
НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 536.2:536.12:536.58:536.483
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-2-170-177

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТОЧНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

А. М. ДЗИТОВЕВ, Е. В. ЛАПОВОК, М. М. ПЕНЬКОВ, С. И. ХАНКОВ

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: leva0007@rambler.ru*

Предложена методика определения условий обеспечения максимальной эффективности и экономичности проточного теплообменника на парах гелия, предназначенного для поддержания заданной температуры объектива криогенного оптико-электронного прибора. Представлена математическая модель процесса охлаждения объекта криостатирования с использованием смонтированного на поверхности объекта трубопровода, по которому протекают пары гелия (массовый расход паров постоянный). Контакт трубопровода с поверхностью объекта предполагается идеальным. Показано, что максимально эффективное охлаждение при минимальном расходе криоагента обеспечивает полная рекуперация тепла между парами гелия и трубопровода. Чтобы определить длину трубопровода, достаточную для обеспечения полной рекуперации в теплообменнике, необходимо вначале вычислить показатель тепловой эффективности на единицу длины трубопровода. Этот удельный показатель тепловой эффективности (УПТЭ) проточного теплообменника является объективным критерием полной рекуперации. Получены формулы для расчета показателя тепловой эффективности при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения паров гелия. Формулы представляют собой зависимости УПТЭ от массового расхода и диаметра трубопровода с учетом температурного уровня криостатирования. Показаны эффективность и удобство использования полученных аналитических зависимостей для практических расчетов, а также для выбора параметров проточных криостатов.

Ключевые слова: проточный криостат, криогенный оптико-электронный прибор, охлаждение парами гелия, температура криостатирования, рекуперация

Введение. Обнаружительная способность оптико-электронных приборов (ОЭП), работающих в инфракрасной (ИК) области спектра, существенно возрастает с понижением температуры элементов ОЭП [1]. Различные аспекты теплового проектирования и применения криогенных ОЭП рассмотрены в работах [2—8]. При разработке компактных эффективных автономных систем криостатирования ОЭП на начальных этапах теплового проектирования важно проводить обоснованный выбор параметров всех основных узлов прибора, в том числе системы криостатирования (СК) [9—15]. Это особо актуально для проточных СК, не имеющих замкнутого контура, когда запас жидкого гелия, испаряемого из криостата перед поступлением в трубопровод проточного теплообменника, ограничен и должен использоваться максимально рационально. Несмотря на значительное число публикаций по физике и технике криогенных

систем [16—22], проектирование криогенной, и особенно гелиевой, техники остается специфической областью, требующей особой квалификации.

Цель настоящей статьи — разработка доступной для инженеров и конструкторов методики расчета удельного показателя тепловой эффективности (УПТЭ), определяющего полноту рекуперации паров гелия в проточном теплообменнике. Актуальность и практическая значимость данной методики определяются тем, что ее целесообразно использовать на начальном этапе расчетов в общей процедуре теплового проектирования криогенных низкофоновых ОЭП.

Физическая модель проточного теплообменника. Проточный теплообменник для криостатирования объекта на заданном температурном уровне в расчетном варианте представлен закрепленным на объекте трубопроводом с протекающим по нему криоагентом (КА). Модель объекта криостатирования (ОК) представлена однородным ортотропным телом, выполненным из материала с высокой теплопроводностью; на всех стадиях теплообмена (захолаживание, стационарный тепловой режим, отогрев) ОК считается изотермичным. ОК соединен с внешним корпусом (теплым корпусом, ТК) с помощью опор, являющихся тепловыми мостами, но содержащими необходимые тепловые развязки. Для снижения внешнего теплопритока и минимизации расхода КА между ОК и ТК может устанавливаться экран или система экранов (активных и пассивных).

Математическая модель процесса теплообмена объекта криостатирования с криоагентом. Для проточного одноуровневого теплообменника стационарная среднеобъемная температура ОК будет описываться соотношением вида [2]

$$T = \frac{NT_0 + T_c}{N+1}; N = \frac{cME}{\sigma}; E = 1 - \exp(-\varphi); \varphi = \frac{\alpha S}{cM}, \quad (1)$$

где T , T_0 , T_c — соответственно температура ОК, КА на входе в теплообменник и внешней среды (обычно ТК); c — удельная теплоемкость КА; M — массовый расход КА; E — показатель полноты рекуперации в трубопроводе теплообменника; σ — тепловая проводимость от внешней среды к ОК; φ — показатель тепловой эффективности теплообменника; α — коэффициент теплоотдачи от поверхности трубопровода на ОК к КА; S — площадь теплообмена ОК с КА.

Необходимо отметить, что априорная оценка φ требует расчета коэффициента конвективного теплообмена по критериальным соотношениям. При $\varphi > 3—4$ задача прогнозирования теплового режима предельно упрощается, поскольку в этом случае $E \approx 1$ и отпадает необходимость расчета коэффициента конвективного теплообмена.

Для наиболее эффективного охлаждения целесообразно конструировать СТ таким образом, чтобы обеспечить реализацию достаточно больших φ , что делает актуальным использование оперативных и упрощенных методик оценки этого параметра, особенно на ранних стадиях проектирования.

