

P18-2024-60

И. Л. Литвак *, М. В. Булавин,
Р. В. Чепурченко, А. В. Галушко

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО
ЗАМЕДЛЯЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА В ФОРМЕ ШАРИКОВ
ДЛЯ КРИОГЕННЫХ ЗАМЕДЛИТЕЛЕЙ НЕЙТРОНОВ

* E-mail: ivan.litvak@nf.jinr.ru

Литвак И. Л. и др.

P18-2024-60

Принципы работы устройства для изготовления дисперсного замедляющего вещества в форме шариков для криогенных замедлителей нейтронов

Проведено исследование основных физических эффектов, происходящих при производстве дисперсного замедляющего вещества для криогенных замедлителей нейтронов исследовательского импульсного реактора ИБР-2М (ОИЯИ, Дубна). Результаты исследования можно использовать в качестве основы для разработки более совершенного дисперсного замедляющего вещества, которое повысит безопасность эксплуатации комплекса криогенных замедлителей и улучшит его эксплуатационные характеристики.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2024

Litvak I. L. et al.

P18-2024-60

Operating Principles of a Device for Producing Dispersed Moderating Material in the Form of Balls for Cryogenic Neutron Moderators

A study of the main physical effects occurring during the production of dispersed moderating substance for cryogenic neutron moderators of the IBR-2M research pulsed reactor (JINR, Dubna) was conducted. The results of the study can be used as a basis for developing a more advanced dispersed moderating substance that will increase the safety of operation of the cryogenic moderator complex and improve its performance characteristics.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2024

ВВЕДЕНИЕ

В криогенных замедлителях источника нейтронов — исследовательского импульсного реактора ИБР-2М (ОИЯИ, Дубна) в качестве замедляющего вещества используются твердые замороженные шарики из смеси мезитилена и метаксилола (м-ксилола) для получения холодных нейтронов [1–3]. Минимальный и максимальный размеры шариков ограничены условиями их пневмотранспортировки в камеру замедлителя у активной зоны реактора и составляют 3,6–3,9 мм. Выгрузка шариков в пневмотранспортный трубопровод, а затем их доставка с помощью холодного гелия в камеру замедлителя производится через дозирующее устройство со скоростью 8 шт./с [2]. Для загрузки одного замедлителя используется 1 л шариков (около 27 000 шт.) [2]. Такая технология загрузки камеры замедлителя позволяет существенно снижать давление радиолитического водорода на ее стенки во время эксплуатации при мощности реактора, а также постоянно и равномерно снимать энерговыделение от замедления быстрых нейтронов с замедляющего вещества, что существенно увеличивает ресурс работы камеры и позволяет получать равномерный спектр нейтронов с ее поверхности [3].

Понимание физических процессов, происходящих при изготовлении шариков, является важным этапом для развития комплекса криогенных замедлителей исследовательского импульсного реактора ИБР-2М. Исследование проводится в рамках последовательных работ в направлении улучшения материально-технической базы комплекса криогенных замедлителей.

К исследуемым процессам можно отнести: формирование капель, теплообмен жидкого азота с окружающим пространством, теплообмен капли с жидким азотом, остывание и кристаллизацию капли.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО ЗАМЕДЛЯЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА ИЗ СМЕСИ МЕЗИТИЛЕНА И МЕТАКСИЛОЛА В ФОРМЕ ШАРИКОВ

Устройство для изготовления шариков состоит из криостата и капельницы. Криостат представляет собой вертикальный сосуд, который изолирован с нижней и боковых сторон от наружного пространства вакуумной рубашкой (рис. 1, а). Внутри криостата расположены два сетчатых сепаратора и ячейки цилиндрической формы в количестве 19 шт.

Ячейки устройства (см. рис. 1, б) предназначены для замораживания каждого шарика отдельно с целью исключения их слипания между собой, возникающего из-за того, что адгезия шариков сохраняется вплоть до температуры 150 К [2] (рис. 2).

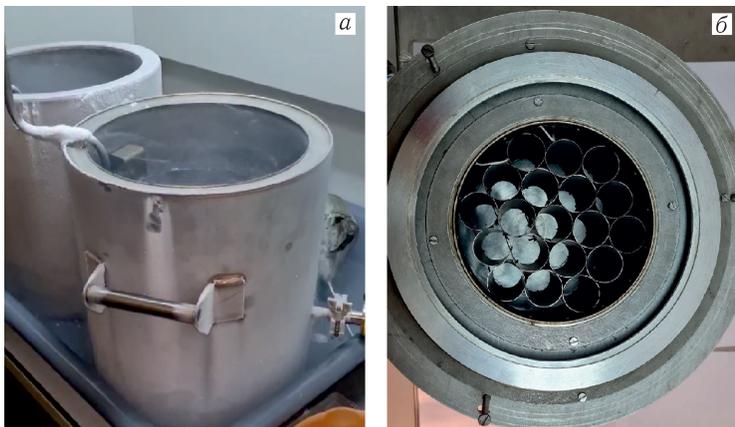


Рис. 1. Устройство для изготовления замороженных шариков: а) криостат; б) ячейки

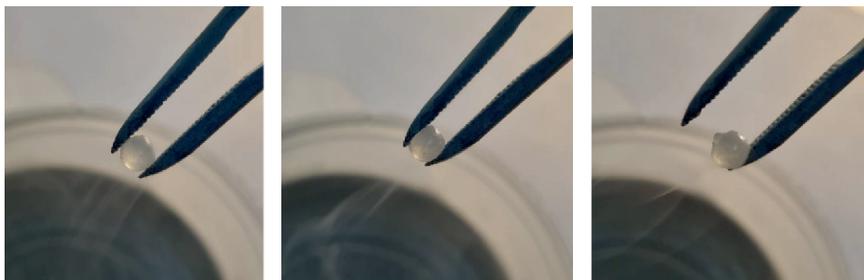


Рис. 2. Проявление пластических свойств и высокой адгезии при нагреве замороженного шарика из смеси мезитилен–м-ксилол: а) шарик с температурой 80 К; б) пластическая деформация шарика под давлением пинцета; в) прилипание шарика к пинцету

Формирование капли в данном устройстве происходит с помощью специальных форсунок — каплеформирователей в количестве 19 шт., расположенных в нижней части капельницы. Радиус форсунок меньше пары миллиметров (рис. 3).

Специальным регулировочным винтом управляется скорость потока смеси в форсунку. Это сделано для того, чтобы капля отрывалась от форсунки примерно раз в 30 с.

В результате изготовления шарики получаются диаметром 3,2–4,2 мм. Замороженные шарики тонут и подвергаются селекции по размеру, необходимо отсеять шарики, размер которых не вписывается в интервал 3,6–3,9 мм. Процесс селекции производится вручную путем просеивания на сетчатом сепараторе (рис. 4), который находится внутри криостата.

