

УДК 536.21: 536.48

Г. Г. ЖУНЬ, д-р техн. наук, проф.

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
г. Харьков.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТЕПЛОЗАЩИТЕ КРИОСОСУДА

В статье показано, что разработан теоретический метод определения времени стабилизации температурного поля в пакете ЭВТИ криососудов слоевой формы (после его заполнения жидким криоагентом) возможно использовать для быстрого решения аналогичной задачи, а также определения температурного профиля $T(\delta)$, в теплозащите промышленных криососудов с отличной формой. В результате ускоряется оценка тепловой характеристики исследуемого пакета ЭВТИ, а также выбор наиболее эффективных, из них для совершенствования криососудов.

В статті показано, що розроблений теоретичний метод визначення часу стабілізації температурного поля в пакеті ЕВТІ криососуду шарової форми (після його заповнення рідким криоагентом) можливо використати для швидкого рішення аналогічної задачі, а також визначення температурного профілю $T(\delta)$ в теплозахисті промислових криососудів з відмінною формою. В результаті прискорюється оцінка теплової характеристики досліджуваного пакету ЕВТІ, а також вибір найбільш ефективних із них для вдосконалення криососудів.

Введение

В последние десятилетия все большее применение находят криогенные температуры и криогенная техника. Необычный мир криогенных температур обладает уникальными возможностями, позволяющими установить новые физические явления, проникнуть в суть строения материи, осуществлять принципиально новые технологические процессы. Достигаются криогенные температуры в основном с помощью ожиженного азота, неона, водорода и гелия. Для применения и хранения используется значительное количество различных криоустройств, криососудов и криоекостей с теплозащитой из слоев экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), которая на калориметрах имеет самую низкую теплопроводность. Однако, на криососудах данная теплозащита (смонтированная машинным способом) оказалась в несколько раз хуже в сравнении с калориметрическими образцами.

Для ее совершенствования с целью уменьшения потерь из криососудов жидких криоагентов (ожижение которых характеризуется значительными энергозатратами) на них проводятся систематические исследования различных новых теплоизоляционных материалов, а также технологий их изолирования и вакуумирования.

Основная часть

Основной характеристикой качества любой теплоизоляции является, как известно, ее коэффициент теплопроводности. Нами впервые разработан метод определения эффективности коэффициента теплопроводности ($\lambda_{эф}$) для пакета ЭВТИ непосредственно на криососуде по температурному профилю $T(\delta)$, измеренному в его поперечном сечении (δ) медь-константановыми термопарами для установившегося стационарного теплового состояния (после заполнения жидким криоагентом), а также с использованием величины суммарного теплопритока (Q_c) при данных условиях [1].

Разработанная методика и установка для исследования кинетики охлаждения пакета ЭВТИ в процессе установления стационарного теплового состояния по изменению температурных профилей $T(\delta)$ описаны в [2, 3]. Полученные результаты в поперечном сечении слоев ЭВТИ толщиной 0,071 м, смонтированных с плотностью 35 кг/м³ на криобиологическом сосуде емкостью 35 л (после заполнения жидким азотом), представлены на рис. 1. Их анализ показывает, что охлаждение слоев ЭВТИ на криососуде происходит с

различной интенсивностью. Наиболее быстро этот процесс совершается в течение ~60 часов (зависимость $T(\delta)$ 4). Полная стабильность теплового состояния в криососуде, а также процесс испаряемости из него жидкого азота достигается через 205-210 часов. Характеризует данное стационарное тепловое состояние в пакете ЭВТИ температурный профиль $T(\delta)$ 5.

Изготовление для данных экспериментов одного криососуда с датчиками температуры в поперечном сечении его пакета ЭВТИ и исследование на нем кинетики установления стационарного теплового состояния является очень длительной (до двух месяцев) и сложной задачей.

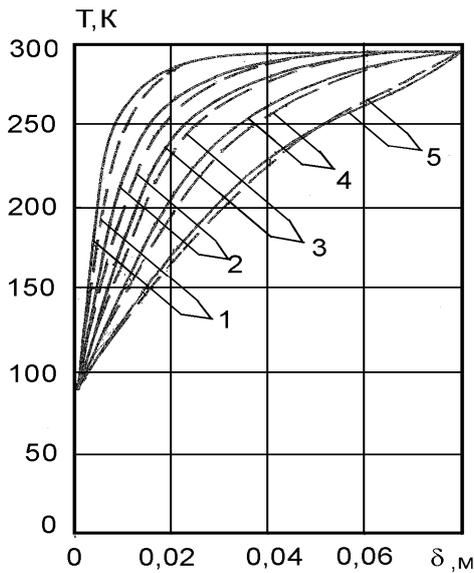


Рис. 1. Изменение распределения температуры по толщине пакета ЭВТИ при его охлаждении после заполнения криососуда жидким азотом (сплошные линии – экспериментальные результаты, пунктирные-теоретические значения):

1 – через 4 часа; 2 – 16 часов; 3 – 30 часов;
4 – 60 часов; 5 – 210 часов.

