

Всероссийское СМИ

«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации ЭЛ №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: akademnova.ru

e-mail: akademnova@mail.ru

Крюков А.П., Пузина Ю.Ю. Стационарное положение границы раздела фаз гелий-II – пар в канале с пористой засыпкой // Материалы по итогам III-ей Всероссийской научно-практической конференции «Вопросы современных научных исследований: технические науки и физико-математические науки». – г. Анапа - 20 – 30 мая 2021 г. – 0,3 п. л. – URL: http://akademnova.ru/publications_on_the_results_of_the_conferences

СЕКЦИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Крюков Алексей Павлович,

д.т.н., профессор,

Пузина Юлия Юрьевна,

к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

г. Москва, Российская Федерация

СТАЦИОНАРНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ФАЗ ГЕЛИЙ-II – ПАР В КАНАЛЕ С ПОРИСТОЙ ЗАСЫПКОЙ

В настоящее время наблюдается существенный рост интереса к капиллярной гидродинамике и теплообмену в микросистемах, который вызван бурным развитием электроники и медицины, а также миниатюризацией устройств в различных областях техники, например в аэрокосмической индустрии, транспорте и энергетике. Для охлаждения микроэлектронного оборудования используются и разрабатываются миниатюрные тепловые трубы, микро- и мини-каналы с однофазным и двухфазным течениями, а также системы с микро-струями.

Решение фундаментальных проблем, связанных с процессами переноса через межфазную поверхность, упрощается в случае, если термическое сопротивление массива жидкости, окружающего паровую полость (пузырь или паровую пленку), настолько мало, что им можно пренебречь. Поэтому для

дальнейшего исследования анализируется задача, связанная с межфазной границей He-II (сверхтекучий гелий) – пар.

Ранее были рассмотрены различные постановки задачи для исследования движения перемычки жидкости в канале с паром при наличии продольного теплового потока. Обычная жидкость движется от нагревателя при любых условиях, и скорость движения жидкости зависит от теплофизических свойств жидкости [1]. Особенности процессов тепломассообмена в сверхтекучем гелии приводят к качественному изменению характера движения жидкости при движении в капилляре [2]. Перемычка гелия-II движется от нагревателя как обычная жидкость, когда длина капилляра меньше определенной величины (реверсивной). Но когда длина капилляра больше реверсивной величины, гелий-II перемещается к нагревателю при приложении тепловой нагрузки. Следует отметить, что длина, при которой стационарная скорость движения жидкой перемычки равна нулю (реверсивная), слабо зависит от теплового потока в условиях ламинарного нормального и безвихревого сверхтекучего движений. Для других режимов течения [3] движение к нагревателю возможно при выполнении определенных условий, связанных как с длиной перемычки, так и с величиной плотности теплового потока. Очевидно, что соответствующие процессы требуют наличия области пара вблизи нагревателя и отделения жидкости от непосредственного контакта с нагревателем, чтобы было место для рассматриваемого обратного потока. Этот обратимый режим не наблюдается для обычных жидкостей.

Такие типы течений были подтверждены экспериментально в капилляре диаметром 250 мкм [4]. Реверсивное значение длины составляет около 3,5 м для такого капилляра в экспериментальных условиях. Показано, что в

капилляре длиной 8 м при температурах ванны 1,3-2,0 К перемычка гелия-II движется к нагревателю. В капилляре длиной 8 см при тех же условиях перемычка гелия-II движется от нагревателя. Эксперименты с жидким азотом показали, что жидкость движется от нагревателя для обоих капилляров, а паровая пробка увеличивается в размерах. Таким образом, поведение рассматриваемого фрагмента гелия-II в капилляре и соответствующие процессы теплообмена в жидкости и паре могут быть описаны математической моделью, представленной в работе [2]. Интересно, что в некоторых случаях эксперименты показывают колебательный режим динамики мениска в капилляре.