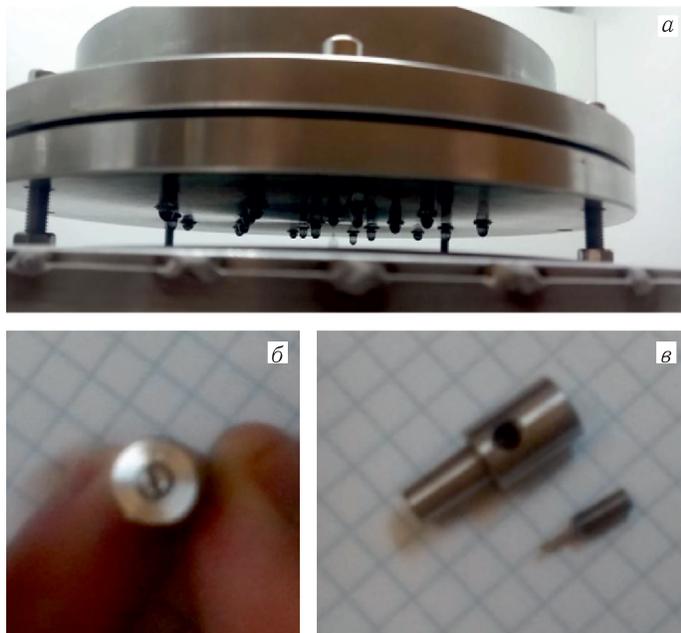


Рис. 3. Капельница с форсунками (а), а также форсунка в собранном (б) и разобранном (в) состоянии

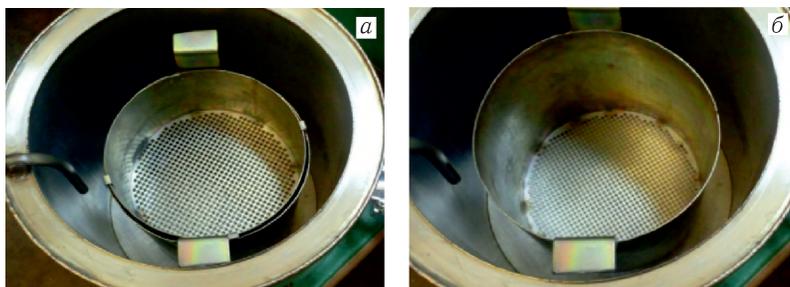


Рис. 4. Сетчатые сепараторы: а) верхняя отсеивающая сетка с ячейкой диаметром 3,9 мм; б) нижняя отсеивающая сетка с ячейкой диаметром 3,6 мм

В сепараторе шарики хранятся до тех пор, пока не закончится процесс их изготовления. Далее вместе с жидким азотом шарики пересыпаются в мерную емкость и отправляются на хранение в сосуд Дьюара (рис. 5).

Процесс изготовления шариков состоит в следующем: криостат заполняется жидким азотом до определенного уровня, который поддерживается по мере испарения, после чего сверху на криостат устанавливается капельница и заполняется смесью жидкого мезитилена и м-ксилола в пропорции 3:1. Параметры изготовления шариков из смеси объемом 280 мл указаны в табл. 1.

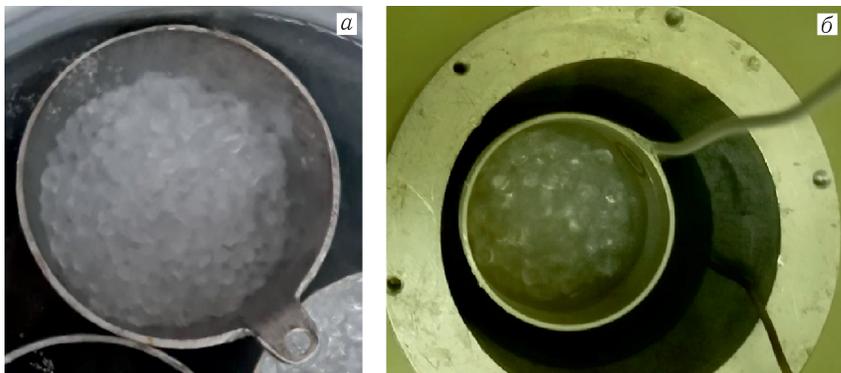


Рис. 5. Шарики диаметром 3,6–3,9 мм: а) помещены в мерную емкость; б) помещены в сосуд Дьюара

Таблица 1. Параметры изготовления шариков из смеси объемом 280 мл

Параметр	Значение
Время изготовления, ч	6
Частота добавления жидкого азота, л/ч	2
Шарики с диаметром более 3,9 мм, %	Менее 2,5
Шарики с диаметром менее 3,6 мм, %	Менее 2,5
Скорость изготовления, мл/ч	50

ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ И ОТРЫВА КАПЕЛЬ НА ФОРСУНКАХ. ОБЪЯСНЕНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТНЫХ ШАРИКОВ

Рассмотрим процесс формирования и отрыва капли. Формирование капли происходит под действием силы тяжести: смесь постепенно попадает в форсунку, а капля увеличивается в размерах. Форма капли определяется критерием минимума энергии системы [4]:

$$U = \sigma \int_{S_d} dS + g\rho_d \int_V X dV, \quad (1)$$

$$U \rightarrow \min, \quad (2)$$

где σ — поверхностное натяжение системы капля – окружающий воздух, Н/м; S_d — площадь поверхности капли, м²; ρ_d — плотность капли, кг/м³; V — объем капли, м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; X — высота элемента капли, м.

Для анализа уравнения используется капиллярная постоянная системы

$$\alpha = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho_d g}}, \quad (3)$$

а также вводится безразмерный параметр

$$a = \frac{\alpha}{R}, \quad (4)$$

где σ — поверхностное натяжение жидкости, Н/м; ρ_d — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; R — радиус форсунки, м.

Анализ данного уравнения, проведенный А. И. Григорьевым, А. А. Земсковым и С. О. Ширяевой в работе [4], показывает предельные равновесные формы капель (рис. 6).

