

МРНТИ 28.17.15; 28.17.23; 29.03.30

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2022.v80.i1.08>

М.С. Ходжаева, **О.Ю. Голиков**,
Д.Ю. Соколов, **Д. Ережеп***

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: darhan_13@physics.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ УНИВЕРСАЛЬНОЙ КРИОГЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В рамках данной работы представлено исследование температурного распределения на универсальной криогенной поверхности при ее охлаждении до азотных температур. Методами компьютерного моделирования, в частности методом конечных элементов, были получены температурно – временные зависимости, возникающие при охлаждении поверхности с помощью теплообменных трубок разного диаметра, находящихся внутри поверхности на равном друг от друга расстоянии. Варьированием диаметра теплообменных труб было выявлено его влияние на интенсивность охлаждения при рассмотрении объемного распространения температуры: показано, что больший диаметр теплообменной трубки приводит к более равномерному охлаждению поверхности. Кроме этого, больший диаметр отверстий приводит к более быстрому достижению температурного равновесия на всей исследуемой поверхности. При использовании 7 мм диаметра отверстий, достижение температурного равновесия достигалось спустя 70 секунд после начала охлаждения, между тем как 5 мм и 3 мм диаметры отверстий достигали температурного равновесия через 90 и 100 секунд, соответственно. Полученные результаты позволят производить более качественное охлаждение при проектировании универсальных криогенных поверхностей, используя для этого теплообменные трубки с определенными геометрическими параметрами.

Ключевые слова: криогенные линии, криожидкости, метод конечных элементов, температурное распределение, теплопроводность, криогенное охлаждение.

M.S. Hodzhaeva, O.Y. Golikov, D.Y. Sokolov, D. Yerezhep*

Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: darhan_13@physics.kz

Research of the temperature dynamics change of a universal cryogenic surface using the finite element method

This paper presents a study of the temperature distribution on a universal cryogenic surface when it is cooled to nitrogen temperatures. Using computer simulation methods, in particular the finite element method, it was possible to determine the temperature-time dependences that occur during the cooling of a surface using the heat exchange tubes of different diameters located inside the surface at equal distances from each other. By varying the diameter of the heat exchange tubes, its effect on the cooling intensity was revealed when examining the volumetric temperature distribution: a larger diameter of the heat exchange tube yields a more uniform cooling of the surface. Besides, a larger orifice diameter leads to reaching thermal equilibrium quicker over the entire surface examined. By using a 7 mm orifice diameter, thermal equilibrium was reached 70 seconds after the start of cooling while 5 mm and 3 mm orifice diameters reached temperature equilibrium after 90 and 100 seconds respectively. The results obtained will make it possible to produce cooling of higher quality when designing universal cryogenic surfaces by using heat exchange tubes with certain geometric parameters.

Key words: cryogenic lines, cryo-liquids, finite element method, temperature distribution, thermal conductivity, cryogenic cooling.

М.С. Ходжаева, О.Ю. Голиков, Д.Ю. Соколов, Д. Ережеп*

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: darhan_13@physics.kz

Ақырлы элементтер әдісін қолдана отырып, әмбебап криогендік беттің температурасының өзгеру динамикасын зерттеу

Бұл ұсынылған жұмыс аясында азот температурасына дейін салқындаған кезде әмбебап криогендік бетке температураның таралуын зерттеу нәтижелері келтірілген. Компьютерлік модельдеу әдістері, атап айтқанда, соңғы элементтер әдісімен, беттің ішінде бір-бірінен тең қашықтықта орналасқан әр түрлі диаметрі жылу алмастырғыш түтіктердің көмегімен бетті салқындату кезінде пайда болатын температура мен уақыт тәуелділіктері алынды. Жылу алмасу құбырларының диаметрінің өзгеруі температураның көлемді таралуын қарастырған кезде оның салқындату қарқындылығына әсерін анықтады: яғни жылу алмасу түтігінің үлкен диаметрі бетінің біркелкі салқындауына әкелетіні анықталды. Сонымен қатар, тесіктердің үлкен диаметрі бүкіл зерттелетін бетте температура тепе-теңдігіне тез қол жеткізуге әкеледі. 7 мм тесік диаметрін қолданған кезде температура тепе-теңдігіне салқындату басталғаннан кейін 70 секундтан кейін қол жеткізілді, ал 5 мм және 3 мм тесік диаметрі сәйкесінше 90 және 100 секундтан кейін температура тепе-теңдігіне жетті. Алынған нәтижелер белгілі бір геометриялық параметрлері бар жылу алмасу түтіктерін қолдана отырып, әмбебап криогендік беттерді жобалау кезінде жақсы салқындатуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: криогендік сызықтар, крио сұйықтықтары, соңғы элемент әдісі, температураның таралуы, жылу өткізгіштік, криогендік салқындату.