Математическая модель стационарных процессов теплообмена при течении гелия-II в канале была рассмотрена позднее [5], где для создания замкнутых условий вместо капиллярного канала используется пористая структура. В этом случае также возможно течение жидкости к нагревателю, но реверсивная длина – это длина части канала, заполненного пористым материалом. Реверсивная длина пористой вставки не зависит от теплового потока при ламинарном течении нормальной составляющей. Она зависит от пористости и проницаемости пористого материала и теплофизических свойств жидкости при данной температуре. Для турбулентного движения нормальной компоненты используются результаты работы [6]. Установлено, что в этом случае обратимая длина пористой вставки зависит от теплового потока, обусловленного противотоком нормальной и сверхтекучего компонентов. Реверсивная длина пористой пробки значительно меньше аналогичного значения для капилляров (несколько миллиметров вместо нескольких метров). Была проанализирована пористая структура в виде монодисперсных шариков. Диаметр монодисперсных сфер составлял несколько десятков микрон.

Однако при такой засыпке в эксперименте можно использовать любой размер канала, так как обратимая длина для пористой структуры не зависит от диаметра канала [5]. В связи с вышеизложенным для экспериментальных исследований процессов теплообмена при протекании сверхтекучего гелия в замкнутых условиях была выбрана монодисперсная засыпка, расположенная внутри канала.

Следует отметить, что помимо упомянутой работы [5] существуют также экспериментальные исследования, посвященные определению восстановительного теплового потока для проволоки, расположенной внутри пористой оболочки, как с зазором, так и без него [7]. Математическое описание для этого случая может быть сформулировано на основе модели [8] с учетом процессов теплопереноса внутри пор, как и в работе [5].

Цель работы – интерпретация экспериментальных данных по исследованию движения гелия-II в U-образном канале, частично заполненном монодисперсной засыпкой, при подаче постоянной тепловой нагрузки.

Общая схема экспериментальной установки для исследования процессов теплообмена в сверхтекучем гелии, подготовка и методы исследования подробно представлены в работах [4, 9]. В рассматриваемом процессе экспериментальная секция представляет собой U-образную хлоркальциевую трубку ТХ-U-1-100. Нижняя часть трубки заполнена свободной засыпкой из монодисперсных шариков длиной около 2 см. Форма канала и расположение засыпки позволяет предотвратить высыпание шариков из канала без дополнительных ограничительных пластин. Шарик изготовлен из сплава Pb96%Sb4% по технологии [10] и имеет диаметр (280 ± 5) мкм. Нагреватель представляет собой спираль из нихромовой проволоки диаметром 50 мкм. Эта спираль помещается на поверхность

медного диска диаметром 5 мм, который вставляется в заглушку из пеноплекса. Пеноплекс – материал, применяемый для теплоизоляции, отличается высокой плотностью, за счет чего лучше переносит механические нагрузки, обладает низкой паро-проницаемостью и хорошими теплотехническими характеристиками. Из пеноплекса вырезана теплоизоляция специальной формы, учитывающая пластмассовый ограничитель, в котором проделано отверстие под крепёж. Слои теплоизоляции прижимаются друг к другу, и с помощью шприца с иглой внутрь заливается эпоксидный клей. С помощью гайки ячейка фиксируется на штоке.

Заглушка вставляется в верхнюю конец одного колена U-образной трубки. Герметизирующий (эпоксидный) клей используется для предотвращения утечек сверхтекучего гелия. Эпоксидный клей является одним из популярных видов клея, что обусловлено его универсальными эксплуатационными качествами, безопасностью и доступностью. В состав входит отвердитель и смола, которые после смешивания со временем затвердевают. После затвердевания он не сжимается и не увеличивается в объеме. Эпоксидный клей заливался изнутри канала, с помощью шприца. Капилляр, по которому клей заливался из шприца в нагреватель, изолировался и имел пластиковые направляющие кольца. Такое конструктивное решение позволило понизить трение между капилляром и хлоркальциевой трубкой и с высокой точностью заполнить пространство клеем вокруг нагревателя без зазоров и излишков клея.

Схема экспериментальной ячейки приведена на рис. 1.