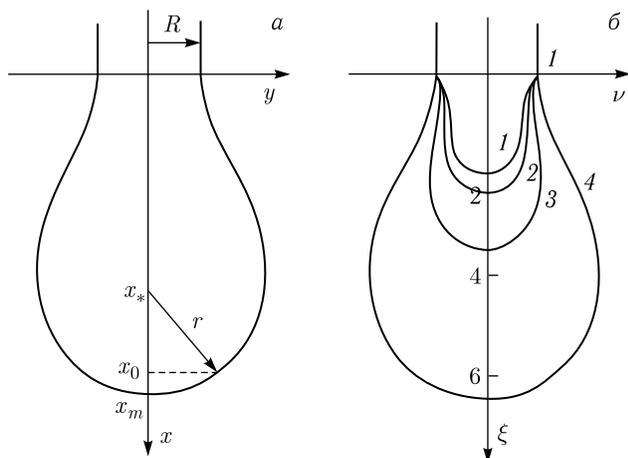


Рис. 6. Форма капли: а) схематическое представление капли, висящей на срезе форсунки; б) предельные равновесные формы капель: 1 — $a = 1$, 2 — $a = 1,265$, 3 — $a = 2$, 4 — $a = 5$

Также в работе приводятся причины отрыва капель, которые зависят не только от типа вещества, но и от размеров форсунок (табл. 2).

Таблица 2. Зависимости причины отрыва от радиуса форсунки, рассчитанные для смеси мезитилена и м-ксилола

Радиус форсунки, мм	Причина отрыва
$R < 2,06$	Неустойчивость Рэлея–Плато
$2,6 > R > 2,06$	Сила тяжести > сила поверхностного натяжения
$R > 4,41$	Неустойчивость Тейлора

Теперь становятся понятны причины возникновения шариков различных размеров. Основной причиной являются малые размеры форсунок, используемых в гравитационной капельнице, в результате чего отрыв капли возникает за счет развития неустойчивости, что является стохастическим

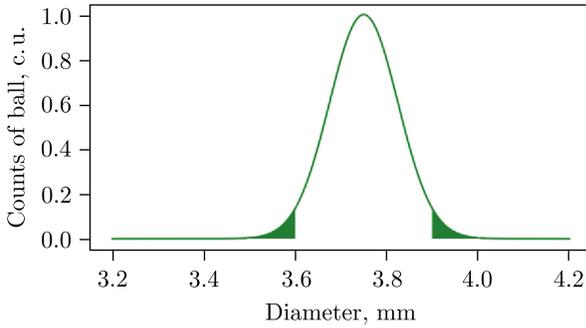


Рис. 7. Схематическое представление распределения диаметров шариков в процессе изготовления. Закрашенная область соответствует 5% дефектных шариков

процессом. Таким образом, возникает распределение размеров шариков возле среднего значения, что и приводит к возникновению 5% дефектных шариков (рис. 7).

ФОРМИРОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ЗАМОРОЖЕННЫХ ШАРИКОВ. ОБРАТНЫЙ ЭФФЕКТ ЛЕЙДЕНФРОСТА

После формирования и отрыва капли от форсунки она начинает падать. По мере приближения к поверхности жидкого азота капля вызывает интенсивное локальное кипение хладагента. Теплообмен капли с хладагентом осуществляется через паровую подушку, которая образуется в результате пленочного кипения жидкого азота под каплей (рис. 8) [5–8]. Такое явление называется обратным эффектом Лейденфроста [7–8], поскольку оно очень похоже на обычный эффект Лейденфроста [9].

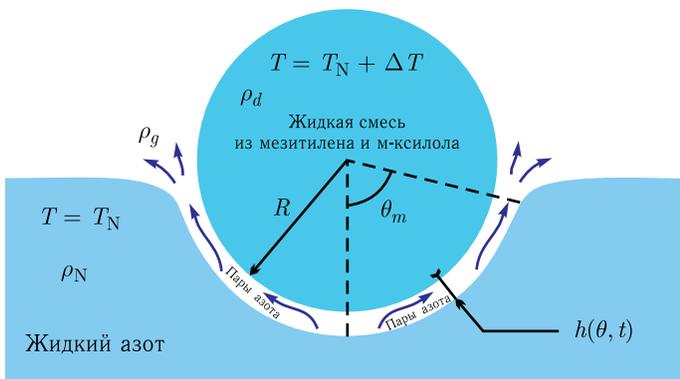


Рис. 8. Схематическое представление сферической капли, левитирующей над жидким азотом, удерживаемой паровой подушкой [7]

При этом чем ближе капля к хладагенту в процессе падения, тем интенсивнее происходит теплообмен посредством паровой подушки [7]:

$$\frac{d}{dt}(\Delta T) = -\frac{kA}{\rho_d c_p V} \frac{\Delta T}{h}, \quad (5)$$

где ΔT — температурный напор, К; ρ_d — плотность капли, кг/м³; c_p — удельная теплоемкость капли, Дж/(кг · К); k — коэффициент теплопроводности паров жидкого азота, Вт/(м · К); V — объем капли, м³; A — площадь поверхности контакта капли с паровой подушкой, м²; h — высота паровой подушки, м.

В результате возникает выталкивающая сила, препятствующая погружению шарика в жидкий азот. Оценим величину этой силы, используя приближение тонкого слоя [10]. В таком случае можно использовать теорию смазки для нахождения давления в паровом слое [7]

$$p = -\frac{24\mu R^2}{h^3} \left(\frac{dh}{dt} - \frac{k\Delta T}{\rho_g L^v h} \right) \ln(\sqrt{2} \cos(\theta/2)) \quad (6)$$

или в квазистатическом пределе

$$p = \frac{24\mu R^2}{h^4} \frac{k\Delta T}{\rho_g L^v} \ln(\sqrt{2} \cos(\theta/2)), \quad (7)$$

где ΔT — температурный напор, К; R — радиус капли, м; μ — вязкость паров азота, Па · с; ρ_g — плотность паровой подушки, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; k — коэффициент теплопроводности паров жидкого азота, Вт/(м · К); L^v — удельная теплота парообразования жидкого азота, Дж/кг; h — высота паровой подушки, м; θ — угол, описывающий нижнюю четверть поверхности капли, рад.

Для нахождения выталкивающей силы необходимо определить форму поверхности, на которую оказывается давление. Рассмотрим форму капли в процессе ее превращения в твердый шарик. Без учета давления пара и силы тяжести, действующей на жидкий азот, форма капли и поверхности азота будет определяться условием минимума потенциальной энергии системы:

$$U \rightarrow \min,$$

$$U = U_d + U_s + U_g = \sigma_{d-s} \int_{S_d} dS + \sigma_{l-s} \int_{S_l} dS + g\rho_d \int_V X dV, \quad (8)$$

$$m_d = \int_V \rho_d dV = \text{const}, \quad (9)$$

где σ_{d-s} — поверхностное натяжение системы капля — пары азота, Н/м; σ_{l-s} — поверхностное натяжение системы жидкий азот — пары азота, Н/м; S_d — площадь поверхности капли, м²; S_l — площадь поверхности жидкого азота под каплей, м²; ρ_d — плотность капли, кг/м³; V — объем капли, м³;

g — ускорение свободного падения, м/с²; m_d — масса капли, кг; X — высота элемента капли, м.

