⁻³Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

¹⁻³111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, Россия,

¹e-mail:boukharov@mail.ru, ²e-mail:alexeyginevsky@gmail.com,

³e-mail: emmanuelcell@mail.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка модели и проведение численных расчётов охлаждения тонких струй водорода и дейтерия применительно к установкам по получению криогенных монодисперсных мишеней. **Методы.** Для реализации поставленной цели была создана модель истечения криогенной струи в область низкого давления. В программной среде PHOENICS численным методом исследовано изменение с течением времени температуры поверхности и внутренней части струи при различных внешних параметрах. **Результат.** Получены зависимости изменения температуры жидких струй водорода и дейтерия вдоль поверхности струи и по радиусу в зависимости от диаметра струи, скорости, начальной температуры струи и давления в рабочей камере установок по получению криогенных монодисперсных мишеней. **Вывод.** Показана принципиальная возможность создания высокоскоростных криогенных монодисперсных мишеней. В соответствии с расчётами, при вводе тонких жидких струй водорода или дейтерия со скоростью до 100 м/с в рабочую камеру с низким давлением, струи на расстоянии до 1 мм не успевают замёрзнуть и могут быть разбиты на монодисперсные капли. Капли за счёт испарения охлаждаются и становятся гранулами. Разработанная модель и программа для определения параметров устойчивого монодисперсного распада жидких криогенных струй, а также результаты численных расчётов могут быть использованы при создании установок по получению высокоскоростных криогенных монодисперсных мишеней.

Ключевые слова: струи водорода, струи дейтерия, криогенные монодисперсные мишени, модель истечения криогенной струи, низкое давление, программная среда PHOENICS

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

NUMERICAL SIMULATION OF COOLING JET FROM HYDROGEN AND DEUTERIUM AS APPLICABLE TO INSTALLATIONS ON RECEIVING CRYOGENIC MONODISPERSE TARGETS

Alexander V. Bukharov¹, Alexey F. Ginevsky³, Evgeny V. Vishnevsky²

¹⁻³National Research University «MPEI»,

¹⁻³14, Krasnokazarmennaya Str., Moscow 111250, Russia,

¹e-mail: boukharov@mail.ru, ²e-mail: alexeyginevsky@gmail.com,

³e-mail: emmanuelcell@mail.ru

Abstract Objectives Development of a model and carrying out numerical calculations for the cooling of thin jets of Hydrogen and Deuterium as applicable to installations on receiving cryogenic monodisperse targets. **Methods.** To achieve this purpose, the model of cryogenic jet outflow into the low pressure area was created and using PHOENICS software the temperature change of the surface and the interior of a jet over time for various external parameters is investigated through the numerical method. **Result.** The dependences of temperature changes of liquid Hydrogen and Deuterium jets along the jet surface and along the radius depending on the jet diameter, speed, initial jet temperature and pressure in the working chamber of installations for receiving cryogenic monodisperse targets were carried out. **Conclusion.** The principal possibility of creating high-speed cryogenic monodisperse targets is shown. According to the calculations, at input of thin liquid jets of Hydrogen or Deuterium with a speed up to 100 m/s into the working chamber with low pressure, jets at a distance of up to 1 mm do not have time to freeze and can be broken into monodisperse drops. Drops are cooled due to evaporation and become granules. The developed model, the program for determination of parameters of steady monodisperse disintegration of liquid cryogenic streams and results of numerical calculations can be used during creation of units for receiving high-speed cryogenic monodisperse targets.

Keywords: hydrogen jets, deuterium jets, cryogenic monodisperse targets, cryogenic jet outflow model, low pressure, PHOENICS software

Введение. Развитие ускорительной техники сделало возможным получение высокоэнергетических пучков элементарных частиц. Взаимодействие таких пучков с криогенными монодисперсными мишенями позволит решить ряд фундаментальных проблем ядерной физики. Криогенная монодисперсная мишень рассматривается как наиболее перспективная мишень для будущего эксперимента «PANDA» [1-3]. «PANDA» — это уникальный эксперимент в рамках проекта нового европейского ускорителя FAIR в г. Дармштадт (Германия). Физическая программа эксперимента направлена на исследование фундаментальных проблем ядерной физики, нахождение новых экстремальных форм материи.

В общем виде криогенные монодисперсные мишени представляют собой поток твёрдых монодисперсных гранул малых размеров, получаемых из предварительно сжиженного газа, с разбросом гранул по размерам и скорости, не превышающим 0,1%.

Криогенные монодисперсные мишени имеют следующие уникальные свойства:

1. Малый размер монодисперсных мишеней – диаметр от 10 мкм до 100 мкм. Мишени можно получать из жидкого водорода или его изотопов;
2. Высокая светимость мишеней позволяет значительно сократить экспериментальное время и увеличить статистическую достоверность регистрации новых элементарных частиц;
3. Возможность регистрации разлёта частиц, образующихся в результате распада ядер мишени, в угле 4π.
4. Возобновляемость мишени. Место мишени после взаимодействия с пучком занимает

новая мишень.

Подробное описание принципа работы установок по получению криогенных корпускулярных мишеней приведено в работах [4-7] и на рис. 1.