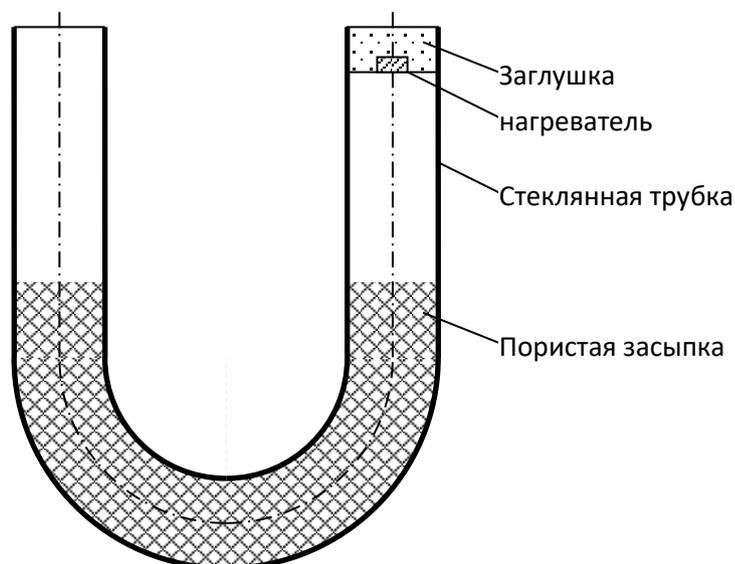


Рисунок 1. Схема экспериментальной ячейки

Экспериментальный участок в процессе проведения опытов полностью погружается в объем сверхтекучего гелия. При подаче тепловой нагрузки в канале образуется паровая пробка, которая затем увеличивается в размерах. Пройдя некоторое расстояние от нагревателя, межфазная поверхность, останавливается и начинает перемещаться к нагревателю. Не достигнув его, межфазная поверхность опять останавливается и начинает движение от нагревателя. Таким образом, реализуется постоянное колебательное движение сверхтекучего гелия в канале с монодисперсной засыпкой [11].

Во время проведения эксперимента производилась видеофиксация движения мениска в экспериментальной ячейке. На основе видеозаписи была произведена раскадровка и определена зависимость положения границы раздела фаз пар – гелий-II от времени. Мениск на видеозаписи можно было обнаружить благодаря эффекту преломления света в динамическом режиме. По результатам обработки кадров можно сделать предварительные оценки.

Амплитуда колебаний составляет ~ 15 мм, а частота колебаний $\sim 0,2$ Гц. Следует отметить, что данные колебания не всегда являются периодическими, они также могут иметь вид аperiodических затухающих колебаний с выходом на стационарное положение межфазной поверхности при неизменном тепловом потоке (рис. 2).

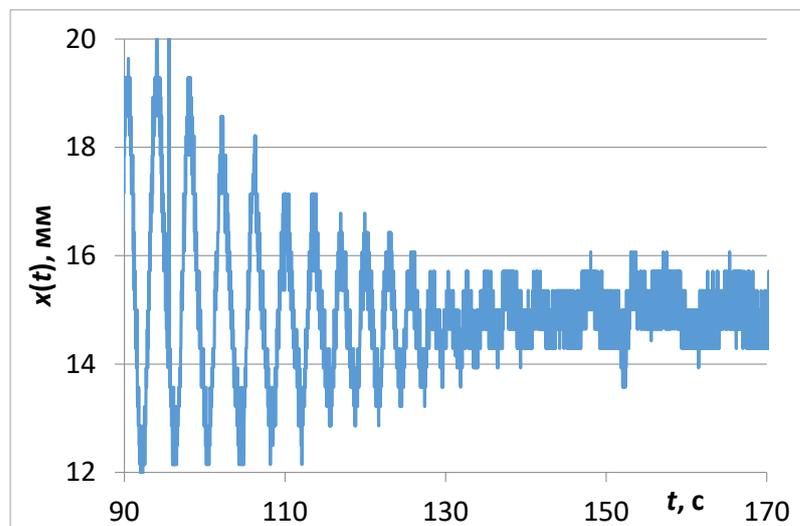


Рисунок 2. Экспериментальные данные

На основании этого экспериментального результата формулируется математическое описание процессов переноса при стационарном положении паровой пробки в U-образном канале с монодисперсной засыпкой при наличии продольного теплового потока. Используя подходы механики сплошных сред и молекулярно-кинетической теории, записывается система уравнений с учетом неравновесных эффектов вблизи межфазной поверхности, теплопередачи в жидкости и в паре и особенностей движения сверхтекучего гелия в пористой монодисперсной засыпке.

Рассматривается стационарная задача о процессах тепломассопереноса в сверхтекучем гелии, который заполняет U-образный канал с внутренним диаметром d_k , в одном колене которого располагается нагреватель (рис. 3).