Введение

Охлаждение криогенной линии – это процесс охлаждения линии перекачки криогенных жидкостей, который реализуется от комнатной температуры до криогенной температуры ($T \sim 77$ К). Данный процесс привлекает все большее внимание, так как криогенные жидкости играют все более важную роль в современных отраслях промышленности и академических областях [1–7]. Если рассматривать процесс охлаждения криогенной линии, то во время данного процесса неизбежно образуется большое количество газа, и это часто сопровождается феноменом скачка давления, что может нанести большой ущерб системе. Следовательно, он становится неотъемлемой частью управления криогенной жидкостью, что является критическим предварительным условием для обеспечения устойчивой и безопасной рабочей среды для криогенной системы. Одна из самых больших проблем, при охлаждении криогенной линии, понимание переходных характеристик теплопередачи и умение спрогнозировать процесс охлаждения [8–10].

Необходимо отметить, что при процессе охлаждения в испытательную секцию не добавляется внешний нагрев, но допускается снижение температуры. Как наблюдали авторы в работе [11] и их данные испытаний показывают, что криогенная жидкость во время охлаждения линии сталкивается с тремя режимами кипения:

плёночным, переходным и пузырьковым кипением. Было проведено большое количество исследований теплопередачи при кипении обычных жидкостей, таких как вода, FC-72 и R-113 [12–16]. Например, авторы в работе [17], исследовали переход структуры потока в восходящем мигающем потоке с помощью датчиков с проволочной сеткой и предоставили зависящее от времени особое распределение пара/воды внутри трубы. В работе [17], авторы использовали метод измерения скорости движения частиц с временным разрешением (PTV) для исследования турбулентного переохлажденного кипящего потока хладагента HFE-301 (гидрофторэфира) через вертикальный прямоугольный канал. Так в работе [18], были проанализированы экспериментальные данные о тепловом потоке на основе измеренной температуры стенки в горизонтальной трубе. Так же они показали переход режима кипения в процесс охлаждения, анализируя данные теплового потока и визуализируя его картины. В 2012 году аналогичное исследование было проведено в работе [19] в вертикальной трубе. В данной работе была проведена визуализация структуры потока, выведена история теплового потока и предположено влияние направлений потока: нисходящего и восходящего потоков на характеристики теплопередачи. В 2015 Дж. Джонсон и С. Шайн [20] провели эксперименты по охлаждению линии жидкого азота (LN_2) в горизонтальных и наклон-

ных трубах. Было исследовано влияние длины трубы и потока массы на время охлаждения и тепловой поток. В работе [20] было показано, что при более высоком массовом потоке переход от пленочного кипения к пузырьковому кипению происходил при более высокой температуре стенки, что указывает на более быстрое заполнение стенки пленкой жидкости. Более низкое время охлаждения, преобладающее для линии с наклоном 10° , предполагает, что существует оптимальный наклон линии, ускоряющий процесс охлаждения. В этом же году Д. Дарр и др. [21] провели линейные эксперименты по охлаждению с помощью LN_2 в вертикальной трубе длиной примерно 0,5 м и смоделировали процесс охлаждения с помощью одномерной однородной модели. Позже, группа авторов в работе [22] усовершенствовала корреляции КТ пленочного кипения с учетом направлений потоков. Далее, в работе [23] предоставили много значимых исследований криогенного охлаждения линий. Были определены тенденции коэффициента теплопередачи для каждого режима кипения и критическим тепловым потоком с потоком массы, давлением, переохлаждением на входе, равновесным качеством и осевым расположением, также они показали, что основной влияющей переменной во всех случаях является поток массы. Однако применимость предложенных корреляций требует изучения, особенно при протекании криожидкости в трубе. Таким образом, дальнейшие исследования по охлаждению криогенной линии были сосредоточены на расширении базы данных по охлаждению, выявлению влияния различных параметров и разработке новых корреляций для различных режимов теплопередачи с целью более точного описания процесса охлаждения.

Экспериментальное исследование протекания криожидкости в трубе для охлаждения криоповерхности – дорогой и трудоемкий процесс, поэтому во многих научных направлениях принято применять моделирование для получения эффективной криоповерхности [24–26]. Многие исследователи сосредоточены на проблемах нестационарного сопряженного теплопереноса на границе твердое тело – поток, вследствие чего было разработано множество численных методов [27–31]. Например, в работе [29] предложили