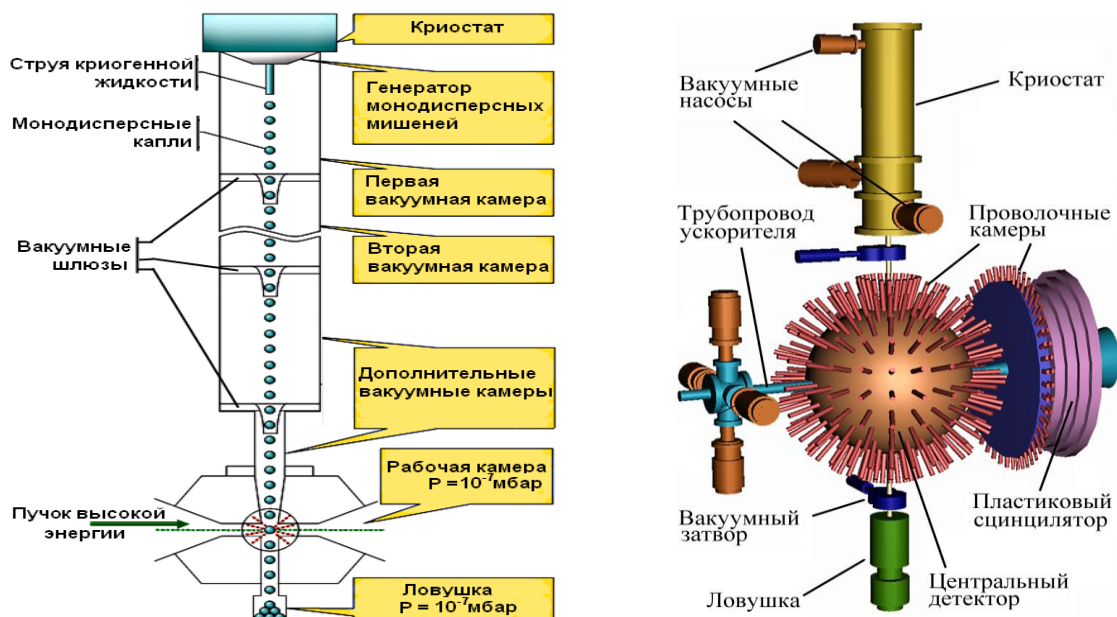


Рис. 1. Принцип работы и вариант установки криогенной монодисперсной мишени для исследования экстремальных форм материи: левый рисунок – принцип работы, правый рисунок – возможный вариант установки мишени

Fig.1. The principle of operation and the possible installation of a cryogenic monodisperse target for the study of extreme matter forms: left picture – principle of operation, right picture – possible installation of the target

Из генератора монодисперсных капель струя жидкого криоагента вытекает в первую вакуумную камеру. Для предотвращения быстрого замерзания истекающей струи в камере поддерживается давление немного меньше давления тройной точки.

В этой камере под действием специального возмущения, создаваемого на поверхности, струя распадается на одинаковые монодисперсные капли. Теоретической основой получения монодисперсных капель является теория Релея – Вебера [9].

Поскольку давление в вакуумной камере ниже давления около поверхности капель, происходит интенсивное испарение жидкости. В результате капли охлаждаются, замерзают и становятся твёрдыми гранулами. Гранулы, проходя через систему шлюзов и дополнительных вакуумных камер, ускоряются и поступают в рабочую камеру, где и происходит их взаимодействие с ускорительным пучком или лучом лазера. Для уменьшения натекания и увеличения скорости гранул используют две и более вакуумные камеры, разделённые между собой шлюзами. После взаимодействия с высокоэнергетичным пучком гранулы попадают в охлаждаемую ловушку и осаждаются на её стенках.

На основании анализа имеющейся литературы [10-15] можно сделать вывод, что наиболее сильное влияние на стабильность потока мишеней оказывают шлюзы и особенно первый шлюз, соединяющий камеру тройной точки с другими вакуумными камерами. Если значительно уменьшить давление в первой камере или совсем убрать первый шлюз и сразу направить капли во вторую вакуумную камеру, то можно значительно упростить конструкцию установки и уменьшить её размеры. Главное, не дать жидкой криогенной струе замёрзнуть.

Постановка задачи. Целью данной работы является определение связи между параметрами струй и давлением в первой камере, необходимой для устойчивого монодисперсного распада жидких струй водорода и дейтерия без их замерзания.

Методы исследования. Для реализации поставленной цели была создана модель истечения криогенной струи в область низкого давления, и в программной среде PHOENICS численным методом исследовано изменение с течением времени температуры поверхности и внутренней части струи при различных внешних условиях.

Математическая модель истечения криогенной жидкости в область низкого давления. В модели предполагается, что охлаждение струи происходит только за счёт испарения вещества с её поверхности. Испарение молекул с поверхности струи осуществляется по закону Герца – Кнудсена. Обратный поток молекул нагревает струю и замедляет процесс испарения. Однако влиянием этого процесса на температуру струи можно пренебречь в силу того, что его вклад при испарении в вакуум не превышает 5–10%.

При разработке математической модели были приняты следующие допущения: течение является стационарным;

- скорость жидкости достаточно мала по сравнению со скоростью звука, как в струе, так и в окружающей среде, поэтому использовано приближение несжимаемой жидкости;
- течение жидкости считается ламинарным;
- все свойства жидкости являются постоянными, не зависящими от температуры;
- окружающая среда достаточно разреженная, поэтому трением на поверхности струи можно пренебречь;
- температура жидкости такова, что поверхность струи находится в неравновесном состоянии, поэтому существует достаточно интенсивное испарение с поверхности струи;
- охлаждение струи происходит без фазового перехода.

В описанных допущениях уравнения математической модели могут быть записаны в следующем виде:

уравнение неразрывности:

$$\operatorname{div}(\vec{u}) = 0, \quad (1)$$

уравнение Навье - Стокса с учётом осевой симметрии в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned} \rho(\vec{u} \cdot \nabla) u_r &= -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho} \left(\Delta u_r - \frac{u_r}{r^2} \right), \\ \rho(\vec{u} \cdot \nabla) u_z &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \cdot \Delta u_z \end{aligned} \quad (2)$$

уравнение энергии:

$$\rho C_p (\vec{u} \cdot \nabla) T = \lambda \Delta T. \quad (3)$$

где $\vec{u}$ – вектор скорости струи, u_r – скорость струи по радиусу, u_z – скорость струи по оси z , μ – коэффициент динамической вязкости, T – температура струи, ρ – плотность жидкости, P – давление в рабочей камере, C_p – теплоёмкость, λ – теплопроводность.

