

Анализ циркуляционной системы термостатирования вращающегося теплообменника с однофазным водородом

Д-р техн. наук Е. И. БОРЗЕНКО, канд. техн. наук А. В. ЗАЙЦЕВ¹,
Н. С. БОЛЬШАКОВ, Е. И. ЗАЙКИН, А. В. ЛИТВИНОВИЧ

¹zai_@inbox.ru

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Использование Nb_3Sn и Nb_3Ge в качестве сверхпроводящих материалов для изготовления сверхпроводниковых обмоток возбуждения позволяет повысить температуру в зоне криостатирования до водородных температур. Для уменьшения влияния повышения давления на тепловую стабилизацию сверхпроводника, происходящего от воздействия центробежного ускорения на теплоотдачу от сверхпроводника к криоагенту при свободной конвекции и кипении, может быть применен циркуляционный поток однофазного вещества при сверхкритических параметрах. Разработана комбинированная математическая модель циркуляционного контура криотурбогенератора, состоящая из элементов с распределенными и сосредоточенными параметрами. Представлены математические модели рекуперативного теплообменного аппарата с кипением криоагента в межтрубном пространстве и радиационного теплообменного аппарата с распределенными параметрами. Приведены результаты численного эксперимента для циркуляционного водорода. Показано, что при использовании водорода тепловая нагрузка криогенной установки на температурном уровне 18 К составляет 186 Вт, температура водорода при изменении расхода от 0,05 кг/с до 0,2 кг/с возрастает лишь на десятые доли градуса. Для всех исследованных режимов теплообмена характерны достаточно высокие значения коэффициента теплоотдачи α , находящиеся в пределах от 2000 Вт/(м²·К) до 2120 Вт/(м²·К).

Ключевые слова: криостатирование, сверхпроводники, теплообмен, коэффициент теплоотдачи, математическая модель.

Информация о статье

Поступила в редакцию 24.06.2016, принята к печати 09.02.2017

doi:10.21047/1606-4313-2017-16-1-56-61

Ссылка для цитирования

Борзенко Е. И., Зайцев А. В., Большаков Н. С., Зайкин Е. И., Литвинович А. В. Анализ циркуляционной системы термостатирования вращающегося теплообменника с однофазным водородом // Вестник Международной академии холода. 2017. № 1. С. 56-61.

Circulating system of thermostating for rotary heat exchanger with single phase hydrogen

D. Sc. E. I. BORZENKO, Ph. D. A. V. ZAYTSEV¹,
N. S. BOLSHAKOV, E. I. ZAIKIN, A. V. LITVINOVICH

¹zai_@inbox.ru

ITMO University

191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The use of Nb_3Sn or Nb_3Ge a superconductive materials for manufacturing superconducting field-windings allows increasing temperature of cryostatting to the temperature of hydrogen. To decrease the effect of increased pressure on heat stabilization of conductor resulted from the influence of centrifugal acceleration on heat transfer from superconductor to cryogenic agent at free convection and boiling, circulating flow of single phase refrigerant at supercritical conditions can be used. Complex mathematical model for circulating circuit of cryoturbogenerator is presented. The model consists of elements with distributed and lumped parameters. The mathematical model for recuperative heat exchangers with boiling of cryogenic agent in the intertubular space and radiant heat exchanger with distributed parameters are shown. The results of numerical experiment for circulating hydrogen are presented. When hydrogen is used heat load of cryogenic unit at the temperature of 18 K is shown to be 186 W, and hydrogen temperature increases by only tenths of degrees when flow varied from 0.05 kg/s to 0.2 kg/s. All heat exchange regimes under investigation are characterized by relatively high values of heat transfer coefficient α , from 2000 W/(m²·K) to 2120 W/(m²·K).

Keywords: cryostatting, superconductors, heat exchange, heat transfer coefficient, mathematical model.

Создание сверхпроводящих электрических машин является одним из приоритетных направлений развития современной энергетики [1, 2].