простой и разностный метод для решетчатого алгоритма Больцмана при решении проблемы сопряженной теплопередачи между двумя различными средами, который успешно гарантировал непрерывность теплового потока на границе раздела с помощью улучшенной функции распределения. Используя метод конечных разностей, в работе [22] было численно исследована переходная сопряженная теплопередача развивающегося ламинарного потока в круглом микроканале и толстостенной полубесконечной трубе. Однако было выявлено, что из-за особенностей поля течения и температурного поля, которое включает в себя интенсивные ударные волны, большие переменные градиенты (в частности, температуру, варьирующуюся от 160 К до 1100К) и широкий диапазон чисел Маха (включая дозвуковые и сверхзвуковые потоки, варьирующийся от 0 м/с до примерно 600 м/с), проблема для вышеуказанных алгоритмов основанных на чистом давлении, либо алгоритмов основанных на чистой плотности при решении нестационарной сопряженной теплопередачи имеет ряд неточностей [31]. Кроме того, чтобы повысить эффективность численных вычислений, квазистационарный подход обычно используется в практическом моделировании нестационарного сопряженного теплопереноса, особенно для потоков с преобладанием конвекции или потоков с высоким числом Маха. В данной работе, будет использован метод конечных элементов для моделирования процесса сопряженной теплопередачи между твердым телом и потоком криожидкости для анализа поверхности в температурном диапазоне от 80К до 300К.

Эксперимент, методика и материалы

Для решения вычислительного эксперимента по моделированию технологии универсальной криогенной поверхности (УКП) был использован программный комплекс COMSOL Multiphysic. Основой вычислительного эксперимента является описание нестационарного процесса переноса тепла от объекта УКП в условии вынужденного переноса теплоты с помощью метода конечных элементов (FEM). Эскиз универсальной криогенной поверхности представлен на рисунке 1.

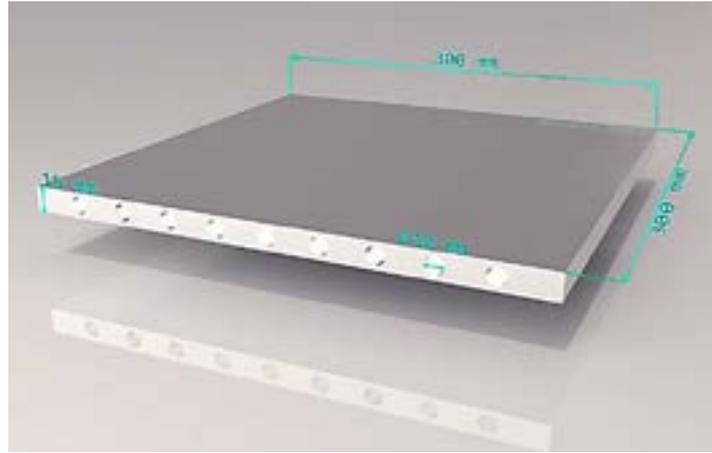


Рисунок 1 – Эскиз универсальной криогенной поверхности

Отвод теплоты с поверхности объекта УКП обеспечивается конвекцией потока движения газообразного теплоносителя и описывается посредством общего уравнения теплопроводности и уравнением Навье-Стокса. Общее уравнение теплопроводности для твердого тела:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q, \quad (1)$$

где ρ – плотность, C_p – удельная теплоемкость, Q – источник тепла, \mathbf{q} – вектор теплового потока.

Общее уравнение теплопроводности для жидкости (в LN₂):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla T + (\nabla \cdot \mathbf{q}) = Q, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости; C_p – удельная теплоемкость жидкости; T – температура; \mathbf{u} – вектор скорости; \mathbf{q} – тепловой поток; Q – источники тепла.

Плотность теплового потока:

$$\mathbf{q} = -\kappa \cdot \nabla T, \quad (3)$$

где κ – коэффициент теплопроводности.

Поток жидкости в модели описывается следующими уравнениями:

$$\frac{\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (4)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}] + \mathbf{F}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho C_p \cdot \left(\frac{dT}{dt} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)T \right) = \\ = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau} : \mathbf{S} - \frac{T}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)p + Q, \end{aligned} \quad (6)$$

где ρ – плотность, \mathbf{u} – вектор скорости, p – давление, $\boldsymbol{\tau}$ – тензор вязкого напряжения, \mathbf{F} – вектор объемной силы, C_p – удельная теплоемкость, T – температура, \mathbf{q} – вектор теплового потока, Q содержит источники тепла, \mathbf{S} – тензор скорости деформации (уравнение (7)):

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right), \quad (7)$$

Уравнение (4) называется уравнением неразрывности или сплошности потока, оно представляет собой алгебраическую запись схожую с уравнением сохранения массы. Уравнение (5) – векторное уравнение, которое представляет сохранение импульса. Уравнение (6) описывает сохранение энергии, сформулированное в температуре. Чтобы закрыть систему уравнений, уравнение (5) через уравнение (6), где $\boldsymbol{\tau}$ описывается с помощью уравнения (8):

$$\boldsymbol{\tau} = 2\mu \mathbf{S} - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}, \quad (8)$$

где μ – динамическая вязкость.