Нижняя часть канала заполнена на длине L хаотической монодисперсной засыпкой диаметром d и пористостью m . При подаче тепловой нагрузки q_w на нагреватель около него образуется пар и в результате процессов тепломассопереноса межфазная поверхность достигает стационарного положения x_1 (За нулевую отметку принята поверхность нагревателя). Весь канал располагается в объеме сверхтекучего гелия на определенной глубине h_w от свободной поверхности жидкости до поверхности нагревателя. Над свободной поверхностью жидкости поддерживается постоянное давление пара P_b , при этом считается, что жидкость находится в равновесии со свободным объемом, так, что давление насыщения $P_s(T_b) = P_b$. Задача расчета состоит в определении расстояния от нагревателя до межфазной поверхности в стационарном состоянии.

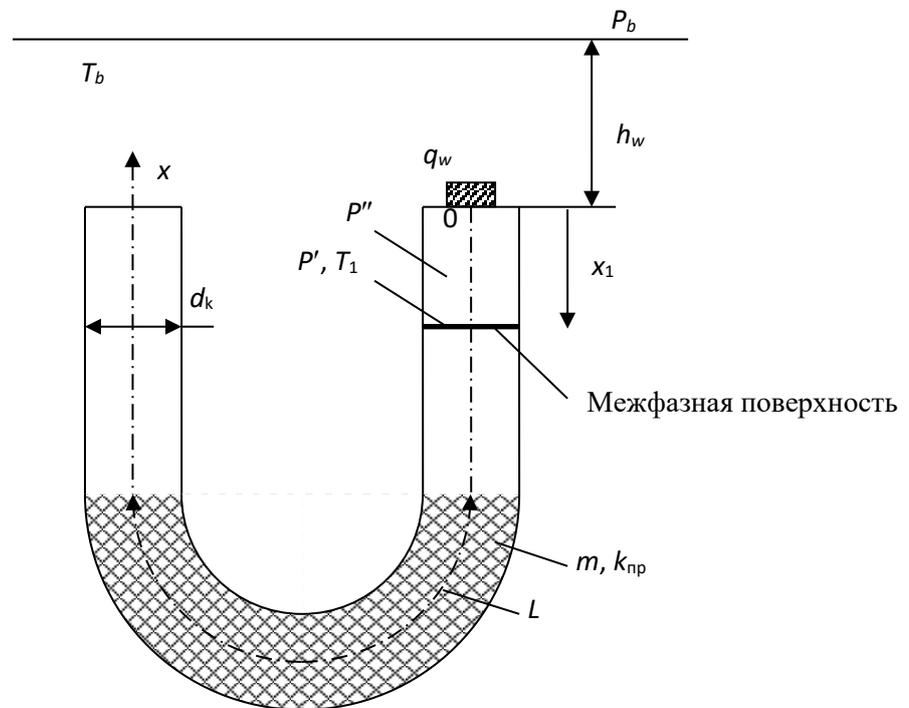


Рисунок 3. Постановка задачи

В рамках подхода механики сплошных сред (МСС) предполагается, что жидкость несжимаемая, пар представляет собой идеальный газ, коэффициент конденсации на проницаемой межфазной поверхности равен единице, коэффициент энергетической аккомодации на поверхности нагревателя равен единице, теплоперенос в паре осуществляется теплопроводностью, задача одномерная в криволинейной системе координат. Форма межфазной поверхности представляет собой плоскость (это допущение основано на экспериментальных наблюдениях).

Давление пара P'' определяется на основании уравнения, полученного при решении кинетического уравнения Больцмана (КУБ) моментным методом для задач испарения-конденсации в линейной постановке [12] при условии равенства нулю потока массы с межфазной поверхности, что оправдано в стационарной постановке задачи:

$$P'' = P_S(T_1) + 0,44 \frac{q_w}{\sqrt{2R''T_1}}, \quad (1)$$

где T_1 – температура межфазной поверхности, R – индивидуальная газовая постоянная для гелия.