Поэтому представила интерес работа [4], в которой время охлаждения шарового криососуда с теплозащитным пакетом ЭВТИ для стационарного теплового состояния было предложено определить по изменению в нем температурного поля решением уравнения теплопроводности:

$$C(T)\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r}). \quad (1)$$

Приведена рассчитанная таким образом эволюция во времени (τ) температурных кривых $T(r)$ в поперечном сечении пакета ЭВТИ по радиусу $T(r)$ шарового криососуда. Однако, оценить качество данного расчета не представляется возможным из-за отсутствия сравнения их с экспериментальными результатами.

Предложенная методика [4] была нами исследована для возможного определения по ней также времени захолаживания криобиологического сосуда, который резко отличается от шарового, так как по его высоте пакет ЭВТИ имеет различную толщину. В нижней части, например, он имеет толщину 0,08 м, в центральной части – 0,04 м, а возле горловины – 0,21 м. среднеинтегральная толщина такого пакета ЭВТИ по всей теплозащитной поверхности в криососуде составляет 0,071 м.

Рассчитанные нами по методике [4] зависимости $T(\delta)$ для криобиологического сосуда представлены на рис. 1 для сравнения с экспериментальными данными. Их анализ показывает, что при малых временах захолаживания экспериментальные результаты имеют более высокую на 5...8 К температуру, то есть теория предполагает более быстрое охлаждение слоев теплоизоляции. Однако, при больших временах захолаживания различие между теорией и экспериментом составляет всего 2...3 К. Данная теория позволила также определить максимальное время захолаживания криососуда, которое оказалось равным $\tau_{\max}^{\text{теор.}} = 230$ часов и близким к экспериментальному $\tau_{\text{вфч}}^{\text{эксп.}} = 210$ часов. Различие между теоретическими и экспериментальными значениями составляет всего ~10 %. Проведенные исследования позволили установить, что разработанная программа [4] может быть также использована для описания в промышленном криососуде кинетики охлаждения пакета ЭВТИ и определения времени установления в нем стационарного теплового режима, близкого к экспериментальному.

С помощью математической модели [4] нами был исследован также процесс выхода на стационарный режим пакетов ЭВТИ с измененной плотностью на криососуде. Расчет проводился для следующих условий: наружная его стенка имела температуру окружающей среды – 297 К, а внутренняя – температуру жидкого азота (77,4 К). Плотность укладки слоев ЭВТИ (ρ) изменялась от 10 кг/м³ до 48 кг/м³. Экспериментальные и расчетные результаты представлены на рис. 2. Их анализ показывает удовлетворительное согласие (с точностью 6...9 %) между экспериментальными и теоретическими значениями. При этом установлено, что для пакета ЭВТИ с плотностью 10 кг/м³ время выхода на режим составляет 72 часа, а при плотности 48 кг/м³ – 288 часов.

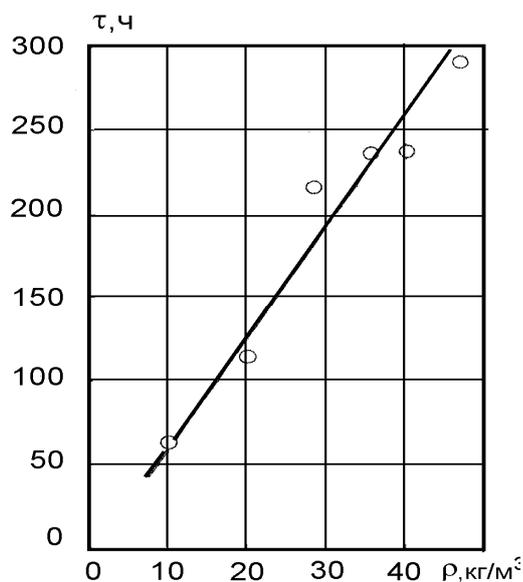
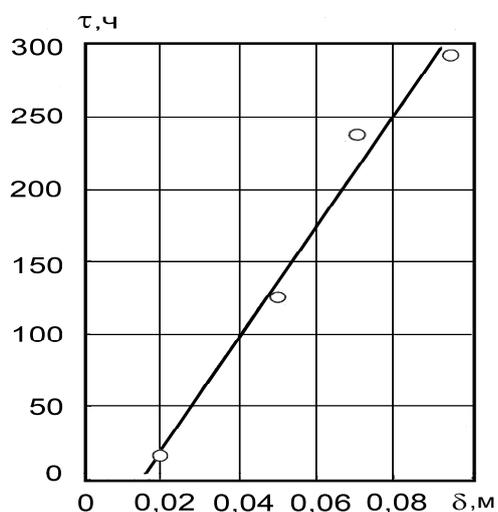