Возможны допущения относительно того, что на границе газовой среды и объекта УКП нет вязкостного взаимодействия. Математически данное решение может быть сформулировано в виде уравнения 9 и 10:

$$u \cdot n = 0, \quad (9)$$

$$\left(-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)\right) \cdot n = 0. \quad (10)$$

Как видим, выражения (9) и (10) эквивалентны выражениям (11) и (13):

$$u \cdot n = 0, \quad (11)$$

$$K - (K \cdot n) \cdot n = 0, \quad (12)$$

$$\mu(\nabla u + (\nabla u)^T) \cdot n = K. \quad (13)$$

где K – множители Лагранжа, нужны для граничного условия. Видно, что в уравнениях нет никакого потока через границу и нет вязкого напряжения в тангенциальном направлении. Численные значения свойств материалов были взяты из библиотеки материалов Comsol Multiphysics. Основные свойства теплоносителя (азота), такие как плотность (ρ), теплоемкость (C_p) и теплопроводность (κ), представлены в виде графиков зависимостей от температур на рисунке 2.

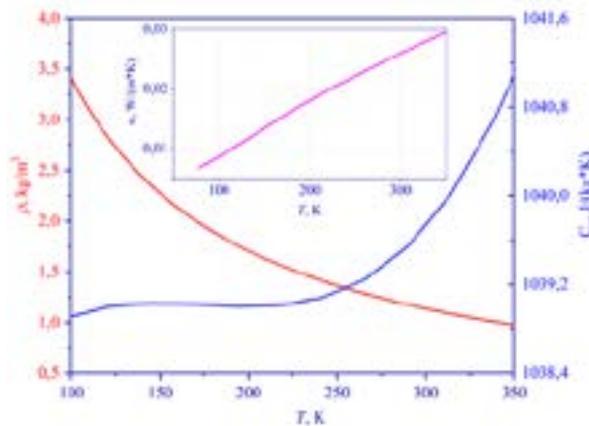


Рисунок 2 – Температурные зависимости основных свойств теплоносителя

Количество элементов варьировалось, в зависимости от геометрии модели, однако в среднем составляло около 30 500 конечных элементов, где количество вершинных элементов было 20 000, количество граничных элементов было около 10000, а минимальный размер элемента, на который разбивается зона УКП составлял

0,012 мм. Сетка формировалась автоматически благодаря возможности настройки сетки, контролируемой физикой. В случае более сложной конфигурации можно использовать пользовательские настройки сетки. Фрагмент трехмерной модели, разделенный на конечные элементы, показан на рисунке 3(а-б).

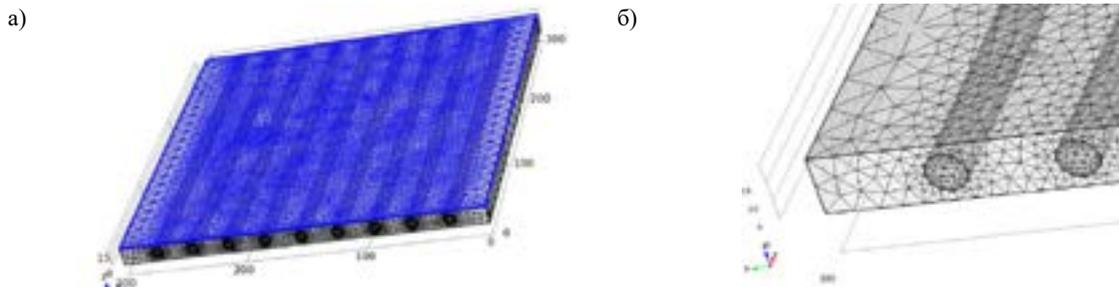


Рисунок 3 – Схематичное изображение модели криповерхности. а) общий вид сетки модели, б) увеличенный вид фрагмента сетки

Результаты и обсуждение

На рисунке 4 представлена кривая кипения, показывающая соотношение теплового потока между стенкой и жидкостью, которая определяется как температура стенки за вычетом температуры жидкости. Предполагается, что, в зависимости от типа эксперимента, может возникнуть несколько путей относительно предполагаемой кривой. Для экспериментов с установившимся состоянием кипения в твердое тело встроены нагреватели для подачи теплового потока в жидкость. Нагреватель поддерживает постоянную потребляемую мощность, а затем ее повышают до более высоких температур, чтобы получить различные точки на кривой кипения. Такой тип экспериментов для двухфазного потока по установившемуся кипению через трубу обычно называют испытаниями в нагретой трубе. Другой тип экспериментов называется охлаждением, так как криожидкость вступает в контакт с горячим твердым телом, временно его охлаждая. В эксперименте с нагревателем при увеличении мощности процесс движется по пути $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E$. В случае охлаждения процесс обычно начинается с точки E , а затем идет к точке D в режиме пленочного кипения по мере снижения температуры стенки. Точку D называют точкой Лейденфроста, что означает минимальную температуру стенки, необходимую для пленочного кипения. Для данного режима стенка должна быть настолько горячей, чтобы жидкость испарялась, не достигнув поверхности нагревателя, то есть, должен быть введен постоянный контакт нагревателя с паром. После точки Лейденфроста жидкость периодически контактирует со стенкой. Происходит, так называемое, переходное кипение, которое увеличивает теплопередачу до тех пор, пока не достигается точка C . В этой точке имеет место полный контакт с жидкостью, известный как критический тепловой поток. Температура стенки продолжает падать, пока температура стенки не достигнет температуры жидкости [23].