На границе раздела фаз также записывается условие совместности для нормальной компоненты тензора плотности потока импульса. На основании анализа видеофрагментов, снятых во время эксперимента, можно принять форму межфазной поверхности как плоскость, тогда кривизна поверхности равна нулю. В связи с особенностью представления выражений для компонентов тензора плотности потока импульса в сверхтекучем гелии [13], обусловленной наличием двух движений – нормального и сверхтекучего, вид

граничного условия на межфазной поверхности меняется по сравнению с записью для обычных жидкостей. Таким образом оказывается, что даже если жидкость стоит, нормальная компонента двигается, если есть тепловой поток:

$$P'' - \left(P' - 2\mu' \frac{\partial u_{n1}}{\partial x} \right) - \rho_n \left[1 + \frac{\rho_n}{\rho_s} \right] [u_{n1}]^2 = 0, \quad (2)$$

где μ' – динамическая вязкость жидкости, ρ_n – плотность нормального компонента, ρ_s – плотность сверхтекучего компонента, u_{n1} – скорость нормального движения на границе раздела фаз.

В первом приближении пренебрежем разностью температур по жидкости в правом колене канала, в левом колене канала и в свободном объеме, то есть учитывается, только перепад температур вдоль пористой засыпки, который равен $(T_1 - T_b)$. В дальнейшем при описании теплопередачи в пространстве гелия можно использовать стационарное уравнение теплопереноса на основе полуэмпирической теории Гортера-Меллинка.

Для получения замкнутого решения необходимо учитывать тепломассоперенос при течении гелия-II в пористой структуре. Особенностью сверхтекучего гелия является связь теплового потока $q(x)$ со скоростью движения нормальной компоненты $u_n(x)$, что следует из уравнений двухскоростной гидродинамики Л. Д. Ландау. Выражение с учетом нулевой скорости движения жидкости в целом ($u = 0$) приведено для рассматриваемых условий в [3]:

$$q(x) = \rho' S T' \cdot u_n(x), \quad (3)$$

где S – энтропия жидкости, Дж/(кг·К), ρ' – плотность жидкости.

Примем постоянство теплового потока по длине канала:

$$q(x) = q_w, \quad (4)$$

тогда на основании (3) скорость $u(x)$ также остается примерно постоянной с учетом малости располагаемой разности температур и $\frac{\partial u_n}{\partial x} = 0$. В дальнейшем изменение $u_n(x)$ с изменением температуры тоже предстоит учесть.

Соотношение между разностью температур ($T_1 - T_b$) и разностью давлений ΔP на концах участка канала, заполненного пористой средой, получено из уравнений двухскоростной гидродинамики и представлено в [3]:

$$\Delta P = \rho' S (T_1 - T_b). \quad (5)$$

Кроме этого гидравлическое сопротивление пористой засыпки зависит от структурных и механических характеристик материала. Для описания ламинарного течения нормальной компоненты в каналах пористой структуры используется традиционное одночленное уравнение фильтрации для ламинарного режима [6], связывающее градиент давления и скорость фильтрации:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu' u_n m}{k_{FP}}, \quad (6)$$

где $k_{пр}$ – коэффициент проницаемости пористой структуры, который, исходя из характера засыпки, можно определить через размер монодисперсных шаров

$$[14]: k_{пр} = C_0 \frac{m^3}{(1-m)^2} d^2, \text{ где } C_0 = 5.97 \cdot 10^{-3}.$$

Давление в жидкости вблизи межфазной поверхности складывается из гидростатической разности и гидравлического сопротивления пористой оболочки:

$$P' = P_b + \rho'g(h_w + x_1) + \Delta P, \quad (7)$$

где g – ускорение свободного падения.

В результате преобразования уравнений (1) – (7), можно получить систему уравнений относительно температуры T_1 и стационарного положения межфазной поверхности x_1 , которая легко решается при известной зависимости давления насыщения от температуры:

$$\rho'g(h_w + x_1) = P_S(T_1) + \frac{0,44q_w}{\sqrt{2RT_1}} - P_b - \rho'S(T_1 - T_b) - \rho_n \left[1 + \frac{\rho_n}{\rho_s} \right] \left[\frac{q_w}{\rho'ST_1} \right]^2, \quad (8)$$

$$T_1 = T_b + \frac{\mu'm}{k_{пр}} \frac{q_w}{(\rho'S)^2 T_b} L. \quad (9)$$

Исходные параметры, соответствующие эксперименту [11], и результаты расчета по уравнениям (8)–(9) показаны в таблице 1. Теплофизические свойства сверхтекучего гелия представлены в справочной литературе [15].