Поскольку σ_{d-s} в несколько раз выше, чем σ_{l-s} (30 мН/м [11] и 8,85 мН/м [12] соответственно), то при одинаковой форме поверхности капли и жидкого азота площадь первого слагаемого будет в 2 раза больше площади второго, а минимальное значение энергии системы будет достигаться за счет уменьшения первого слагаемого. То есть оптимальной будет поверхность (капли и жидкого азота) с минимальной площадью поверхности капли и максимальным объемом. Данным условиям соответствует сферическая форма капли и полусферическая форма поверхности жидкого азота под каплей. При этом третье слагаемое описывает изменение формы капли со сферы на сплюснутый сфероид таким образом, что чем меньше радиус сферы, тем слабее форма отличается от сферической. Для вычисления выталкивающей силы будем считать, что форма шарика сферическая, что также хорошо согласуется с экспериментальными данными [2].

Найдем результирующую силу (10), действующую на шарик со стороны паров азота (F_p) и силы тяжести (F_g). Для этого необходимо найти вертикальную составляющую силы, возникающей от давления пара на площадь полусферы шарика, и силу тяжести, действующую на шарик [7]:

$$F = F_p - F_g, \quad (10)$$

$$F_p = \int_S p dS = 2 \int_0^\pi \int_0^{\pi/2} p(\theta) R^2 \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (11)$$

$$F_g = \int_V \rho g dV = \frac{4\pi\rho g R^3}{3}, \quad (12)$$

где F_p — сила, давящая на каплю со стороны паровой подушки, Н; S — площадь поверхности контакта капли с паровой подушкой, м²; F_g — сила тяжести, действующая на каплю, Н; V — объем капли, м³; ρ — плотность капли, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; R — радиус капли, м; F — результирующая сила, действующая на каплю, Н.

Оценку результирующей силы будем проводить для различных значений радиуса капли и температурного напора при постоянной толщине паровой подушки $h = 50$ мкм [8]. С использованием данных из табл. П.1 приложения были получены зависимости результирующей силы от температурного напора (рис. 9, а) и радиуса капли (рис. 9, б).

Из рис. 9 видно, что в исследуемом нами диапазоне размеров капель (радиусом 1,5–2,5 мм) давление парового слоя достаточно для их удержания. В данной оценке не учитывается зависимость толщины паровой подушки и формы капли от параметров системы, а также влияние на каплю перемещения пара внутри паровой подушки. Поэтому наблюдается ситуация, когда удерживающая сила монотонно возрастает с увеличением радиуса капли.

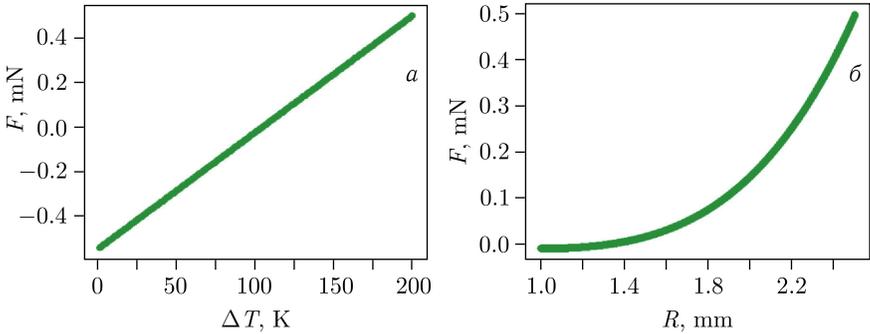


Рис. 9. Зависимость результирующей силы, действующей на шарик со стороны парового слоя: а) от температурного напора при $R = 1,25$ мм; б) от радиуса капли при $\Delta T = 200$ К

В действительности толщина парового слоя становится такой, чтобы сила тяжести уравновешивалась силой давления, таким образом, можно оценить толщину парового слоя как

$$h = \sqrt[4]{\frac{9k\mu R\Delta T}{\rho_d \rho_g g L^v}}, \quad (13)$$

где ΔT — температурный напор, К; R — радиус капли, м; μ — вязкость паров азота, Па·с; ρ_d — плотность капли, кг/м³; ρ_g — плотность паровой подушки, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; k — коэффициент теплопроводности паров жидкого азота, Вт/(м·К); L^v — удельная теплота парообразования жидкого азота, Дж/кг.

Из графиков на рис. 10 видно, что полученная толщина парового слоя порядка 40–65 мкм, следовательно, использование приближения тонкого слоя является корректным. Также уравнения показывают, что толщина

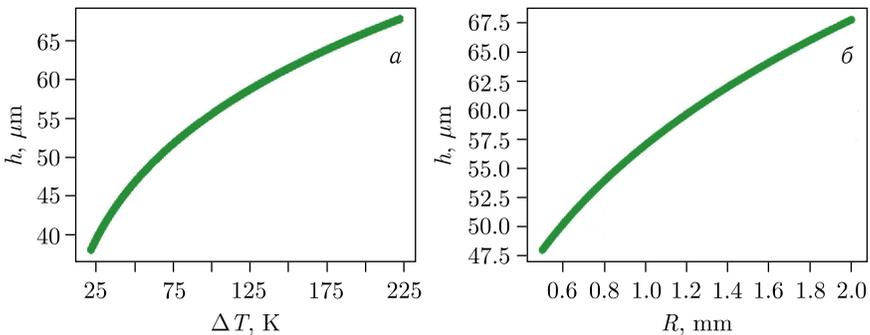


Рис. 10. Зависимость толщины паровой подушки: а) от температурного напора между каплей и жидким азотом при $R = 2$ мм; б) от радиуса капли при $\Delta T = 228$ К

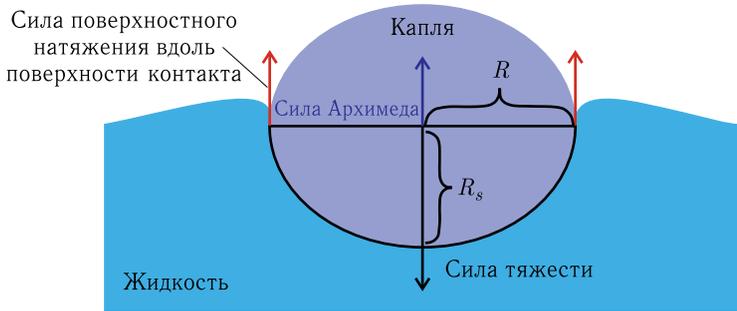


Рис. 11. Схематическое представление сил, действующих на несмачиваемую каплю с учетом влияния силы тяжести на форму

паровой подушки растет с увеличением радиуса капли. При этом существует максимально возможный радиус капли, при превышении которого левитация уже невозможна. Его можно оценить с помощью простейшей модели сплошной несмачиваемой капли на поверхности жидкости [13] (рис. 11).