Система уравнений (1) - (3) имеет следующие граничные условия:

- на входе в рабочую вакуумную камеру задается распределение скорости и температура жидкости:

$$\text{при } z = 0 \quad u_r = 0, \quad u_z = u_0(r), \quad T = T_0; \quad (4)$$

- на оси струи задается условие симметрии:

$$\text{при } r = 0 \quad \frac{\partial u_z}{\partial r} = 0, \quad u_r = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad (5)$$

- на поверхности струи при $r = R$ задаются нулевые касательные напряжения и условия испарения:

$$\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \chi \cdot j(T), \quad (6)$$

где χ – скрытая теплота парообразования; u_0 и T_0 соответственно скорость и начальная температура струи на входе в рабочую камеру; R – радиус струи.

Массовый поток в (6) может быть рассчитан с применением различных моделей.

В нашем случае используется модель Герца - Кнудсена:

$$j(T) = [P_s(T) - P] \left(\frac{M}{2\pi R_g T} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где $P_s(T)$ – давление насыщения на поверхности струи; P – давление в рабочей камере (см. рис.1); M – масса молекулы жидкости, R_g – универсальная газовая постоянная.

Таким образом, получена замкнутая система уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями.

Обсуждение результатов. В программной среде PHOENICS [16] были проведены численные расчёты изменения температуры жидких струй водорода и дейтерия по длине струи и по радиусу в зависимости от диаметра струи, скорости, начальной температуры струи и давления в рабочей камере. Конечно-разностная аппроксимация для связи давления и скорости при решении уравнений движения производилась методом контрольного объема с применением метода SIMPLEST [16].

Расчёты проводились для струй водорода и дейтерия с начальной температурой 20 К. Теплофизические свойства водорода и дейтерия, необходимые для расчётов взяты из работ [17-19] и представлены в табл. 1.

Таблица 1. Теплофизические свойства водорода и дейтерия [17-19]
Table 1. Heatphysical properties of hydrogen and deuterium [17-19]

Вещество Substance	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	χ , кДж/кг	$\mu \cdot 10^6$, Па·с
Водород Hydrogen	70,9	9,4	100	449,4	13,9
Дейтерий Deuterium	171,3	5,3	126	312,7	42,0

Результаты некоторых расчётов изменения температуры жидких струй водорода представлены на рис. 2 - 6, а результаты для струй дейтерия – на рис. 7- 11.

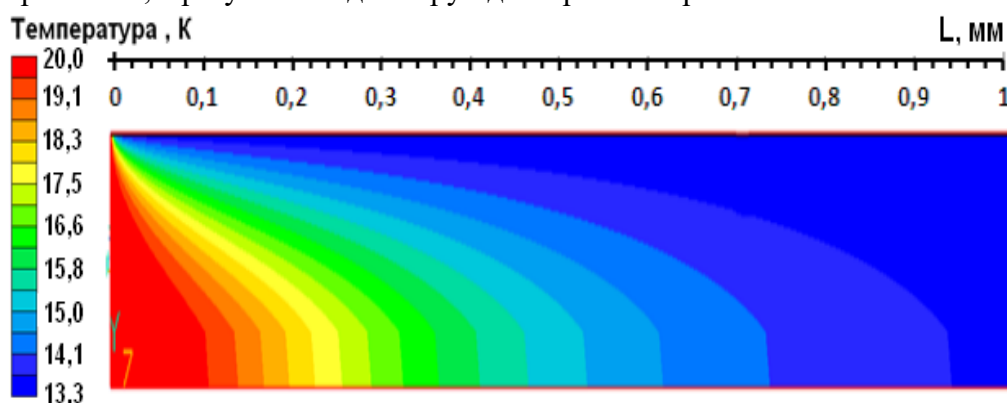


Рис.2. Изменение температуры поверхности и внутренней части 10 мкм струи водорода при истечении со скоростью 100 м/с в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.2. Temperature change of the surface and internal part of 10 mkm of hydrogen jet with expiration speed of 100 m/s in the working chamber with pressure of 50 mbar

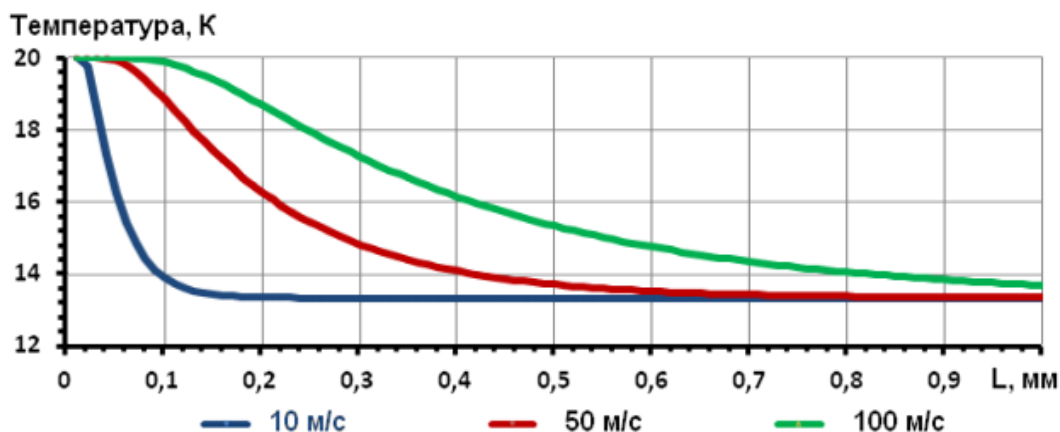


Рис.3. Изменение температуры внутренней части струи водорода диаметром 10 мкм при истечении с разной скоростью в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.3. Temperature change of the internal part of hydrogen jet with diameter of 10 mkm with different expiration speed in the working chamber with pressure of 50 mbar