Таблица 1

T_b , К	1,87
P_b , Па	2110
L , м	0.02
h_w , м	0,1
q_w , Вт/м ²	$4 \cdot 10^4$
$T_1 - T_b$, К	$3.671 \cdot 10^{-4}$
x_1 , м	0.0132

Таким образом, расхождение между экспериментальным значением размера паровой области – около 15 мм (см. рис. 2) и расчетным – 13,2 мм (см. табл.1) составляет около 12%.

Дальнейшее усовершенствование полученного результата связано с накоплением экспериментальной базы и прецизионным определением стационарного положения межфазной поверхности, а также с анализом факторов влияния на процессы тепломассопереноса при течении сверхтекучего гелия в каналах пористой структуры.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект №19-19-00321).

Список использованной литературы:

1. Крюков А.П. Движение жидкости в канале с паром при наличии продольного теплового потока // Теплофизика высоких температур. 2000. Т. 38. № 6. С. 945–949.
2. Королев П.В., Крюков А.П. Движение сверхтекучего гелия в капилляре с паром при наличии продольного теплового потока // Вестник МЭИ. 2002. № 1. С. 43–46.
3. Голованов И.Н., Королев П.В., Пузина Ю.Ю. Эксперименты по движению сверхтекучего гелия в капилляре применительно к планируемым исследованиям на Международной Космической Станции // Вопросы электромеханики: Труды НПП ВНИИЭМ. 2010. Т. 119. № 6. С. 49–56.

Всероссийское СМИ

«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации Эл №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: akademnova.ru

e-mail: akademnova@mail.ru

4. Королев П.В., Крюков А.П., Медников А.Ф. Экспериментальное исследование движения гелия-II в капилляре при наличии паровой полости вблизи нагревателя // Вестник МЭИ. 2006. № 4. С. 27—33.
5. Пузина Ю.Ю., Королев П.В., Крюков А.П. Течение гелия-II в канале с пористой вставкой при безвихревом сверхтекучем движении // Вестник МЭИ, 2017. №4. С. 8–14.
6. Vanderlaan M.H., Van Sciver S.W. He II Heat Transfer Through Random Package Spheres: Pressure Drop // Cryogenics. 2014. V. 63. Pp. 37–42.
7. R. Wang. Peak and recovery heat flux densities in bath of superfluid helium // Cryogenics, 1994, V.34, N. 12, P. 983–990.
8. Kryukov A. P. and S. W. Van Sciver Calculation of the recovery heat flux film boiling in superfluid helium. // Cryogenics, 1981. V.21, N.9. P. 525–528.
9. А.П. Крюков, П.В. Королев, Ю.Ю. Пузина. Влияние проницаемости пористой оболочки на толщину паровой плёнки при кипении сверхтекучего гелия в невесомости // Прикладная механика и техническая физика, 2015. №4. С.121–132.
10. Ankudinov V. B., Marukhin Yu. A., Ogorodnikov V. P., Ryzhkov V. A. Technology for Production of Monodisperse Spherical Granules. // Metallurgist 2019, Volume 63, Issue 5–6, pp 651–657.
11. Korolyov P.V., Kryukov A.P., Puzina Yu.Yu., Yachevsky I.A. Experiments of superfluid helium flow in a channel with a monodisperse backfill // Journal of Physics: Conf. Series 1683 (2020) 022017
12. Муратова Т.М., Лабунцов Д.А. Кинетический анализ процессов испарения и конденсации. // ТВТ. 1969. Т. 7. № 5. С. 959–967.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Сер. Теоретическая физика. Т.6 // М.: Физматлит, 2001. – 736 с.
14. Витков Г.А., Холпанов Л.П., Шерстнев С.Н. Гидравлическое сопротивление и теплообмен. // М.: Наука, 1994. – 288с.
15. Аметистов Е.В., Григорьев В.А. Теплообмен с He-II // М.: Энергоатомиздат, 1986, – 140с.

Опубликовано: 22.05.2021 г.

© Академия педагогических идей «Новация», 2021

© Крюков А.П., Пузина Ю.Ю., 2021