Запишем уравнение баланса сил:

$$F_g = F_\sigma + F_A,$$

$$\int_{V_d} \rho_d g dV = \int_l \sigma \sin(\alpha) dl + \int_{V_{in}} \rho_{LN_2} g dV,$$

где F_g — сила тяжести, Н; F_σ — сила поверхностного натяжения со стороны жидкого азота, Н; F_A — сила Архимеда, Н; ρ_d — плотность капли, кг/м³; ρ_{LN_2} — плотность жидкого азота, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; σ — поверхностное натяжение жидкого азота, Н/м; V_d — объем капли, м³; V_{in} — объем вытесненной каплей жидкого азота, м³; l — длина контакта жидкого азота с каплей, м; α — угол смачивания, рад.

Максимальный радиус капли будет наблюдаться при максимальной длине контакта капли с поверхностью воды, который достигается при погружении ровно половины капли, а также при угле альфа, равном 90°С (который соответствует используемой модели). В таком случае равенство запишем в виде

$$\frac{4}{3}\pi R^2 R_s \rho_d g = 2\pi R \sigma + \frac{2}{3}\pi R^2 R_s \rho_{LN_2} g, \quad (14)$$

$$\Delta R = R - R_s,$$

где σ — поверхностное натяжение системы капля-пары азота, Н/м; ρ_{LN_2} — плотность жидкого азота, кг/м³; ρ_d — плотность капли, кг/м³; R — большая полуось сплющенного сфероида, м; R_s — малая полуось сплющенного сфероида, м; g — ускорение свободного падения, м/с².

Из двух корней уравнения (14) подходит только положительный, а при $\Delta R = 0$ получаем уравнение для идеальной сферической капли. Экспе-

риментально наблюдаются $\Delta R = 0,25$ мм. Рассчитанный максимальный радиус капли, для которой возможна левитация, представлен в табл. 3 и на рис. 12.

Таблица 3. **Максимальное значение радиуса капли при атмосферном давлении для жидкого азота и капли из смеси мезитилена и м-ксилола. Экспериментальное значение получено при начальной температуре смеси, равной 300 К**

Форма капли	Теоретическое значение радиуса, мм		Экспериментальное значение радиуса, мм
	без учета выталкивания жидкости ($F_g = F_\sigma$)	с учетом выталкивания жидкости ($F_g = F_\sigma + F_A$)	
Сферическая капля	1,25	1,72	3 мм \pm 0,5 мм
Сплюснутый сфероид ($\Delta R = 0,25$ мм)	1,38	1,85	

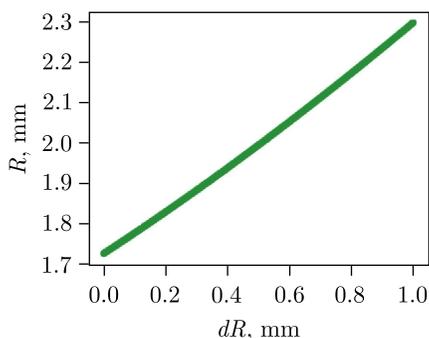


Рис. 12. Зависимость максимального радиуса капли от разности между полуосями сплюснутого сфероид с учетом силы Архимеда

Отличие теоретического значения от экспериментального связано с тем, что для определения формы шарика и его устойчивости не учитываются давление и вязкость парового слоя. Вероятно, их учет позволит еще больше приблизить теоретическое и экспериментальное значения.

В случае превышения максимального радиуса капли она погружается в жидкий азот вместе с паровой подушкой, в результате чего подъемная сила давления уменьшается и ее становится недостаточно для удержания капли над жидким азотом (рис. 13).

Форма таких «утонувших» капель сильно отличается от сферической в результате воздействия движения пара вверх внутри паровой подушки [7]. Таким образом, изготовление шариков возможно только при условии левитации капли над поверхностью жидкого азота.

Далее процесс формирования твердого шарика проходит три стадии: капля остывает до температуры плавления (в случае мезитилена она со-

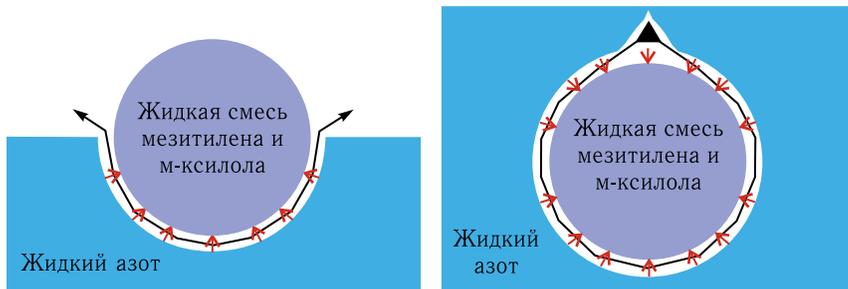


Рис. 13. Схематическое представление воздействия паров на каплю: а) капля находится на паровой подушке; б) капля полностью погружена в жидкий азот. Красными стрелками отмечено направление действия давления на каплю, а черной ломаной кривой обозначено направление потока паров азота

ставляет 223 К), кристаллизуется и остывает до температуры Лейденфроста, при которой испаряющийся азот перестает удерживать каплю над поверхностью жидкого азота и твердый замороженный шарик погружается в жидкий азот. Суммарную длительность всех стадий будем называть длительностью левитации, или временем Лейденфроста. На всех стадиях теплообмен между каплей и хладагентом происходит через паровую подушку, вызванную каплей. Теплопроводность паровой подушки существенно меньше теплопроводности хладагента (7,26 и 143 мВт/м/К соответственно при атмосферном давлении [14] для жидкого азота).

В полученной модели не учитываются эффекты, происходящие в паровой подушке, в том числе конвективные потоки пара, течение Куэтта, возникающее в паровом слое [8], не исследуется влияние давления парового слоя на форму капли и поверхности жидкого азота, а также не учитывается вязкость пара применительно к движению капли [8], теплообмен капли с газом над каплей, влияние внешнего излучения на каплю. Используются такие упрощенные модели, как: сплошная несмачиваемая капля на поверхности жидкости, приближение тонкого слоя для паровой подушки, пленочное кипение хладагента, постоянство теплофизических характеристик, принцип минимума потенциальной энергии, квазистатичность процесса, модель пористого тела для поверхности хладагента [15]. Для получения математической модели используются законы сохранения (массы, энергии), теория смазки. Физико-математическая модель хорошо описывает формирование капли на форсунке, в том числе дает: количественное описание связи диаметров форсунок и причины отрыва капли, описание причин левитации капли и упругого отражения от стенок, а также количественное описание длительности левитации капли, количественное описание максимального радиуса и плотности капли, для которой возможна левитация, количественное описание формы капли и теплообмена капли с хладагентом.