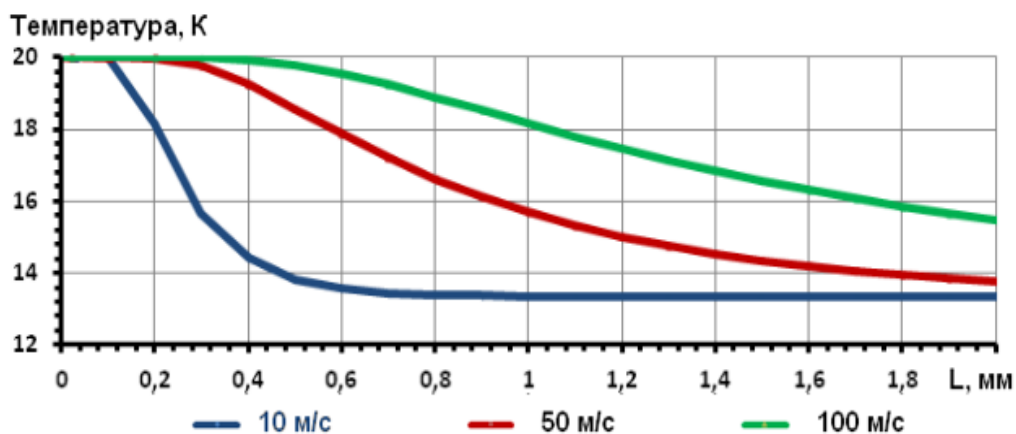


Рис.4. Изменение температуры внутренней части струи водорода диаметром 20 мкм при истечении с разной скоростью в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.4. Temperature change of the internal part of hydrogen jet with diameter of 20 mkm with different expiration speed in the working chamber with pressure of 50 mbar

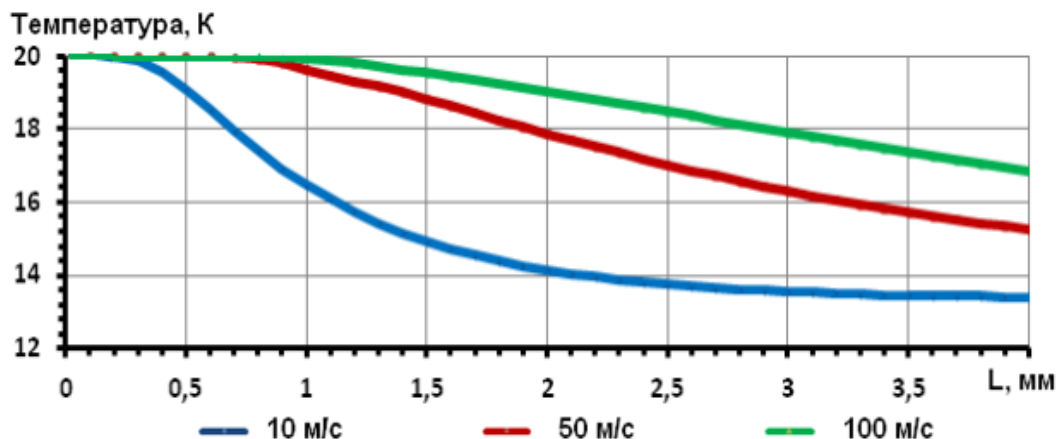


Рис.5. Изменение температуры внутренней части струи водорода диаметром 50 мкм при истечении с разной скоростью в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.5. Temperature change of the internal part of hydrogen jet with diameter of 50 mkm with different expiration speed in the working chamber with pressure of 50 mbar

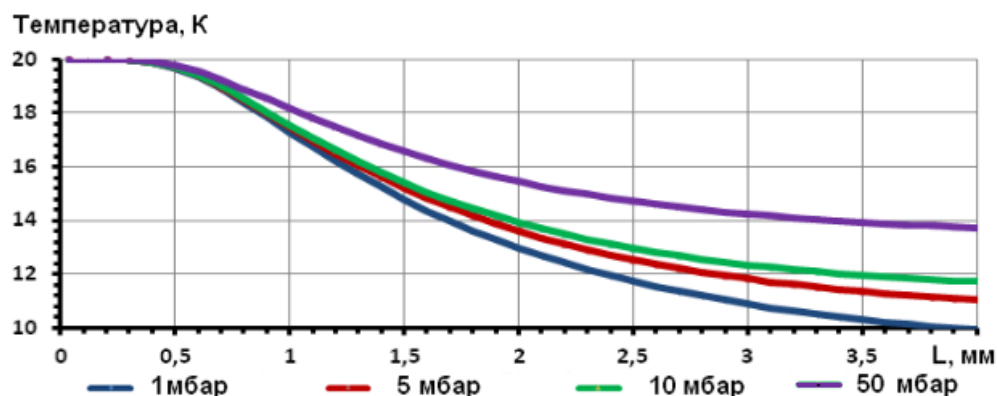


Рис.6. Изменение температуры внутренней части струи водорода диаметром 20 мкм при истечении со скоростью 100 м/с в рабочую камеру с различным давлением

Fig.6. Temperature change of the internal part of hydrogen jet with diameter of 20 mkm with expiration speed of 100 m/c in the working chamber with different pressure