Для изготовления сверхпроводниковых обмоток возбуждения (СПОВ) применяются сверхпроводящие материалы с различными критическими параметрами перехода в нормальное состояние. В обмотках возбуждения электрических машин, работающих на переменном токе, могут применяться два типа материалов: ленточные на основе Nb-Sn и многожильные проводники на основе Nb-Ti и Nb₃Sn. При применении сверхпроводников Nb-Ti сверхпроводящая обмотка возбуждения криостатируется при температурах ниже 5 К [3], что приводит к необходимости использования для криостатирования жидкого гелия, а следовательно к увеличению времени охлаждения и возникновению в элементах ротора криотурбогенератора серьезных термических напряжений. В результате повышаются требования к элементам конструкции ротора.

При использовании Nb₃Sn и Nb₃Ge появляется возможность повысить температуру в зоне криостатирования до водородных температур [4, 5]. Для уменьшения влияния повышения давления на тепловую стабилизацию сверхпроводника, происходящего от воздействия центробежного ускорения на теплоотдачу от сверхпроводника к криоагенту при свободной конвекции и кипении, может быть применен циркуляционный поток однофазного вещества при сверхкритических параметрах [6].

Схема отвода теплоты из зоны криостатирования и от других элементов ротора однофазным водородом показана на рис. 1.

В ротор III криотурбогенератора подаются два потока криоагента. Поток G, предназначенный для охлаж-

дения термического экрана, токовыводов и тепловых мостов, направляется из криогенной установки в центральную полость ротора, где создается разрежение под действием термосифонного эффекта теплообменников тепловых мостов [7, 8].

Сверхпроводящая обмотка возбуждения IV криостатируется с помощью циркуляционного потока водорода M', кратность циркуляции которого обеспечивается насосом VI. Теплообменник нагрузки I является связующим звеном между циркуляционным контуром и криогенной установкой. Для снятия тепловой нагрузки из криогенной установки подается поток жидкого водорода G₄⁰, который кипит в теплообменнике I при разрежении, создаваемом криогенным нагнетателем VII [3, 9].

Для исследования взаимного влияния структурных элементов на условия криостатирования ротора может быть применено математическое моделирование.

Для расчетного анализа циркуляционного контура КТГ была принята комбинированная математическая модель, состоящая из элементов с распределенными и сосредоточенными параметрами. Циркуляционный контур рассматривался состоящим из неподвижных и вращающихся элементов в т. ч. и с подводом теплоты [10]. Наиболее распространенными элементами циркуляционного контура являются теплообменные аппараты.

Математические модели теплообменных аппаратов рассматриваются как одномерные в направлении оси x, тогда система уравнений, описывающая исходный равновесный режим или новое устойчивое состояние рекуперативного теплообменника, имеет вид:

— уравнения сплошности

$$\frac{\partial G'}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial G''}{\partial x} = 0; \tag{1}$$