Далее рассмотрим стадии формирования замороженного шарика более подробно.

ФОРМИРОВАНИЕ ТВЕРДОГО ЗАМОРОЖЕННОГО ШАРИКА

На первой стадии по мере остывания капля совершает сложное движение над поверхностью жидкого азота под действием его паров в результате спонтанного нарушения симметрии положения шарика относительно центра поверхности жидкого азота под каплей [8].

Длительность охлаждения жидкой капли до температуры плавления определяется следующим образом [7]:

$$t_1 = C_{\text{drop}} \left\{ (T_0 - T_N)^{1/4} - (T_{\text{Fr}} - T_N)^{1/4} \right\}, \quad (15)$$

$$C_{\text{drop}} = \frac{4\rho_d c_p R}{3\eta} \left(\frac{9\mu R}{2\rho_d \rho_g g k^3 L^v} \right)^{1/4}, \quad (16)$$

где T_0 — начальная температура капли, К; T_N — температура жидкого азота, К; T_{Fr} — температура плавления смеси мезитилена и м-ксилола, К; ρ_d — плотность капли, кг/м³; c_p — удельная теплоемкость капли, Дж/(кг·К); R — радиус капли, м; η — доля поверхности капли, контактирующей с паровой подушкой; μ — вязкость паров азота, Па·с; ρ_g — плотность паровой подушки, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; k — коэффициент теплопроводности паров жидкого азота, Вт/(м·К); L^v — удельная теплота парообразования жидкого азота, Дж/кг.

Согласно расчетам (с использованием данных из табл. П.1) теоретическое значение t_1 для шарика диаметром 3,6 мм составило 5 с (рис. 14), а экспериментально измеренное значение — 6,1 с.

При уменьшении температуры плотность твердого мезитилена (и смесей на основе него) увеличивается (табл. П.2).

Длительность стадии кристаллизации капли определяется следующим образом [7]:

$$t_2 = C_{\text{drop}} \frac{\lambda^f}{c_p} (T_{\text{Fr}} - T_N)^{-3/4}, \quad (17)$$

где λ^f — удельная теплота плавления смеси мезитилена и м-ксилола; c_p — удельная теплоемкость капли; T_N — температура жидкого азота, К;

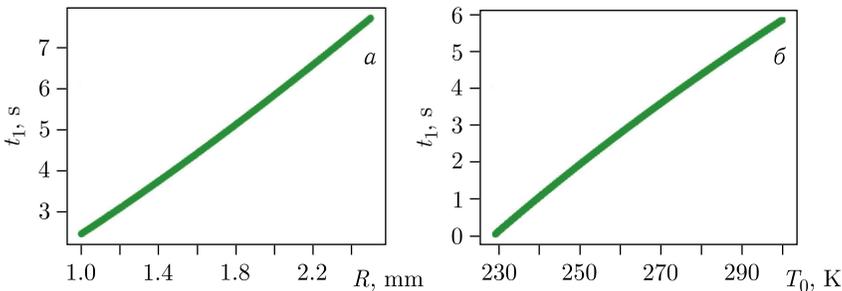


Рис. 14. Расчетные зависимости длительности остывания от радиуса капли (а) и начальной температуры (б)

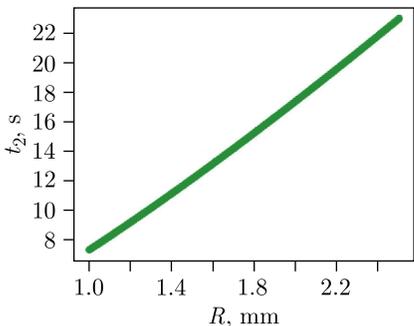


Рис. 15. Расчетные зависимости длительности кристаллизации от радиуса капли

подушка разделяется на отдельные паровые пятна, а после, при достижении температурного напора $\Delta T_{кр1}$, разделяется на отдельные пузырьки газообразного азота. Шарик теряет устойчивость и тонет при температурном напоре между $\Delta T_{кр1}$ и $\Delta T_{кр2}$, эту температуру мы будем называть температурой Лейденфроста [16]. Такое поведение характерно для любых хладагентов, поскольку теплофизические свойства криогенных жидкостей принципиально не отличаются от свойств «обычных жидкостей», хотя и имеют некоторые особенности [6].

Соответственно, на третьей стадии шарик остывает до температуры Лейденфроста. Длительность охлаждения шарика до температуры Лейденфроста определяется следующим образом [7]:

$$t_3 = C_{drop} \left\{ \frac{c_p^s}{c_p} \left[(T_{Fr} - T_N)^{1/4} - (T_L - T_N)^{1/4} \right] \right\}, \quad (18)$$

где c_p^s — удельная теплоемкость твердой смеси мезитилена и м-ксилола; c_p — удельная теплоемкость капли; T_N — температура жидкого азота, К;

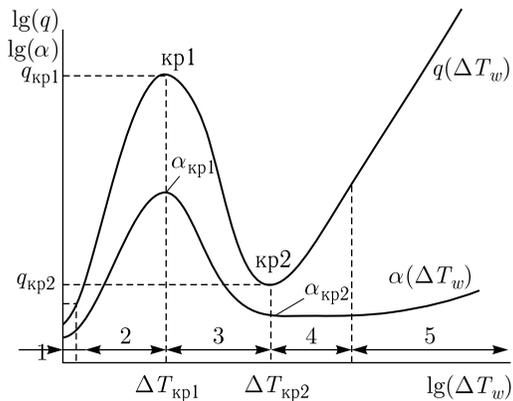


Рис. 16. Зависимость плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи от температурного напора: 1 — конвективная область без кипения; 2 — область пузырькового кипения; 3 — переходная область; 4 — область пленочного кипения; 5 — участок пленочного кипения со значительной долей передачи тепла излучением; $\Delta T_{кр1}$, $\Delta T_{кр2}$ — точки первого и второго кризисов кипения [6]

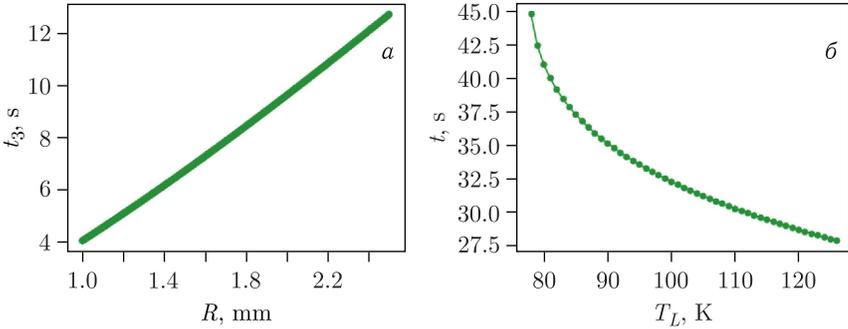


Рис. 17. а) Расчетная зависимость длительности остывания от радиуса капли; б) зависимость длительности левитации шарика от температуры Лейденфроста

T_{Fr} — температура плавления смеси мезитилена и м-ксилола, К; T_L — температура Лейденфроста, К.