Рис. 2. Экспериментальные и теоретические результаты исследования изменения времени установления стационарного теплового состояния в криососуде с пакетами ЭВТИ различной плотности после заполнения жидким азотом.



Значительный интерес представляет также исследование с помощью математической модели [4] времени стабилизации температурного поля в теплоизоляции при изменении ее толщины. Данные исследования нами проведены для пакетов ЭВТИ, смонтированных с одинаковой плотностью 35 кг/м³ и измененной толщиной от 0,02 м до 0,1 м. При этом температура наружной стенки криососуда составляла 297 К, а внутренняя имела температуру жидкого азота (77,4 К). Результаты представлены на рис. 3. Их анализ показывает, что с повышением толщины теплоизоляции увеличивается время выхода на стационарный тепловой режим. Так, при толщине пакета ЭВТИ 0,02 м время стабилизации составляет всего 18 часов, а при толщине 0,1 м – 295 часов. Зависимость времени выхода на стационарный режим от толщины теплоизоляции имеет линейный характер. Температурное поле при изменении плотности и толщины пакета ЭВТИ качественно не отличается от распределения температуры, представленной на рис. 1.

Рис. 3. Экспериментальные и теоретические результаты исследования изменения времени установления стационарного теплового равновесия в криососуде с пакетом ЭВТИ различной толщины после заполнения жидким азотом.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что разработанная математическая модель [4] позволяет успешно определять время достижения стационарного теплового состояния в промышленных криососудах с теплозащитным пакетом ЭВТИ различной толщины и плотности, а также получать для них температурные профили $T(\delta)$. Полученные для стационарного теплового состояния температурные профили позволяют рассчитать температурную зависимость коэффициентов теплопроводности $\lambda(T)$ [1] для пакетов ЭВТИ и оценить совершенство исследуемой теплоизоляции. Это дает возможность

значительно ускорить процесс выбора наиболее эффективных материалов для теплоизоляции криососудов с целью повышения их тепловых характеристик.

Список литературы

1. Жунь Г. Г. Выявление и устранение факторов, ухудшающих эффективность криососудов / Г. Г. Жунь, В. Ф. Гетманец, В. А. Мирошниченко // Инж.-физ. журн. – 1989. – Т. 56, № 2. – С. 271–276.
2. Жунь Г. Г. Исследование теплофизических параметров криобиологических сосудов "Харьков-34Б" / Жунь Г. Г., Подольский А. Г., Шалаев В. И. // Криогенные системы: разработки и исследования. – К.: Нук. думка. – 1984. – С. 35–42.
3. Жунь Г. Г. Криобиологические сосуды с улучшенными тепловыми характеристиками // Межвузовский сборн. научн. трудов. Процессы и аппараты криогенных технологий и кондиционирования. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета. – 1985. – С. 59–64.
4. Архипов В. Т. К вопросу о температурном поле изоляции криогенных сосудов / Архипов В. Т., Михальченко Р. С., Архипова Е. С. // Вопросы гидродинамики и теплообмена в криогенных системах. – К.: Наук. думка. – 1974, IV вып. – С. 90–95.

STUDY OF PROCESS OF TEMPERATURE STABILIZATION IN CRYOVESSEL HEAT SHIELDING

G. G. ZHUN^c, Dr. Scie. Tech., Pf.

The paper proves that developed by us theoretical method to determine the stabilization time of temperature field in superinsulation packet of sphere-shaped cryovessel (after filling it with liquid cryoagent) can be used for fast solution of similar issue, and also for calculation of temperature profile $T(\delta)$, in heat shielding of industrial cryovessels having other shape. As a result, both estimation of thermal characteristics of the superinsulation packet under test and selection of the most effective solution for making better cryovessels take less time.

Поступила в редакцию 09.02 2012 г.