Однако можно заметить, что когда температура стенки падает ниже определенного значения, то возрастает вероятность контакта жидкой фазы со стенкой трубки. Так, фронт контакта жидкой фазы с твердой фазой, называемый

фронтом закалки или областью распыления, характеризуется сильным кипением. Данное явление связано со значительным снижением температуры стенки. Механизм теплопередачи в области распыления, или так называемое переходное кипение, характеризуется более высокими тепловыми потоками, чем режим теплопередачи пленочного кипения. Это объясняется установлением контакта жидкости со стенкой. После того, как фронт закалки перемещается вниз по потоку, начинает преобладать теплопередача пузырькового кипения. Надо понимать, что для вертикальных труб, режим потока может осуществляться как кольцевой, снарядный или пузырьковый потоки, в то время как для горизонтальных труб, режим потока обычно стратифицированный. При дальнейшем снижении температуры стенки стадия пузырькового кипения переходит в чистую конвекцию. Это происходит до тех пор, пока температура стенки не достигнет установившегося состояния, что означает окончание процесса охлаждения. Более подробный обзор схем течения представлен в работах [22, 31], поскольку структура потока зависит от направления потока по отношению к силе тяжести.

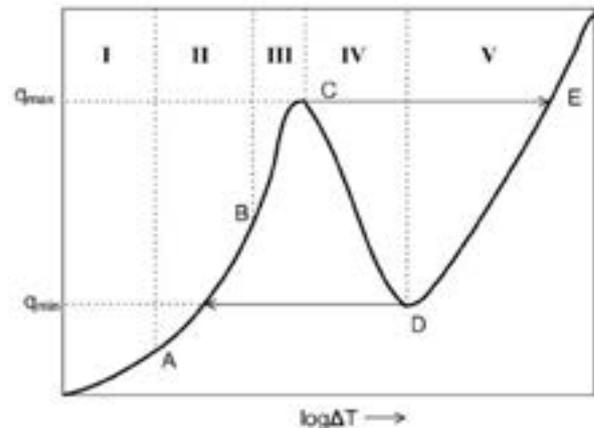


Рисунок 4 – Типичная кривая кипения [23].

На рисунке 5 показаны распределение температуры на 3D модели УКП. Можно увидеть зависимость интенсивности охлаждения криоповерхности от времени. Так, к 30-ой секунде видно, что на 90% поверхности модели УКП, температура приближается к 100 K.