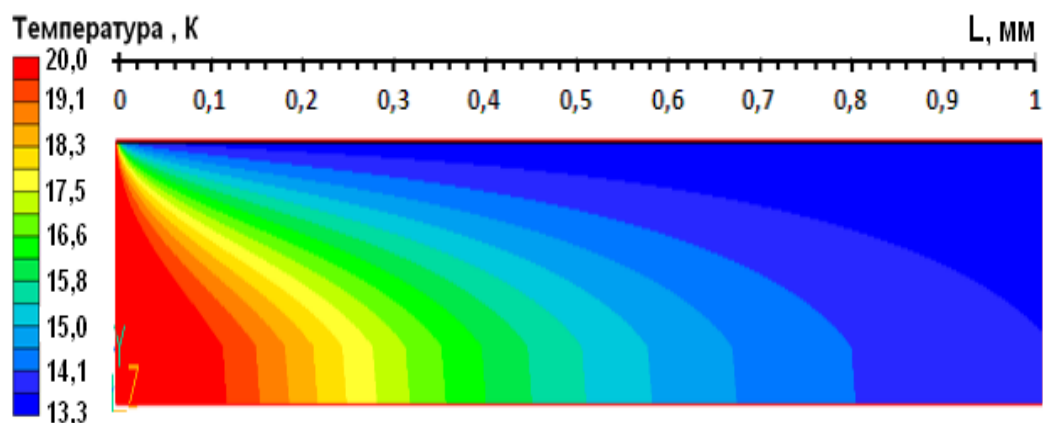


Рис.7. Изменение температуры поверхности и внутренней части 10 мкм струи дейтерия при истечении со скоростью 100 м/с в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.7. Temperature change of surface and internal part of 10 mkm of deuterium jet with expiration speed of 100 m/s in the working chamber with pressure of 50 mbar

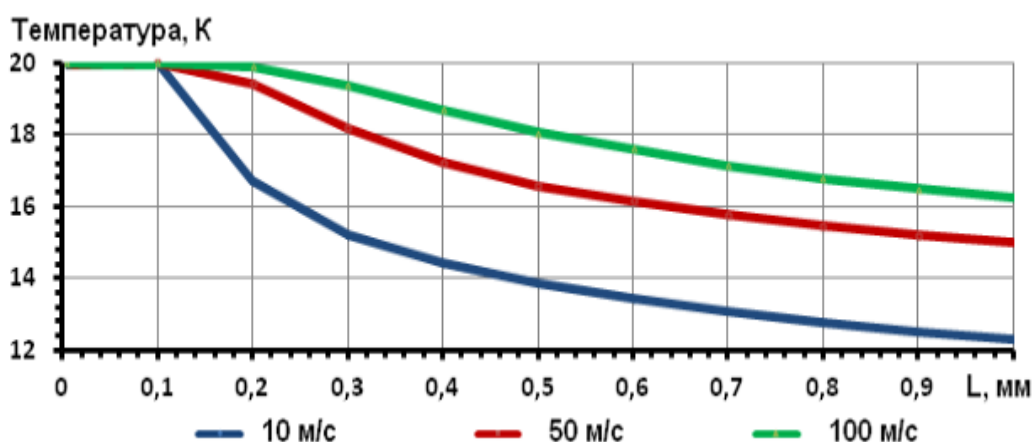


Рис.8. Изменение температуры внутренней части струи дейтерия диаметром 10 мкм при истечении с разной скоростью в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.8. Temperature change of the internal part of deuterium jet with diameter of 10 mkm with different expiration speed in the working chamber with pressure of 50 mbar

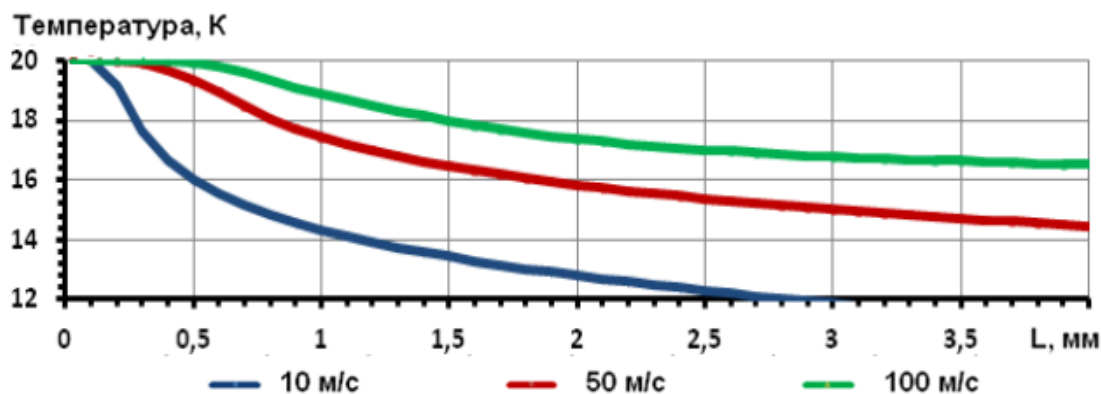


Рис.9. Изменение температуры внутренней части струи дейтерия диаметром 20 мкм при истечении с разной скоростью в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.9. Temperature change of the internal part of deuterium jet with diameter of 20 mkm with different expiration speed in the working chamber with pressure of 50 mbar

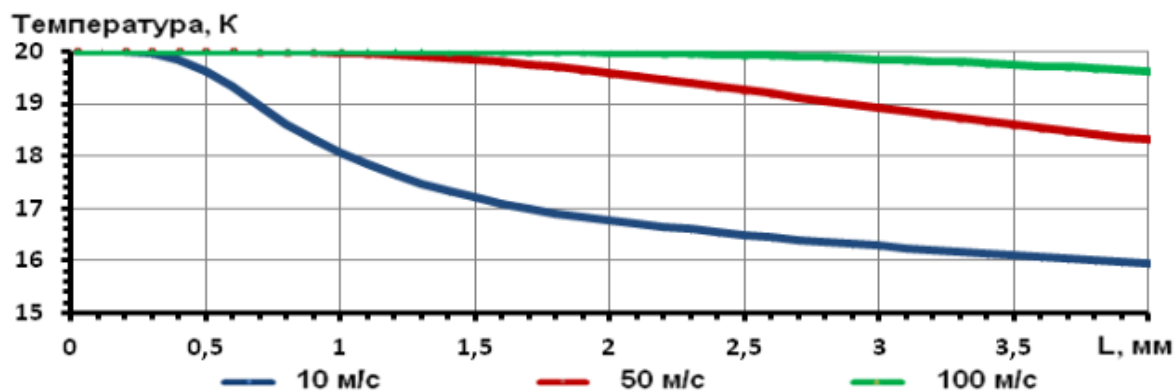


Рис.10. Изменение температуры внутренней части струи дейтерия диаметром 50 мкм при истечении с разной скоростью в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.10. Temperature change of the internal part of deuterium jet with diameter of 50 mkm with different expiration speed in the working chamber with pressure of 50 mbar