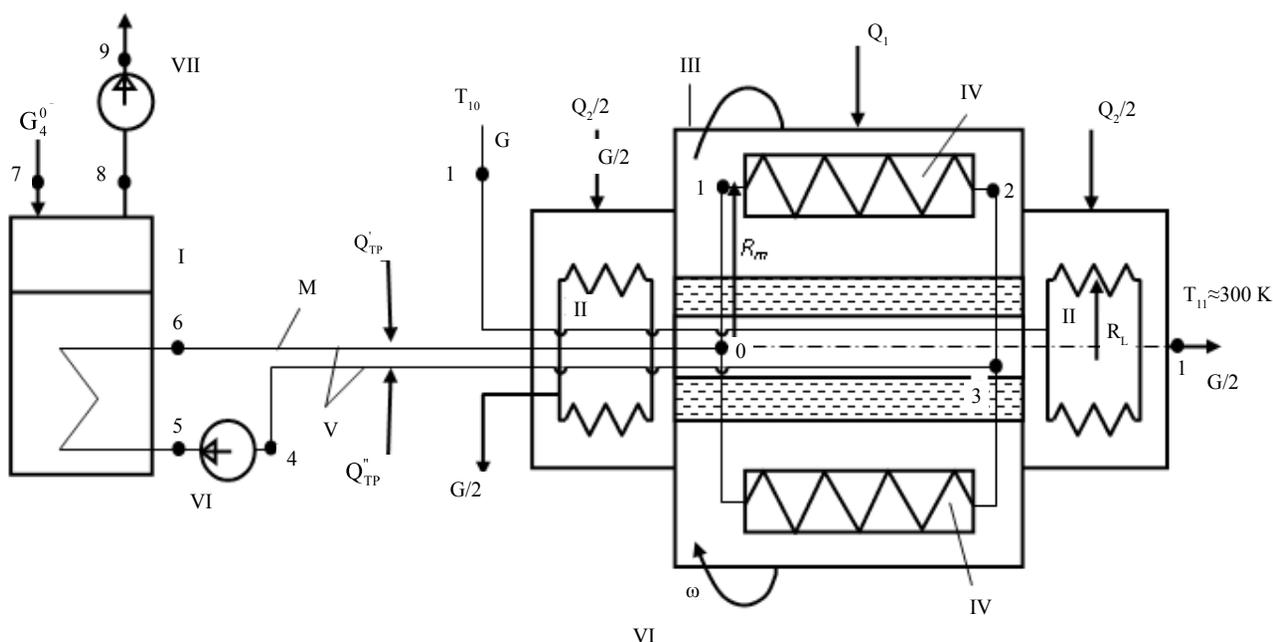


Рис. 1. Принципиальная схема криостатирования ротора криотурбогенератора: I — теплообменник нагрузки; II — теплообменники тепловых мостов; III — ротор; IV — бандаж СПОВ; V — криотрубопроводы; VI — циркуляционный насос; VII — криогенный нагнетатель; 1–11 — характерные точки циркуляционного контура

— уравнения энергии

$$G' \frac{\partial h'}{\partial x} = \alpha'_i F'_i (T' - \Theta'), \quad G'' \frac{\partial h''}{\partial x} = \alpha''_i F''_i (T'' - \Theta'') \quad (2)$$

— уравнения состояния [11]

$$\rho' = \rho'(p', T'), \quad h' = h'(p', T'),$$

$$\rho'' = \rho''(p'', T''), \quad h'' = h''(p'', T''); \quad (3)$$

— уравнения движения

$$\frac{\partial p'}{\partial x} = -\frac{\partial p'_{тр}}{\partial x}, \quad \frac{\partial p''}{\partial x} = -\frac{\partial p''_{тр}}{\partial x} \quad (4)$$

где G', G'' — расход прямого и обратного потоков рабочего вещества, соответственно; h', h'' — энтальпия этих потоков; α', α'' — коэффициенты теплоотдачи потоков; F'_i, F''_i — площадь теплообменной поверхности наружной и внутренней стенок оболочки канала; T', T'' — температура прямого и обратного потоков; Θ', Θ'' — температура наружной и внутренней поверхностей оболочки каналов; p', p'' — давление прямого и обратного потоков; ρ', ρ'' — плотность потоков; $\partial p'_{тр}, \partial p''_{тр}$ — потери давления в этих потоках.

Из-за сложности реальных процессов, протекающих в теплообменных аппаратах, при реализации их математических моделей численным методом принимается ряд допущений:

- по расходу, давлению и внешнему тепловому потоку процесс рассматривается как квазистационарный;
- так как закономерности движения реального потока определяются экспериментальным путем и полученные при этом коэффициенты отражают реальную структуру потока, считается, что процесс течения рабочих сред одномерный и их параметры изменяются только в направлении движения потока по ординате x ;
- не учитывается осевая теплопроводность материала оболочки канала и рабочих веществ;
- не учитывается теплопроводность оболочки вдоль оси u , т. е. принимается, что температура элементарного участка оболочки во всех точках данного сечения постоянна: $\Theta' = \Theta''$;
- не учитывается теплоприток из окружающей среды, т. е. $q_c^T = 0$ [5].

Комбинированная математическая модель состоит из элементов с распределенными (I, IV, V) и сосредоточенными (радиальные каналы 0–1, 2–3 и циркуляционный насос) параметрами. Разработана программа “Контур”, блок-схема которой показана на рис. 2. При построении модели использован итерационный метод.

Расчет начинается с точки 6, так как ее параметры наиболее достоверно могут быть найдены из условий теплообмена в аппарате I.