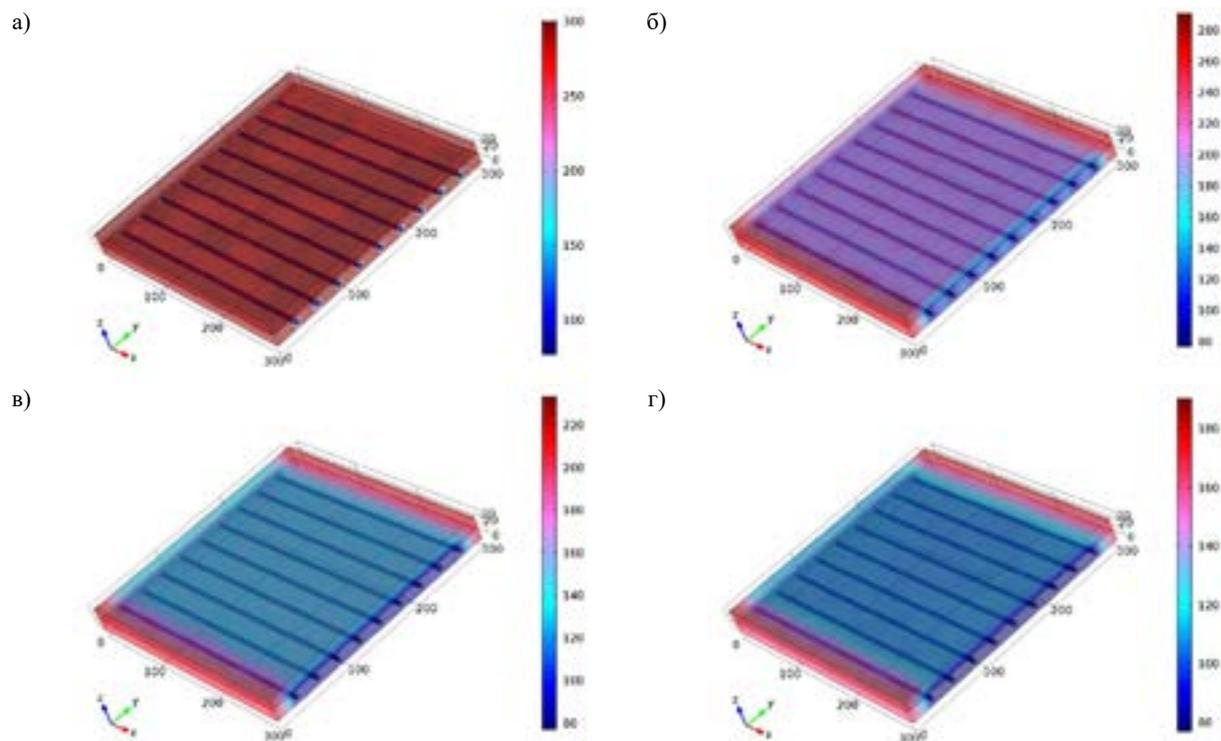


Рисунок 5 – Распределение объемной температуры в УКП по времени. а – 0 с., б – 10 с., в – 20 с., г – 30 с.

Рисунок 6а демонстрирует распределение средней температуры по площади поверхности УКП. Можем заметить, что интенсивность охлаждения имеет прямую зависимость от диаметра трубки, по которой течет жидкий азот. Однако, к 40-ой секунде средняя температура по всей площади поверхности УКП, приближается к температуре жидкого азота вне зависимости от диаметра теплообменной трубки.

На рисунке 6б представлен график распределения температуры по объему поверхности модели УКП. Видно, что при рассмотрении температуры по объему, наблюдается явное влияние размера диаметра теплообменной трубки. Более интенсивное охлаждения площади поверхности УКП достигается при диаметре теплообменной трубки в 7 мм.

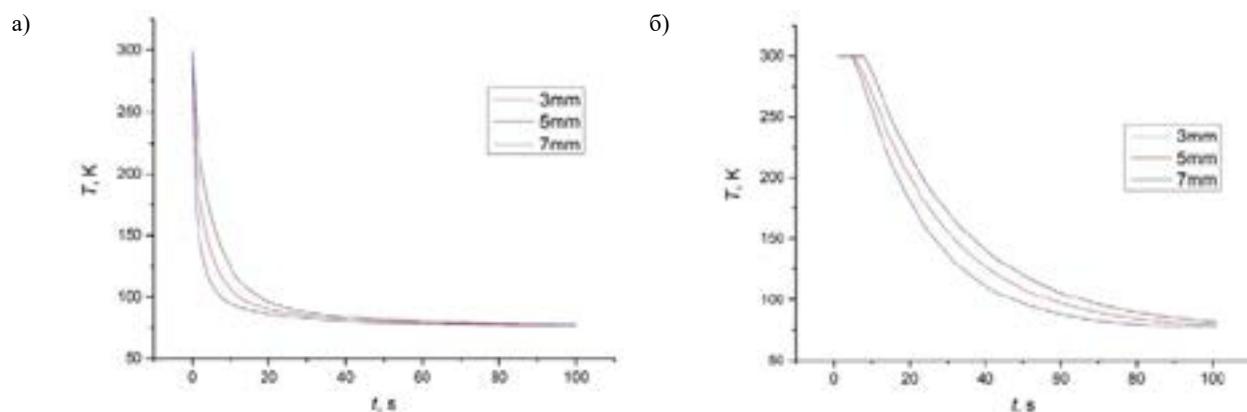


Рисунок 6 – График зависимости средней температуры от времени. а) по площади поверхности УКП, б) по объему

Заключение

Криогенное охлаждение включает в себя сложные взаимодействия передачи энергии и импульса между жидкой и газовой фазами и твердой стенкой. Понимание явления кипения, режимов потока и режимов теплопередачи обеспечивает основу для дальнейшего понимания всего динамического процесса.

В данной работе смоделирован процесс охлаждения универсальной криогенной поверхности до азотных температур. Показаны результаты распространения криогенного фронта по поверхности и по объему УКП. На основании результатов моделирования, выявлено, что универсальная криогенная поверхности достигает температурного равновесия через 70 секунд в

случае с 7 мм диаметром отверстия, по которому движется теплоноситель в виде жидкого азота. В случае 5 мм и 3 мм диаметра отверстия трубки наблюдается увеличение времени охлаждения до 90 и 100 секунд соответственно. Также показано температурное распределение по поверхности УКП в виде температурной 3D модели. Результаты данного исследования могут способствовать дальнейшему развитию криогенных технологий в данной области.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан, грант № AP08855681.