Методика расчета коэффициентов конвективного теплообмена при движении жидкости в трубах. Расчеты коэффициентов конвективного теплообмена проводятся по известным критериальным соотношениям [23]:

— для ламинарного режима ($Re < 2300$)

$$\overline{Nu}_f = 0,15 \sqrt[3]{Re_f} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot Gr_f^{0,1} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}; \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \approx 1; \quad (2)$$

— для переходного режима ($Re = 2300—10\,000$)

$$\overline{Nu}_f = k \cdot Pr_f^{0,43}; k = 0,004(Re - 1500); \quad (3)$$

— для турбулентного режима ($Re > 10\,000$)

$$\overline{Nu}_f = 0,023 \cdot Re_f^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43}. \quad (4)$$

В соотношения (2)—(4) входят следующие безразмерные критерии: Нуссельта (Nu), Рейнольдса (Re), Прандтля (Pr), Грасгофа (Gr); индекс f означает, что значения соответствующего критерия определяются при температуре теплоносителя, а w — при температуре охлаждаемой поверхности:

$$Nu_f = \frac{\alpha d}{\lambda_f}; \quad Re = \frac{ud}{\nu}; \quad Pr = \frac{\nu}{a}; \quad Gr = \beta g \frac{d^3}{\nu^2} (T_w - T_f), \quad (5)$$

где d — диаметр трубопровода; λ_f — теплопроводность КА; u — скорость течения КА; ν — коэффициент кинематической вязкости КА; a — коэффициент температуропроводности КА; β — его коэффициент объемного расширения; g — ускорение силы тяжести; T_w — средняя температура охлаждаемой поверхности трубопровода; T_f — средняя температура КА.

Критерий Рейнольдса можно выразить через массовый расход. Для трубопровода круглого сечения:

$$Re = (4/\pi)M_0; \quad M_0 = M/\xi; \quad \xi = \mu d; \quad \mu = \gamma \nu, \quad (6)$$

где M_0 — безразмерный массовый расход КА; ξ — параметр, имеющий размерность массового расхода; μ — коэффициент динамической вязкости КА; γ — плотность КА.

Выражение для α можно представить в виде

$$\alpha(M, d, T) = \frac{\lambda_f(T)}{d} Nu_f(M, d, T), \quad (7)$$

сведя влияние всей совокупности факторов к зависимости α всего от трех экспериментально измеряемых параметров: M, d, T .

Для трубопровода круглого сечения эффективность конвективного теплообмена определяется по формуле

$$\varphi = \sigma_k / cM, \quad (8)$$

где $\sigma_k = \pi d l \alpha$ — тепловая проводимость от трубопровода к теплоносителю; cM — водяной эквивалент, имеющий размерность тепловой проводимости.

Значительно расширяет возможности обобщений введение удельного показателя тепловой эффективности. Этот показатель определяется с учетом (8) и (7) в виде

$$\varphi^* = \varphi / l = \pi d \alpha / cM = \pi \lambda Nu / cM. \quad (9)$$

Запишем формулы для коэффициентов теплоотдачи с учетом (2)—(7) с целью последующего определения УПТЭ:

— для ламинарного режима ($Re < 2300$ или $M_0 < 1805$)

$$\alpha = (\lambda / d) 0,1626 Pr^{0,43} Gr^{0,1} M_0^{1/3}; \quad (10)$$

— для переходного режима ($Re = 2300—10\,000$ или $1805,5 \leq M_0 \leq 7850$)

$$\alpha = (\lambda / d) 0,004 Pr^{0,43} [(4/\pi)M_0 - 1500]; \quad (11)$$

— для турбулентного режима ($Re > 10\,000$ или $M_0 > 7850$)

$$\alpha = 0,023 (\lambda / d) Pr^{0,43} [(4/\pi)M_0]^{0,8}. \quad (12)$$

Выбор значений параметров. Как установлено при выводе (7), коэффициент теплоотдачи зависит от массового расхода, внутреннего диаметра трубопровода и температуры. Следует отметить, что зависимость от первых двух параметров может быть выражена в виде аналитической формулы, тогда как зависимость от температуры скрыта в значениях определяющих параметров. Достаточным для необходимого снижения фонового излучения температурой будет значение $T = 50$ К [1—3].

Оценим величину критерия Грасгофа в степени 0,1:

$$Gr^{0,1} = k_1 \nu^{0,1} d^{0,3}; \quad k_1 = (\beta g / \nu^2)^{0,1}. \quad (13)$$

При $T = 50 \text{ К}$ [24]: $\beta = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; $\nu = 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Для $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ получаем $k_1 = 7,86$. Примем $\nu = 10 \text{ К}$, тогда $\nu^{0,1} = 1,26$. С учетом этих значений параметров вместо (13) можно получить

$$\text{Gr}^{0,1} \approx 10 d^{0,3}. \quad (14)$$

С учетом (14) вместо (10) можно записать

$$\alpha = 1,626 \lambda d^{-0,7} \text{Pr}^{0,43} M_0^{1/3}. \quad (15)$$

При $T = 50 \text{ К}$ [24, 25]: $\lambda = 0,047 \text{ Вт / (м·К)}$; $\text{Pr} = 0,67$; $\text{Pr}^{0,43} = 0,842$; $\mu = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Па·с}$; $\mu^{1/3} = 1,816 \cdot 10^{-2}$.