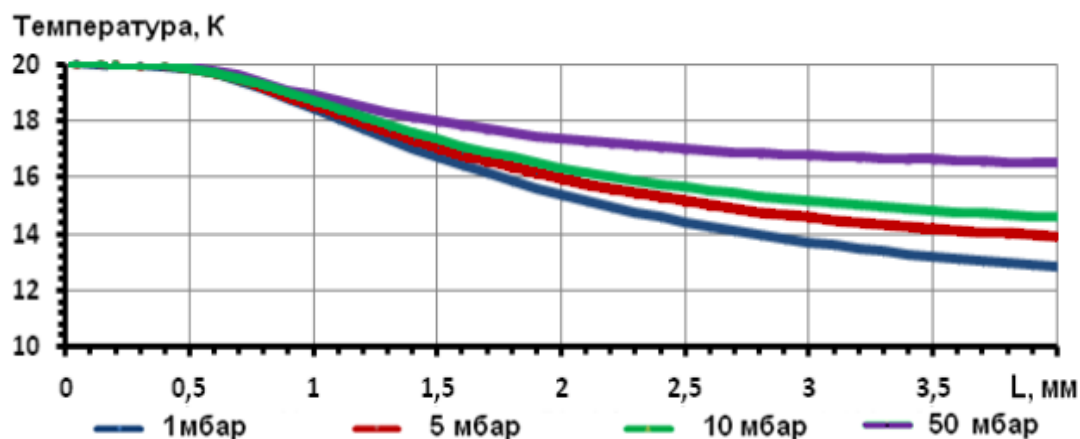


Рис.11. Изменение температуры внутренней части струи водорода диаметром 20 мкм при истечении со скоростью 100 м/с в рабочую камеру с различным давлением

Fig.11. Temperature change of the internal part of deuterium jet with diameter of 20 mkm at the expiration speed of 100 m/c in the working chamber with different pressure

Из результатов, представленных на рис. 2 - 11 видно, что замерзание тонких струй водорода и дейтерия при их истечении в рабочую камеру с низким давлением не происходит мгновенно. Время полного замерзания существенным образом зависит от диаметра струи, скорости её истечения и давления в рабочей камере. Чем меньше давление в рабочей камере, чем меньше диаметр струи и чем меньше скорость истечения – тем быстрее замерзают водородные и дейтериевые струи.

В соответствии с расчётами струи водорода диаметром 10 мкм при скорости истечения 10 м/с замёрзают на расстоянии 0,1 мм от точки ввода в рабочую камеру, а струи дейтерия с теми же параметрами замёрзают на расстоянии 0,9 мм от точки ввода в рабочую камеру.

Чем больше скорость истечения, тем медленнее происходит замерзание струй. В соответствии с расчётами тонкие струи водорода при скорости истечения 100 м/с и давлении в рабочей камере 1 мбар замёрзают на расстоянии 1 мм от точки ввода в рабочую камеру.

Струи дейтерия с теми же параметрами замёрзают на расстоянии 3 мм от точки ввода в рабочую камеру.

Из результатов численных расчётов следует, при одинаковых внешних параметрах замерзание струй дейтерия происходит за большее время, чем замерзание струй водорода. Полученный результат можно объяснить отличием теплофизических свойств водорода и дейтерия.

Вывод. Полученные результаты имеют важное научное и практическое значение. С их помощью, зная давление в первой камере, можно определить параметры необходимые для устойчивого монодисперсного распада жидких струй водорода и дейтерия без их замерзания.

Для установок по получению криогенных монодисперсных мишеней одной из важных проблем является проблема получения стабильного потока мишеней. Наиболее сильное влияние на стабильность потока мишеней оказывают шлюзы и особенно первый шлюз, соединяющий камеру тройной точки с другими вакуумными камерами. Если значительно уменьшить давление в первой камере или совсем убрать первый шлюз и сразу направить капли во вторую вакуумную камеру, то можно значительно упростить конструкцию установки и уменьшить её размеры.

Для определения параметров устойчивого монодисперсного распада жидких криогенных струй разработана модель истечения криогенной струи в область низкого давления.

В программной среде PHOENICS для установок по получению криогенных монодисперсных мишеней численным методом получены зависимости изменения температуры жидких струй водорода и дейтерия вдоль поверхности струи и по радиусу в зависимости от диаметра струи, скорости, начальной температуры струи и давления в рабочей камере.

Из полученных результатов следует, что при вводе тонких криогенных струй в среду с низким давлением они сразу не замерзают, а в течение некоторого времени остаются жидкими. Время полного замерзания существенным образом зависит от диаметра струи и скорости её истечения в рабочую камеру. Чем больше скорость истечения, тем медленнее происходит замерзание струй.

В соответствии с расчётами, тонкие струи водорода при скорости истечения 100 м/с и давлении в рабочей камере 1 мбар, замерзают на расстоянии 1 мм от точки ввода в рабочую камеру. Струи дейтерия с теми же параметрами замерзают на расстоянии 3 мм от точки ввода в рабочую камеру. Незамёрзшие струи могут быть разбиты на монодисперсные капли. Капли за счёт испарения охлаждаются и становятся стабильным потоком твёрдых монодисперсных мишеней.