Математическая модель рекуперативного теплообменного аппарата с кипением криоагента в межтрубном пространстве

При решении задач статики воспользуемся методом элементарных балансов для подвижных сред. Рассматриваемый теплообменник относится к испарительным аппаратам и состоит из трех подсистем: прямого потока, оболочки канала и кипящего криоагента. Тепловой баланс

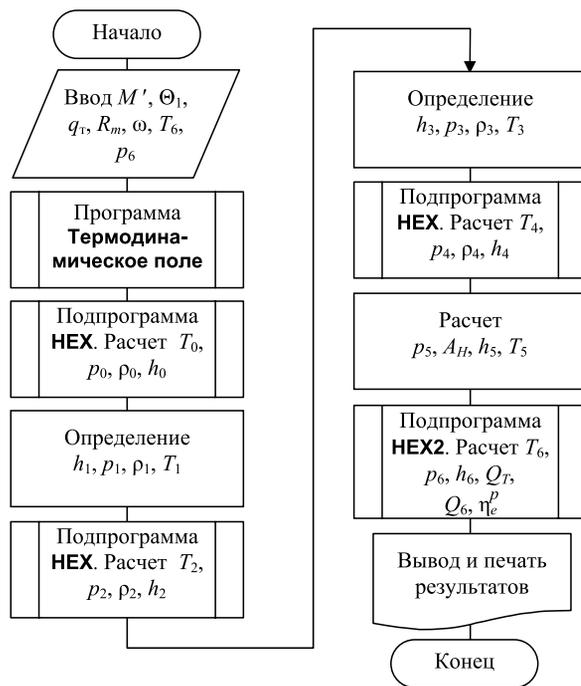


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета программы “Контур”

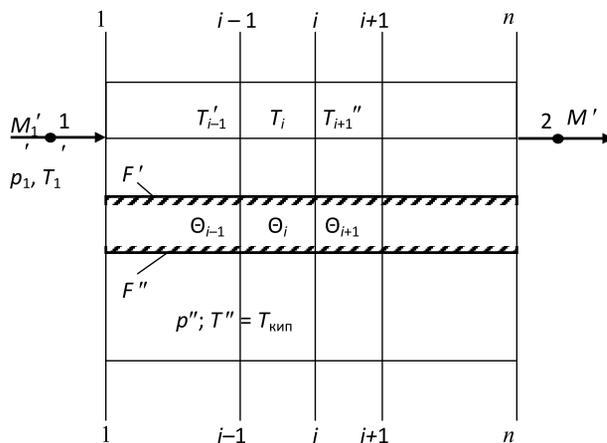


Рис. 3. Расчетная схема к определению статического распределения параметров в подсистемах испарительного теплообменного аппарата

i -го участка для подсистем Прямой поток — Оболочка канала (рис. 3) может быть записан в виде

$$M' c'_{pi} (T'_i - T'_{i+1}) - \alpha'_i F'_i (T'_i - \Theta_i) = 0 \quad (5)$$

Значение коэффициента теплоотдачи α''_i будет определяться теплофизическими свойствами кипящего криоагента, режимом процесса кипения и условиями его осуществления. Для пузырькового режима кипения в большом объеме

$$\alpha''_i = B^{3,33} (\Theta_i - T'')^{2,33} \quad (6)$$

Тогда с учетом (5) и (6) алгоритм математической модели будет выглядеть так:

$$\begin{cases} p'_{i+1} = p'_i - \Delta p_i; \\ T_{i+1} = f(p'_{i+1}, h_{i+1}); \\ \alpha'_i F'_i (T'_i - \Theta_i) = F''_i B^{3,33} (\Theta_i - T_{\text{крит}})^{3,33}; \\ h_{i+1} = h_i - \alpha'_i F'_i \frac{T'_i - \Theta_i}{M'}; \\ q_i = M' \frac{h_i - h_{i+1}}{F''_i}. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь B — расчетный комплекс; Δp_i — потеря давления потока M' от гидравлических сопротивлений канала.

Математическая модель радиационного теплообменного аппарата с распределенными параметрами

На рис. 4 приводится расчетная схема аппарата, который состоит из двух подсистем — прямого потока и оболочки канала. При разработке модели было принято, что внешний поток равномерно распределен по наружной поверхности оболочки. Прямой поток M' представляет собой криоагент при сверхкритическом давлении.