Литература

- 1 Wang B. et al. Potential applications of cryogenic technologies to plant genetic improvement and pathogen eradication // *Biotechnology advances*. – 2014. – Vol 32. – No3. – P.583-595.
- 2 Benson E. E. Cryopreservation of phytodiversity: a critical appraisal of theory & practice // *Critical reviews in Plant sciences*. – 2008. – Vol. 27. – No3. – P.141-219.
- 3 Zagarola M. V., Cragin K. J., McCormick J. A. Cryogenic heat transport using gas circulation // *Cryogenics*. – 2020. – Vol.111. – P.103172.
- 4 Popov D. et al. Cryogenic heat exchangers for process cooling and renewable energy storage: A review // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol.153. – P.275-290.
- 5 Vaghela H., Lakhera V. J., Sarkar B. Forced flow cryogenic cooling in fusion devices: A review // *Heliyon*. – 2021. – Vol. 7. – No 1. – P.e06053.
- 6 Jiang Z. et al. State-of-the-art review on properties evolution and deterioration mechanism of concrete at cryogenic temperature // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 257. – P. 119456.
- 7 Li L., Yan M. Recent progresses in exploring the rare earth based intermetallic compounds for cryogenic magnetic refrigeration // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 823. – P. 153810.
- 8 Bergant A., Simpson A. R., Tijsseling A. S. Water hammer with column separation: A historical review // *Journal of fluids and structures*. – 2006. – Vol. 22. – No. 2. – P. 135-171.
- 9 Bergant A. et al. Parameters affecting water-hammer wave attenuation, shape and timing–Part 2: Case studies // *Journal of Hydraulic Research*. – 2008. – Vol. 46. – No. 3. – P. 382-391.
- 10 Agrawal G., Sunil Kumar S., Agarwal D. K. Pressure surge during cryogenic feedline chilldown process // *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. – 2016. – Vol. 8. – No. 1.
- 11 Yuan K. et al. Cryogenic boiling and two-phase flow during pipe chilldown in earth and reduced gravity // *Journal of Low Temperature Physics*. – 2008. – Vol. 150. – No. 1. – P. 101-122.
- 12 He M. et al. Boiling heat transfer experiments under power transients for LWRs: A review study // *Progress in Nuclear Energy*. – 2021. – Vol. 141. – P. 103952.
- 13 Guggilla G. et al. Heat Transfer Characteristics of a Train of Droplets Impinging Over a Hot Surface: From Film Evaporation to Leidenfrost Point // *Journal of Heat Transfer*. – 2021. – Vol. 143. – No. 6. – P. 061602.
- 14 Franz B., Sielaff A., Stephan P. Numerical Investigation of Successively Nucleating Bubbles During Subcooled Flow Boiling of FC-72 in Microgravity // *Microgravity Science and Technology*. – 2021. – Vol. 33. – No. 2. – P. 1-16.
- 15 Dedov A. V. et al. Study of Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Enhancement on Surfaces Modified by Beam Technologies // *Heat Transfer Engineering*. – 2021. – P. 1-13.
- 16 Karademir H. et al. COMPREHENSIVE REVIEW ON THE FLOW CHARACTERISTICS OF TWO-PHASE FLOWS IN INCLINED TUBES // *Journal of Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 7. – No. 3. – P. 483-549.
- 17 Manera A. et al. Three-dimensional flow pattern visualization and bubble size distributions in stationary and transient upward flashing flow // *International journal of multiphase flow*. – 2006. – Vol. 32. – No. 8. – P. 996-1016.
- 18 Yuan K., Ji Y., Chung J. N. Cryogenic chilldown process under low flow rates // *International journal of heat and mass transfer*. – 2007. – Vol. 50. – No. 19-20. – P. 4011-4022.
- 19 Hu H., Chung J. N., Amber S. H. An experimental study on flow patterns and heat transfer characteristics during cryogenic chilldown in a vertical pipe // *Cryogenics*. – 2012. – Vol. 52. – No. 4-6. – P. 268-277.
- 20 Johnson J., Shine S. R. Transient cryogenic chill down process in horizontal and inclined pipes // *Cryogenics*. – 2015. – Vol. 71. – P. 7-17.