Разработанная модель, программа для определения параметров устойчивого монодисперсного распада жидких криогенных струй и результаты численных расчётов могут быть использованы при создании установок по получению высокоскоростных криогенных монодисперсных мишеней.

Библиографический список:

1. Factory / C. Ekstrom // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. – 1995. – V. 362. – P.1–3.
2. Криогенные корпускулярные мишени. Концепция и основная модель / А. В. Бухаров, А. Ф. Гиневский, В. П. Чернышев и др. – Препринт – № 17-17.М.: Изд-во МЭИ, 2002.–35 с.

3. Бухаров А. В. Криогенные корпускулярные мишени в энергетике/ А.В. Бухаров, А.С. Дмитриев. – М.: Изд-во МЭИ, 2013. – 144 с.
4. Криогенные корпускулярные мишени. Генерация гранул водорода: расчет основных конструктивных элементов, экспериментальный стенд, тесты / А.В.Бухаров, В. Боргс, В.Н. Афонасьев и др. Препринт – № 9-05. М.: Изд-во ИТЭФ, 2005. – 58 с.
5. Weber C. Zum Zerfalleines Flüssigkeitsstrahles (On the breakdown of a fluid jet) / C. Weber // Z. Angew. Math. und Mech. – 1931. Technical Design Report for the PANDA (Antiproton Annihilations at Darmstadt) Straw Tube Tracker / W. Erni, I. Keshelashvili, A. Aab et al. // The European Physical J. A – Hadrons and Nuclei. – 2013. – V. 49. – № 2. – P. 25.
6. Search for New Forms of Matter in Antimatter–matter Interactions in the PANDA Experiment / A.V.Boukharov, A. N. Vasiliev, D. A. Morozov et al. // Atomic Energy. – 2012. – V. 112. – № 2. – P. 129–138.
7. FAIR CDR - An International Accelerator Facility for Beams of Ions and Antiprotons // Conceptual Design Report, 2001. – 695 p.
8. Trostell B. Vacuum Injection of Hydrogen Micro-Sphere Beams / B. Trostell // Nuc. Instr. and Met. in Phys. Res. A. – 1995. – V. 362. – P. 41–52.
9. Ekstrom C. CELSIUS as an η – № 11. – P. 136–154.
10. Heat-Physical Problems of Cryogenic Corpuscular Targets / A.V.Boukharov, E.V. Ametistov, A.F. Ginevsky, M.A. Bukharova // Problems of atomic science and technology. Nuclear physics inv. – 2013. – № 6. – P. 205–208.
11. Бухаров А.В. Теплофизические проблемы криогенных корпускулярных мишеней/ А.В. Бухаров, А.Ф. Гиневский, А.Ю. Бурлакова // Вест. МЭИ. – 2015. – №3. – С. 35 – 41.
12. Бухаров А.В.Исследование поведения капиллярных сильноиспаряющихся струй жидкости в условиях вакуума / А.В. Бухаров, А.А. Семенов // Вест. МЭИ. – 2003. – № 4. – С.40–42.
13. Production of Hydrogen, Nitrogen and Argon Pellet with the Moscow - Julich Pellet Target / A. Boukharov, M. Büscher, V. Balanutsa et al. // Int. J. of Modern Physics E, Nuclear Physics. – 2009. – V.18. – Is.2. – P.505–510.
14. Экспериментальная установка для получения твёрдых гранул водорода / А.В. Бухаров, М. Бюшер, А.А. Семёнов и др.// Вест. МЭИ. – 2006. – № 2. – С. 16–24.
15. Эксперименты по получению гранул из твёрдого водорода / А.В. Бухаров, М. Бюшер, А.А. Семёнов и др.// Вест. МЭИ. – 2006. – № 3. – С. 34–40.
16. Official site of company CHAM/Products, 2013.–URL:www.cham.co.uk.URL: www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr313/tr313.html.
17. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович и др. / под ред. М.П. Малкова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 431 с.
18. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Справ. издание / Д.Ю. Гамбург, В.П.Семёнов, Н.Ф. Дубовкин и др. – М.: Химия, 1989. – 672 л.
19. Свойства жидкого и твёрдого водорода: Справочный обзор, № 1 / Б.Н. Есельсон, Ю. П. Благой, В.Н. Григорьев и др.– М.: Изд-во стандартов,1969.–136с.

References:

1. Technical Design Report for the PANDA (Antiproton Annihilations at Darmstadt) Straw Tube Tracker / W. Erni, I. Keshelashvili, A. Aab et al. // The European Physical J. A – Hadrons and Nuclei. – 2013. – V. 49. – № 2. – P. 25.
2. Search for New Forms of Matter in Antimatter–matter Interactions in the PANDA Experiment / A.V. Boukharov, A. N. Vasiliev, D. A. Morozov et al. // Atomic Energy. – 2012. – V. 112. – № 2. – P. 129–138.
3. FAIR CDR - An International Accelerator Facility for Beams of Ions and Antiprotons // Conceptual Design Report, 2001. – 695 p.
4. Trostell B. Vacuum Injection of Hydrogen Micro-Sphere Beams / B. Trostell // Nuc. Instr. and Met. in Phys. Res. A. – 1995. – V. 362. – P. 41–52.
5. Ekstrom C. CELSIUS as an η Factory / C. Ekstrom // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. – 1995. – V. 362. – P. 1–3.
6. Kriogennyye korpuskulyarnyye misheni. Kontseptsiya i osnovnaya model' / A. V. Bukharov, A. F. Ginevskiy, V. P. Chernyshev i dr.– Preprint – № 17 17.М.: Izd-vo MEI, 2002.–35 s. [Cryogenic corpuscular targets. Concept and main model/ A.V. Boukharov, A.F. Ginevsky, V.P. Chernyshev et al. – Preprint – № 17-17. М.: MPEI publishing house, 2002.–35 p. (In Russ.)]
7. Bukharov A. V. Kriogennyye korpuskulyarnyye misheni v energetike/ A.V. Bukharov, A.S. Dmitriyev. – М.: Izd-vo MEI, 2013. – 144 s.[Boukharov A.V., Cryogenic corpuscular targets in power / A.V. Boukharov, A.S. Dmitriyev. – М.: MPEI publishing house, 2013. – 144 p. (In Russ.)]
8. Kriogennyye korpuskulyarnyye misheni. Generatsiya granul vodoroda: raschet osnovnykh konstruktivnykh elementov, eksperimental'nyy stand, testy / A.V.Bukharov, V. Borgs, V.N. Afonasyev i dr. Pre-print – № 9-05. М.: Izd-vo ITEF, 2005. – 58 s.[Cryogenic corpuscular targets. Generation of granules of hydrogen: calculation of the basic constructional elements, experimental stand, tests / A.V. Boukharov, V. Borgs, V.N. Afonasyev et al. Preprint – № 9-05. М.: ITEF publishing house, 2005. – 58 p. (In Russ.)]