Расчет распределенного вдоль ординаты x температурного поля потока криоагента T_i и оболочки канала Θ_i начинается с определения локальных коэффициентов теплоотдачи α_i при заданной в начале расчета среднemasовой температуре потока T'_i .

Параметры потока криоагента и температура оболочки канала в сечении $i+1$ находились из нижеприведенного алгоритма:

$$\begin{cases} \Theta_i = T_i + q_i / \alpha_i; \\ \Delta p_i = 2 f_{\text{тр}i} \rho_i B \left(\frac{\rho \omega}{\rho_i} \right)^2; \\ p_{i+1} = p_i - \Delta p_i; \\ h_{i+1} = h_i - \frac{F'_i q_i}{M'}; \\ T_{i+1} = f(p'_{i+1}, h'_{i+1}). \end{cases} \quad (8)$$

Алгоритм математической модели описывает тепловые и гидрогазодинамические процессы в криотрубопроводах V каналах бандажа СПОВ.

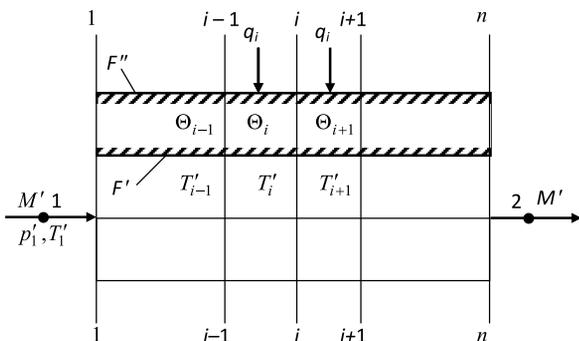


Рис. 4. Расчетная схема радиационного теплообменного аппарата: 1 — прямой поток; 2 — оболочка канала; 3 — тепловой поток

Для нахождения параметров состояния криоагента на выходе из радиального канала принималось, что в канале 0–1, под действием центробежных сил, происходит сжатие потока и параметры точки 1 определяются из совместного решения уравнений, проводимого методом последовательных приближений:

$$\begin{cases} h_1 = h_0 + \frac{(R_m \omega)^2 / (2 \cdot 10^3)}{\eta_s}; \\ p_1 = p_0 + \frac{(R_m \omega)^2 \bar{\rho}}{2 \cdot 10^5}; \\ \rho_1 = f(p_1, T_0); \\ T_1 = f(p_1, h_1). \end{cases} \quad (9)$$

Параметры точки 3 с учетом наличия центростремительного торможения потока гелия в радиальном канале 2–3 определяем путем совместного решения системы уравнений методом последовательных приближений:

$$\begin{cases} h_3 = h_2 - \frac{(R_m \omega)^2 / (2 \cdot 10^3)}{\eta_s}; \\ p_3 = p_2 - \frac{(R_m \omega)^2 \bar{\rho}}{2 \cdot 10^5}; \\ \rho_3 = f(p_3, T_2); \\ T_3 = f(p_3, h_3). \end{cases} \quad (10)$$

Параметры точки 5, расположенной после циркуляционного насоса, определяются из условия, что насос обеспечивает изменение давления циркуляционного потока гелия до давления в точке 0 в теплообменном аппарате I и криотрубопроводе:

$$\begin{cases} p_5 = p_0 + \Delta p_{5-6} + \Delta p_{6-0}; \\ h_5 = h_4 + \frac{A_{\text{н.п}}}{M'}; \\ T_5 = f(h_5, p_5); \\ A_{\text{н.п}} = M' \frac{p_5 - p_4}{\eta_{\text{н.п}} \bar{\rho}}, \end{cases} \quad (11)$$

где $\bar{\rho} = \frac{\rho_4 + \rho_5}{2}$.

Тепловая нагрузка на криогенную установку:

$$Q_{\text{т}} = M'(h_5 - h_6). \quad (12)$$

Собственный напор вращающихся теплообменников КТГ

$$H_p = \frac{(\bar{\rho}_1 - \bar{\rho}_2)(\omega r)^2}{2}, \quad (13)$$

где $\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2$ — средняя плотность криоагента в радиальных каналах с центробежным и центростремительным движением соответственно.