С использованием данных из табл. П.1 приложения получено характерное время остывания твердого шарика из смеси мезитилена и м-ксилола радиусом 1,85 мм, равное ~ 9 с, а также произведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 17.

Интересна зависимость длительности левитации от температуры Лейденфроста. При приближении температуры Лейденфроста к температуре кипения хладагента наблюдается резкий рост длительности левитации. Такое поведение модели связано с тем, что рассматривается случай пленочного кипения, который исчезает уже при достижении значения $\Delta T_{\text{кр}2}$, которое больше температуры кипения хладагента. Из этого можно сделать вывод, что область температуры Лейденфроста, при которой наблюдается существенное возрастание длительности левитации, является артефактом модели.

Таким образом, получено количественное описание длительности левитации капель, в том числе описание зависимостей от теплофизических параметров системы.

ДВИЖЕНИЕ ШАРИКА НАД ЖИДКИМ АЗОТОМ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ШАРИКА МЕНЬШЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛЕЙДЕНФРОСТА

В случае отсутствия внешних возмущений возможна ситуация, при которой шарик будет левитировать над жидким азотом за счет испарения азота в результате взаимодействия с окружающим пространством, например посредством излучения. В таком случае толщину паровой подушки можно оценить следующим образом [8]:

$$h_c = \left(\frac{\mu \sigma T_{\text{out}}^4 - T_N^4 R}{\rho_g \rho_d g L^v} \right)^{1/3}, \quad (19)$$

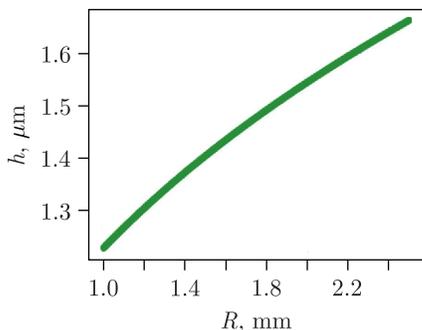


Рис. 18. Зависимость толщины паровой подушки от радиуса капли

подушке после остывания до температуры азота, движение происходит по окружности и с постоянной скоростью [8] (рис. 19). Такое движение он может продолжать до полного испарения азота, в результате чего невозможно изготовление шариков.



Рис. 19. Движение шарика по окружности с постоянной скоростью над спокойной поверхностью жидкого азота

Избежать этого эффекта можно путем введения малых возмущений поверхности азота либо более сильного изолирования жидкого азота от теплопритоков извне.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ШАРИКОВ

Длительность изготовления шарика состоит из суммарного времени изготовления на каждой стадии:

$$t_l = t_1 + t_2 + t_3 = \sum_{i=1}^3 t_i. \quad (20)$$

Характерные времена процессов, входящих в изготовление шарика, полученные расчетным и экспериментальным путем, представлены в табл. 4.

Таблица 4. Характерные времена процессов, происходящих при изготовлении шариков из смеси мезитилена и м-ксилола радиусом 1,85 мм

Процесс	Длительность	
	теоретическое значение, с	экспериментальное значение, с
Остывание капли до температуры плавления	5	$6,1 \pm 1$
Кристаллизация капли	17	Измерение не проводилось
Остывание шарика до температуры Лейденфроста	10	Измерение не проводилось
Левитация	32	30 ± 1

Из рис.20 видно, что теоретические значения хорошо согласуются с результатами экспериментов. Характер изменения длительности левитации в зависимости от радиуса капли или начальной температуры также совпадает с модельным поведением.

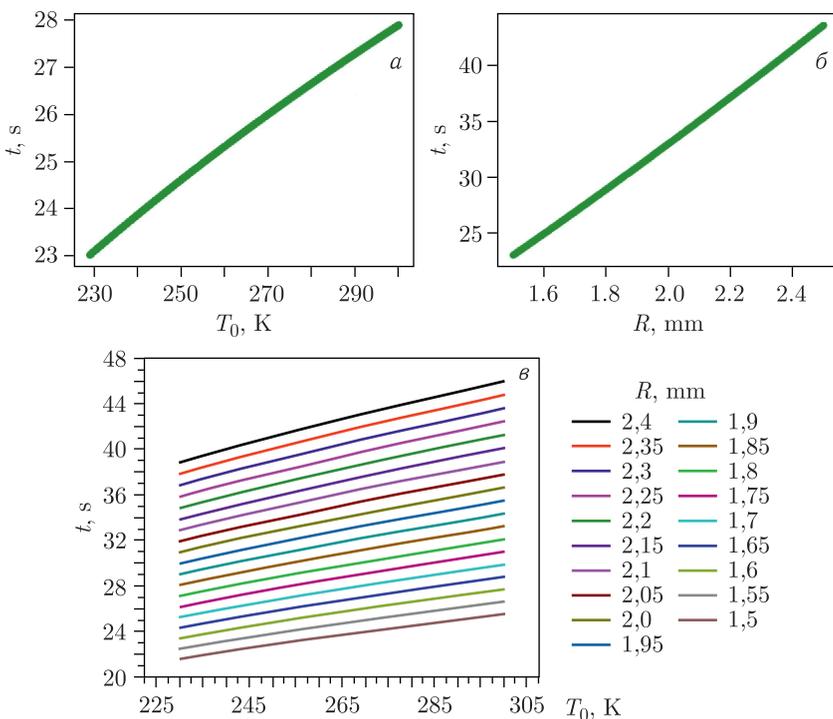


Рис. 20. Расчетные зависимости длительности левитации от начальной температуры (а), радиуса капли (б), от начальной температуры и радиуса капли (в)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применяемая аналитическая модель хорошо согласуется с поведением, наблюдаемым в экспериментах, и с достаточной точностью определяет длительность изготовления капель. Дальнейшие исследования, по-видимому, позволят ускорить изготовление шариков и разработать автоматизированное устройство с высокой проектной производительностью.

Дефектные шарики возникают в результате механизма отрыва капель от форсунки, а именно отрыва в результате развития неустойчивости. Данное обстоятельство также влияет на погрешности при проведении экспериментов, направленных на исследование явлений, происходящих при изготовлении шариков, однако может быть устранено накоплением большего числа данных, поскольку неустойчивость является стохастическим процессом.