9. Weber C. Zum Zerfalleines Flüssigkeitsstrahles (On the breakdown of a fluid jet) / C. Weber // Z. Angew. Math. und Mech. – 1931. – № 11. – P. 136–154.
10. Heat-Physical Problems of Cryogenic Corpuscular Targets / A.V.Boukharov, E.V. Ametistov, A.F. Ginevsky, M.A. Bukharova // Problems of atomic science and technology. Nuclear physics inv. – 2013. – № 6. – P. 205–208.
11. Bukharov A.V. Teplofizicheskiye problemy kriogennykh korpuskulyarnykh misheney/ A.V. Bukharov, A.F. Ginevskiy, A.YU. Burlakova // Vest. MEI. 2015. №3. S. 35 – 41. [Boukharov A.V. Heatphysical problems of cryogenic corpuscular targets / A.V. Boukharov, F. Ginevsky, A.Yu. Burlakova // Vestnik MEI. – 2015. – №3. – P. 35 – 41. (In Russ.)]
12. Bukharov A.V.Issledovaniye povedeniya kapillyarnykh sil'noisparayushchikhsya struy zhidkosti v usloviyakh vakuuma / A.V. Bukharov, A.A. Semenov // Vest. MEI. 2003. № 4. S.40–42. [Boukharov A.V. Research of behavior capillary сильноиспаряющихся liquid streams in the conditions of a vacuum / A.V. Boukharov, A.A. Semyonov // Vestnik MEI. – 2003. – № 4. – P.40–42. (In Russ.)]
13. Production of Hydrogen, Nitrogen and Argon Pellet with the Moscow-Julich Pellet Target / A. Boukharov, M. Büscher, V. Balanutsa et al. // Int. J. of Modern Physics E, Nuclear Physics. 2009. V.18. Is.2. – P.505–510.
14. Eksperimental'naya ustanovka dlya polucheniya tvordykh granul vodoroda / A.V. Bukharov, M. Byusher, A.A. Semonov i dr.// Vest. MEI. 2006. № 2. S. 16–24. [Experimental installation for receiving firm granules of hydrogen / A.V. Boukharov, M. Büscher, A.A. Semyonov et al. // Vestnik MEI. 2006. № 2. pp. 16–24. (In Russ.)]
15. Experiments on receiving granules from solid hydrogen / A.V. Boukharov, M. Büscher, A.A. Semyonov et al. // Vestnik MEI. – 2006. – № 3. – C. 34–40. (In Russ.)]
16. Official site of company CHAM / Products, 2013. – URL: www.cham.co.uk.
17. Spravochnik po fiziko-tekhnicheskim osnovam kriogeniki / M.P. Malkov, I.B. Danilov, A.G. Zel'dovich i dr. / pod red. M.P. Malkova. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 431 c. [The reference book on physics and technology bases of cryogenics / L. S. Malkov, I.B. Danilov, A.G. Zeldovich et al. / under the editorship of M.P. Malkov. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 431 p. (In Russ.)]
18. Vodorod. Svoystva, polucheniye, khraneniye, transportirovaniye, primeneniye. Sprav. izdaniye / D.YU. Gamburg, V.P.Semonov, N.F. Dubovkin i dr. – M.: Khimiya, 1989. – 672 l. [Hydrogen. Properties, receiving, storage, transportation, application. Help edition / D.Yu. Hamburg, V.P. Semyonov, N.F. Dubovkin et al. . – M.: Chemistry, 1989. – 672 p. (In Russ.)]
19. Svoystva zhidkogo i tvordogo vodoroda: Spravochnyy obzor, № 1 / B.N. Yesel'son, YU. P. Blagoy, V.N. Grigor'yev i dr.– M.: Izd-vo standartov,1969.–136s. [Properties of liquid and solid hydrogen: The help review, № 1 / B.N. Eselson, Yu.P. Blagoy, V.N. Grigoriev et al. . – M.: Publishing house of standards, 1969.–136p. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Бухаров Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор, кафедра низких температур.

Гиневский Алексей Феликсович – кандидат технических наук, доцент, кафедра низких температур.

Вишневский Евгений Владимирович – аспирант, кафедра низких температур.

Information about the authors

Alexander V. Bukharov - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Low Temperatures

Alexey F. Ginevsky - Cand. Sc. (Technical), Assoc. Prof., Department of Low Temperatures.

Evgeny V. Vishnevsky - Postgraduate Student, Department of Low Temperatures.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.12.2018.

Принята в печать 25.01.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.12.2018.

Accepted for publication 25.01.2019.