На основе вышеприведенного алгоритма математической модели был разработан пакет прикладных программ и был проведен численный эксперимент. При этом было принято, что участки 6–0 и 3–4 циркуляционного контура имеют длину 10 м, $Q_{\text{т}} = Q_{\text{т}}'' = 10$ Вт.

Система криостатирования СПВО КТГ состояла из каналов диаметром 0,002 м, равномерно расположенных по окружности бандажа СПОВ диаметром 0,68 м

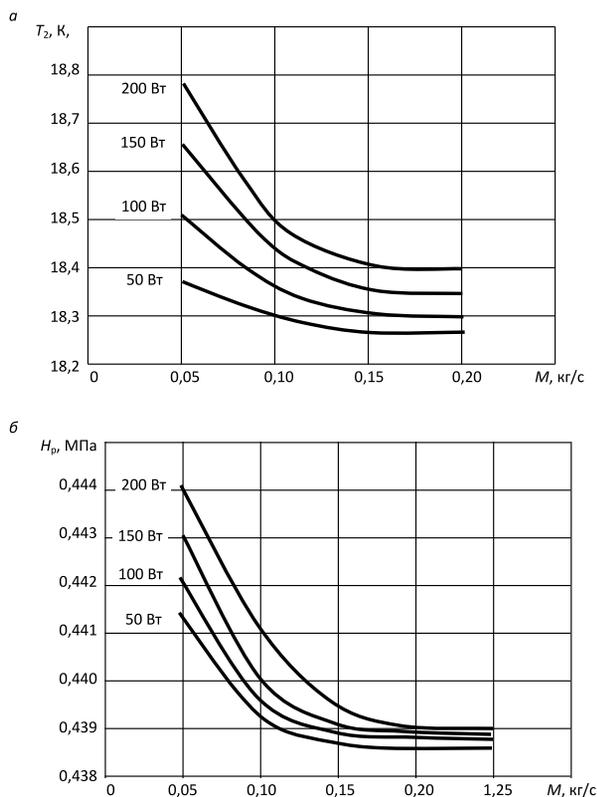


Рис. 5. Изменение температуры водорода при $R_m = 0,34$ м:
 а — на выходе из каналов бандажа СПОВ;
 б — собственного напора ротора

и длиной 2,5 м. Размер радиальных каналов 0–1 и 2–3 принимался $R_m = 0,34$ м, а частота вращения ротора $n = 50$ с⁻¹. В качестве сверхпроводника принимаем сверхпроводник 2 рода Nb₃Ge, критическая температура перехода в нормальное состояние которого составляет 23 К. Поэтому для криостатирования СПОВ принимаем однофазный водород при следующих параметрах: температура $T = 18$ К, давление $p = 1,5$ МПа.

Значение собственного напора ротора в циркуляционном тракте при определенных параметрах однофазного потока достаточно велико, учитывая, что собственный напор ротора зависит от разности значений плотности водорода на участках, где движение его происходит под действием центробежных и центростремительных сил [12–14].

На рис. 5 приведены результаты численного эксперимента для циркуляционного водорода [15]. Из графиков видно, что температура водорода на прямом участке возрастает лишь на десятые доли градуса при изменении расхода от 0,05 до 0,2 кг/с.

Из графика (см. рис. 5, а) следует, что температура водорода падает также интенсивно, как и температура гелия. Выравнивание температуры происходит при расходе водорода 0,15 кг/с и далее незначительно изменяется с 18,4 К до 18,37 К.

На рис. 6 показаны статические характеристики радиационного теплообменного аппарата, который представляет собой канал сверхпроводящей обмотки возбуждения ротора с равномерно распределенным внешним теплопритоком.