Отличие шариков от сферической формы обуславливается их размером: чем больше размер, тем больше они похожи на сплюснутый сфероид. Однако данные отличия не столь существенны при требуемых диаметрах шариков, поскольку сам механизм изготовления способствует формированию сферических шариков.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1. Значения физических величин, используемых в работе

Физическая величина	Обозначение	Значение
Поверхностное натяжение жидкого азота с парами азота при 77,4 К	σ, σ_{l-s}	8,85 мН/м [12]
Поверхностное натяжение мезитилена при 230 К	σ_{d-s}	30 мН/м [11]
Плотность жидкого азота при 77,4 К	ρ_N	811,67 кг/м ³ [17]
Плотность мезитиленовой капли при 300 К	ρ_d	861,12 кг/м ³ [11]
Плотность паров азота при 77,4 К	ρ_g	4,5 кг/м ³ [17]
Вязкость паров азота при 77,4 К	μ	$55,2 \cdot 10^{-7}$ Па·с [18]
Коэффициент теплопроводности пара над жидким азотом при 77,4 К	k	7,26 мВт/м/К [14]
Удельная теплоемкость капли при 300 К	c_p	1,75 кДж/кг/К [11]
Удельная теплоемкость кристаллизованной капли при 230 К	c_p^s	1,21 кДж/кг/К [11]
Радиус капли	R	1,75–2,5 мм
Доля поверхности капли, контактирующей с паровой подушкой	ν	0,5
Ускорение свободного падения	g	9,81
Удельная теплота парообразования жидкого азота	L^v	200 кДж/кг [18]

Окончание табл. П.1

Удельная теплота плавления мезитилена	λ^f	80,12 Дж/кг [19]
Начальная температура капли	T_0	300 К
Температура жидкого азота	T_N	77,4 К
Температура плавления мезитилена	T_{Fr}	228,43 К [20]
Температура Лейденфроста жидкого азота	T_L	126 К [16]
Температура снаружи криостата	T_{out}	300 К

Таблица П.2. Плотность мезитилена при различных температурах

Температура, К	Плотность, кг/м ³
20	1,08 [21]
290	869 [22]
295	865 [22]
300	861,12 [11]
308,15	852,94 [11]
313,15	848,82 [11]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мухин К. А.* Источник холодных нейтронов реактора ИБР-2 на основе дисперсного мезитилена с системой охлаждения. Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.01. Дубна, 2019. 26 с.
2. *Булавин М. В.* Шариковый холодный замедлитель реактора ИБР-2: некоторые аспекты создания и применения. Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Дубна, 2017. 23 с.
3. *Куликов С. А.* Холодные замедлители нейтронов на основе твердых дисперсных водородсодержащих материалов. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.01. Дубна, 2016. 32 с.
4. *Григорьев А. И., Земсков А. А., Ширяева С. О.* Отрыв капли от капилляра под действием силы тяжести // Науч. приборостроение. 1991. Т. 1, №2. С. 50–58.
5. *Цой А. Н., Павленко А. Н.* Об интенсификации нестационарного теплообмена при кипении на поверхности пластины с низкотеплопроводными покрытиями // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, №6.
6. *Григорьев В. А., Павлов Ю. М., Аметистов Е. В.* Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия, 1977.
7. *Adda-Bedia M., Kumar S., Lechenault F., Moulinet S., Schillaci M., Vella D.* Inverse Leidenfrost Effect: Levitating Drops on Liquid Nitrogen // Langmuir. 2016. V. 32, No. 17. P. 4179–4188; doi: 10.1021/acs.langmuir.6b00574.
8. *Gauthier A., Rémi C. D., Lohse D., van der Meer D.* Self-Propulsion of Inverse Leidenfrost Drops on a Cryogenic Bath // Proc. Nat. Acad. Sci. 2019. V. 116, No. 4. P. 1174–1179.
9. *Leidenfrost J.* De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus. Typis Joan. Sebast. Straube, Acad. typogr. Impensis Hermannii Ovenni, Univers. bibliopolæ, 1756.

10. *Batchelor G. K.* An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge Univ. Press, 1967.
11. *He Yeming, Jiang Ruijen, Zhu Fang, Luan Tiangang, Huang Zhongqi, Ouyang Gangfeng.* Excess Molar Volumes and Surface Tensions of 1,2,4-Trimethylbenzene and 1,3,5-Trimethylbenzene with Isopropyl Acetate and Isobutyl Acetate at (298.15, 308.15, and 313.15) K // *J. Chem. Engin. Data.* 2008. V. 53, P. 5. P. 1186–1191; doi: 10.1021/je800046k.
12. *Jasper J. J.* The Surface Tension of Pure Liquid Compounds // *J. Phys. Chem. Refer. Data.* 1972. V. 1. P. 841.
13. *Wong C. Y. H., Adda-Bediab M., Vella D.* Non-Wetting Drops at Liquid Interfaces: From Liquid Marbles to Leidenfrost Drops // *Soft Matter.* 2017. V. 13. P. 5250–5260; doi: org/10.1039/C7SM00990A.
14. *Варгафтик Н. Б., Филиппов Л. П., Тарзиманов А. А., Тоцкий Е. Е.* Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
15. *Подурец М. А.* Термодинамическая модель пористого тела // *Мат. моделирование.* 1996. Т. 8, № 2. С. 29–36.
16. *Kim H.* Floating Phenomenon of a Water Drop on the Surface of Liquid Nitrogen // *J. Kor. Phys. Soc.* 2006. V. 49.
17. *Сычев В. В., Вассерман А. А., Козлов А. Д., Спиридонов Г. А., Цымарный В. А.* Термодинамические свойства азота. М.: Изд-во стандартов, 1977.
18. *Dana L. I.* The Latent Heat of Vaporization of Liquid Oxygen–Nitrogen Mixtures // *Proc. Am. Acad. Arts Sci.* 1925. P. 241–267.
19. NIST Chemistry WebBook. SRD 69. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C108678&Mask=1EFF>.
20. *Griesbaum K., Behr A., Biedenkapp D., Voges H.-W., Garbe D., Paetz Ch., Collin G., Mayer D., Höke H.* Hydrocarbons. 2000. https://doi.org/10.1002/14356007.a13_227.
21. *Heuse W.* Molvolumen von Kohlenwasserstoffen und einigen anderen Verbindungen bei tiefer Temperatur // *Z. Phys. Chemie.* 1930. V. 147A, No. 1; doi: 10.1515/zpch-1930-14723.
22. *Easteal A. J., Woolf L. A.* Freezing Pressures, p , V , T , and Self-Diffusion Data at 298 and 313 K and Pressures up to 300 MPa for 1,3,5-Trimethylbenzene // *Int. J. Therneophys.* 1987. V. 8, No. 1. P. 71–79; doi: 10.1007/bf00503225.

Получено 4 декабря 2024 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 23.12.2024.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,31. Тираж 105 экз. Заказ № 61010.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/