- 21 Darr S. R. et al. Numerical simulation of the liquid nitrogen chilldown of a vertical tube //53rd aiaa aerospace sciences meeting. – 2015. – P. 0468.
- 22 Darr S. R. et al. An experimental study on terrestrial cryogenic tube chilldown II. Effect of flow direction with respect to gravity and new correlation set //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 103. – P. 1243-1260.
- 23 Darr S. R. et al. An experimental study on terrestrial cryogenic transfer line chilldown I. Effect of mass flux, equilibrium quality, and inlet subcooling //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 103. – P. 1225-1242.
- 24 Moukalled F., Darwish M. A high-resolution pressure-based algorithm for fluid flow at all speeds //Journal of Computational Physics. – 2001. – Vol. 168. – No. 1. – P. 101-130.
- 25 Xisto C. M. et al. A hybrid pressure–density-based algorithm for the Euler equations at all Mach number regimes //International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 2012. – Vol. 70. – No. 8. – P. 961-976.
- 26 Yu L., Diasinos S., Thornber B. A fast transient solver for low-Mach number aerodynamics and aeroacoustics //Computers & Fluids. – 2021. – Vol. 214. – P. 104748.
- 27 Shih T. H. et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows //Computers & fluids. – 1995. – Vol. 24. – No. 3. – P. 227-238.
- 28 El-Amin M. F. et al. Analysis of a turbulent buoyant confined jet modeled using realizable $k-\epsilon$ model //Heat and mass transfer. – 2010. – Vol. 46. – No. 8. – P. 943-960.
- 29 Lu J. H., Lei H. Y., Dai C. S. A simple difference method for lattice Boltzmann algorithm to simulate conjugate heat transfer //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 114. – P. 268-276.
- 30 Yang J. et al. Numerical study of transient conjugate heat transfer of the cryo-supersonic air-quenching based on a Mach-weighted pressure-based method //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 134. – P. 586-599.
- 31 Darr S. et al. The effect of reduced gravity on cryogenic nitrogen boiling and pipe chilldown //npj Microgravity. – 2016. – Vol. 2. – No. 1. – P. 1-9.

References

- 1 B. Wang et al., *Biotechnology advances* 32, 583-595 (2014).
- 2 E. E. Benson, *Critical reviews in Plant sciences* 27, 141-219 (2008).
- 3 M. V. Zagarola, K. J. Cragin and J. A. McCormick, *Cryogenics* 111, 103172 (2020).
- 4 D. Popov et al., *Applied Thermal Engineering* 153, 275-290 (2019).
- 5 H. Vaghela, V. J. Lakhera and B. Sarkar, *Heliyon* 7, e06053 (2021).
- 6 Z. Jiang et al., *Construction and Building Materials* 257, 119456 (2020).
- 7 L. Li and M. Yan, *Journal of Alloys and Compounds* 823, 153810 (2020).
- 8 A. Bergant, A. R. Simpson and A. S. Tijsseling, *Journal of fluids and structures* 22, 135-171 (2006).
- 9 A. Bergant et al., *Journal of Hydraulic Research* 46, 382-391 (2008).
- 10 G. Agrawal, S. Sunil Kumar and D. K. Agarwal, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications* 8, (2016).
- 11 K. Yuan et al., *Journal of Low Temperature Physics* 150, 101-122 (2008).
- 12 M. He et al., *Progress in Nuclear Energy* 141, 103952 (2021).
- 13 G. Guggilla et al., *Journal of Heat Transfer* 143, 061602 (2021).
- 14 B. Franz, A. Sielaff and P. Stephan, *Microgravity Science and Technology* 33, 1-16 (2021).
- 15 A. V. Dedov et al., *Heat Transfer Engineering*, 1-13 (2021).
- 16 H. Karademir et al., *Journal of Thermal Engineering* 7, 483-549 (2021).
- 17 A. Manera et al., *International journal of multiphase flow* 32, 996-1016 (2006).
- 18 K. Yuan, Y. Ji and J. N. Chung, *International journal of heat and mass transfer* 50, 4011-4022 (2007).
- 19 H. Hu, J. N. Chung and S. H. Amber, *Cryogenics* 52, 268-277 (2012).
- 20 J. Johnson and S. R. Shine, *Cryogenics* 71, 7-17 (2015).
- 21 S. R. Darr et al., 53rd aiaa aerospace sciences meeting, 0468 (2015).
- 22 S. R. Darr et al., *International Journal of Heat and Mass Transfer* 103, 1243-1260 (2016).
- 23 S. R. Darr et al., *International Journal of Heat and Mass Transfer* 103, 1225-1242 (2016).
- 24 F. Moukalled and M. Darwish, *Journal of Computational Physics* 168, 101-130 (2001).
- 25 C. M. Xisto et al., *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 70, 961-976 (2012).
- 26 L. Yu, S. Diasinos and B. Thornber, *Computers & Fluids* 214, 104748 (2021).
- 27 T. H. Shih et al., *Computers & fluids* 24, 227-238 (1995).
- 28 M. F. El-Amin et al., *Heat and mass transfer* 46, 943-960 (2010).
- 29 J. H. Lu, H. Y. Lei and C. S. Dai, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 114, 268-276 (2017).
- 30 J. Yang et al., *International Journal of Heat and Mass Transfer* 134, 586-599 (2019).
- 31 S. Darr et al., *npj Microgravity* 2, 1-9 (2016).