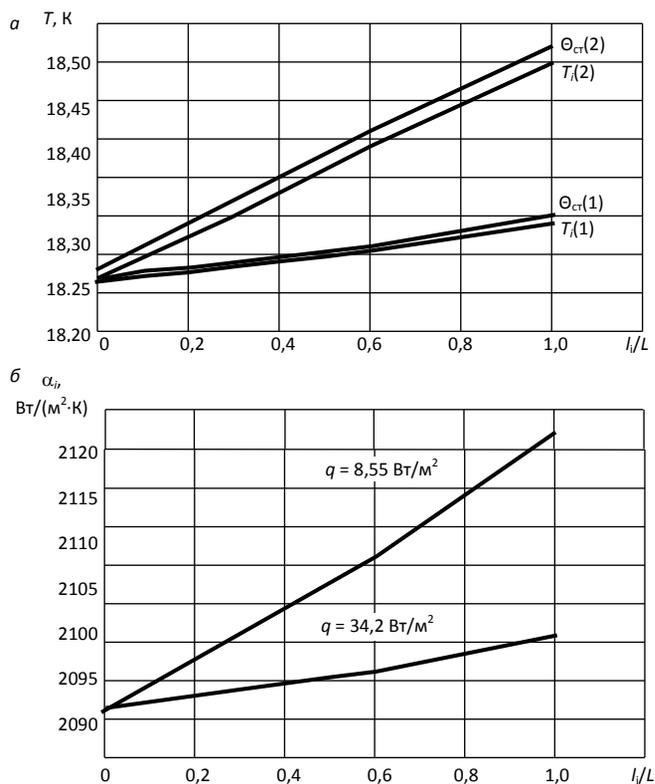


Рис. 6. Статические характеристики радиационного теплообменного аппарата: а — изменение температуры потока и стенки; б — изменение коэффициентов теплоотдачи по длине охлаждаемых каналов ротора

Вычислительный эксперимент проводился при поверхностной плотности тепловых потоков $q_{ст} = 8,55$ Вт/м и $q_{ст} = 34,2$ Вт/м и $M' = 0,1$ кг/с [9]. В обоих случаях была получена практически линейная зависимость изменения T_i и Θ_i по длине канала, температуры стенки и потока монотонно возрастают. С увеличением $q_{ст}$ возрастает и ΔT_i . Для исследованных режимов теплообмена эта разность мала.

Необходимо отметить, что для всех исследованных режимов характерны достаточно высокие значения коэффициента теплоотдачи α_r — в пределах 900–1000 Вт/(м²·К) для гелия и 2000–2120 Вт/(м²·К) для водорода. Однако при $M' = \text{const}$ степень изменения α_r относительно l/L незначительна, так как среднемассовая скорость гелия и водорода по длине канала, ввиду незначительности изменения температуры потока, остается почти постоянной и мало влияет на локальный коэффициент теплоотдачи.

Для водорода при тех же параметрах тепловая нагрузка криогенной установки составляет 186 Вт, однако температурный уровень составляет уже 18 К.

Литература

1. Российская академия наук. Инновационные технологии в энергетике. Кн. 2. Инновационные водородные и сверхпроводниковые технологии для энергетике. Сборник статей. Под ред. О. М. Бударгина и С. П. Малышенко. — М.: Наука, 2012. 162 с.

2. C. Aprea, A. Greco, A. Maiorino, C. Masselli. The energy performances of a rotary permanent magnet magnetic refrigerator // *International Journal of Refrigeration*, 2016. Vol. 61. P. 1–11.
3. Архаров А. М., Беляков В. П. и др. Криогенные системы. Т. 2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем. — М.: Машиностроение, 1999. — 719 с.
4. Есельсон Б. И., Григорьев В. И. и др. Свойства жидкого и твердого водорода. — М.: Изд-во стандартов, 1978. 127 с.
5. Гамбург Д. Ю., Семенов В. П., Дубровин Н. В. и др. Водород: свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справочник. — М.: Химия, 1982. 672 с.
6. Зотов И. Л. Анализ термического состояния сверхпроводящих роторов электрических машин // *Вопросы современной криогеники*. — М. 1975. С. 55–69.
7. Куавда В. П., Счастливый Г. Г., Шаревский Б. А. Ротор электрической машины с криогенным охлаждением. Авторское свидетельство SU 604086, 25.04.1978.
8. Антонов Ю. Ф., Данилевич Я. Б. Криотурбогенератор КТГ-20: опыт создания и проблемы сверхпроводящего электромашиностроения. — М.: Физматлит, 2013. 600 с.
9. Новотельнов В. Н., Суслов А. Д., Полтараус В. Б. Криогенные машины. — СПб.: Политехника, 1991. 335 с.
10. Akulov L. A., Borzenko E. I., Isakeev A. I., Novotel'nov V. N. Simulation du processus de refroidissement d'un enroulement d'excitation supraconducteur d'un alternateur dans de l'hélium hyper critique sous refroidissement // *Documents de 16^e Congrès. Jn interdusroi*. Paris, 1983. P. 157–162.
11. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. М. П. Малкова. — М.: Энергоатомиздат, 1985. 432 с.
12. G. Klemptner, I. Kerszenbaum. Operation and Maintenance of Large Turbo Generators. 2004. P. 580.
13. Антонов Ю. Ф., Данилевич Я. Б. Сверхпроводниковые топологические электрические машины. — М.: Физматлит, 2009. 362 с.
14. Акерман Р. А., Ласкарис Е. Т., Хуан С., Брэй Д. В. Система и способ для охлаждения сверхпроводящей роторной машины. Авторское свидетельство RU 2372675, 10.11.2009.
15. Борзенко Е. И., Зайцев А. В. Установки и системы низкотемпературной техники. Автоматизированный расчет и моделирование процессов криогенных установок и систем. Учеб. пособие. — СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. 232 с.
- technologies for power. Collection of articles. Under the editorship of O. M. Budargin and S. P. Malyschenko. Moscow.: Science, 2012. 162 p. (in Russian)
2. C. Aprea, A. Greco, A. Maiorino, C. Masselli. The energy performances of a rotary permanent magnet magnetic refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 2016. Vol. 61. P. 1–11. (in Russian)
3. Arkharov A. M., Belyakov V. P. ets. Cryogenic systems. T. 2. Bases of design of devices, installations and systems. Moscow, 1999. 719 p. (in Russian)
4. Esel'son B. I., Grigor'ev V. I. ets. Properties of liquid and solid hydrogen. Moscow, 1978. 127 p. (in Russian)
5. Gamburg D. Yu., Semenov V. P., Dubrovin N. V. i dr. Hydrogen: properties, receiving, storage, transportation, application: Reference book. Moscow, Khimiya, 1982. 672 p. (in Russian)
6. Zotov I. L. Analysis of a thermal condition of superconducting rotors of electrical machines. *Voprosy sovremennoi kriogeniki*. Moscow. 1975. p. 55–69. (in Russian)
7. Kuavda V. P., Schastliviy G. G., Sharevskii B. A. Rotor of the electrical machine with cryogenic chilling. Copyright certificate SU 604086, 25.04.1978. (in Russian)
8. Antonov Yu. F., Danilevich Ya. B. KTG-20 cryoturbogenerator: experience of creation and problem of superconductor electric machine industry. Moscow, Fizmatlit, 2013. 600 p. (in Russian)
9. Novotel'nov V. N., Suslov A. D., Poltaraus V. B. Cryogenic cars. SPb.: Politekhnik, 1991. 335 p. (in Russian)
10. Akulov L. A., Borzenko E. I., Isakeev A. I., Novotel'nov V. N. Simulation du processus de refroidissement d'un enroulement d'excitation supraconducteur d'un alternateur dans de l'hélium hyper critique sous refroidissement. Documents de 16^e Congrès. Jn interdusroi. Paris, 1983. P. 157–162. (in Russian)
11. The reference book on physics and technology bases of a cryogenics / Under the editorship of M. P. Malkova. Moscow, Energoatomizdat, 1985. 432 p. (in Russian)
12. G. Klemptner, I. Kerszenbaum. Operation and Maintenance of Large Turbo Generators. 2004. P. 580. (in Russian)
13. Antonov Yu. F., Danilevich Ya. B. Superconductor topological electrical machines. Moscow, Fizmatlit, 2009. 362 p. (in Russian)
14. Akerman R. A., Laskaris E. T., Khuan S., Brei D. V. System and method for chilling of the superconducting rotor machine. Copyright certificate RU 2372675, 10.11.2009. (in Russian)
15. Borzenko E. I., Zaitsev A. V. Installations and systems of the low-temperature equipment. The automated calculation and modeling of processes of cryogenic installations and systems. Education guidance. — SPb.: SPbGUNiPT, 2006. 232 p. (in Russian)

References

1. Russian Academy of Sciences. Innovative technologies in an energy drink. Book 2. Innovative hydrogen and superconductor