Формулы для расчета удельных показателей тепловой эффективности. На основании (6)—(11) и (15) можно получить формулы для расчета УПТЭ и вычислить значения определяющих параметров, соответствующих $T = 50 \text{ К}$.

1) Для ламинарного режима при $M < 0,0108d \text{ кг/с}$:

$$\begin{aligned} \varphi^* &= a_l d^{-0,033} M^{-2/3}, \\ a_l &= 1,626 \pi \lambda \text{Pr}^{0,43} \mu^{-1/3} \text{ с}^{-1} = 0,00214. \end{aligned} \quad (16)$$

2) Для переходного режима при $0,0108d < M < 0,0471d$:

$$\varphi^* = a_p / d - b_p / M. \quad (17)$$

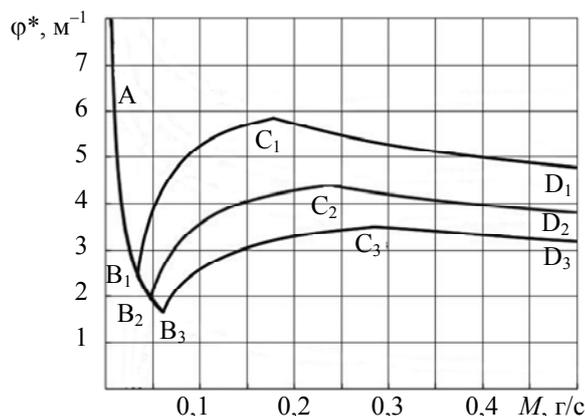
Из (3), (5)—(9) и (11) следует

$$\begin{aligned} a_p &= 0,016\lambda \text{Pr}^{0,43} / (\text{с } \mu) = 0,02 \text{ м}, \\ b_p &= 6\pi \lambda \text{Pr}^{0,43} / \text{с} = 1,433 \cdot 10^{-4} \text{ с/кг}. \end{aligned}$$

3) Для турбулентного режима при $M > 0,0471d \text{ кг/с}$

$$\begin{aligned} \varphi^* &= a_t d^{-0,8} M^{-0,2}, \\ a_t &= 0,028\pi\lambda \text{Pr}^{0,43} / (\mu^{0,8} \text{ с}) = 0,01. \end{aligned} \quad (18)$$

Результаты расчетов удельного показателя тепловой эффективности. На рисунке представлены зависимости величины УПТЭ от массового расхода паров гелия при температуре 50 К . Расчеты проводились для трубопровода диаметром 3 мм (итоговая линия $AB_1C_1D_1$), 4 мм ($AB_2C_2D_2$) и 5 мм ($AB_3C_3D_3$). Участки зависимостей AB_i соответствуют ламинарному режиму, B_iC_i — переходному, а C_iD_i — турбулентному.



Из полученных зависимостей можно сделать следующие выводы:

— на участке ламинарного режима УПТЭ практически не зависит от диаметра трубопровода, но переход от ламинарного режима к переходному начинается раньше для трубопроводов с меньшим диаметром канала;

— на участках переходного и турбулентного режимов УПТЭ снижается с ростом внутреннего диаметра трубопровода;

— в переходном режиме УПТЭ возрастает с увеличением массового расхода паров гелия, а в турбулентном режиме снижается.

Следует отметить, что полученные в результате нелинейных численных расчетов с учетом температурных зависимостей всех параметров графики [13, 14] коррелируют с данными рисунка.

Пример выбора параметров проточного криостата. В стационарном тепловом режиме температура ОТ описывается формулой (1), включающей в обобщенном виде необходимые для теплового проектирования параметры. Для $T_0 = 10$; $T_c = 300$; $T = 50$ К. Из (1) можно получить

$$N = (T_c - T)/(T - T_0) = 6,25. \quad (19)$$

Примем $M = 0,05$ г/с = $5 \cdot 10^{-5}$ кг/с, тогда $cM = 0,26$ Вт/К. При $E = 1$ определим предполагаемую величину σ :

$$\sigma = cM/N = 0,26/6,25 = 0,0416 \text{ Вт/К}. \quad (20)$$

Теплоприток к ОТ от теплового корпуса равен

$$P = \sigma(T_c - T) = 0,0416 \cdot 250 = 10,4 \text{ Вт}. \quad (21)$$

При длине L и диаметре D корпуса ОТ 0,3 мм площадь его боковой поверхности $\pi DL = 3,14 \cdot 0,3 \cdot 0,3 = 0,2826 \text{ м}^2$.

Массовый расход $M = 0,05$ г/с, как следует из зависимости $\varphi^*(M)$, соответствует границе ламинарного и переходного режимов, причем при $M = 0,05$ $\varphi^* = 2$. Отсюда длина трубопровода, необходимая для обеспечения полной рекуперации равна

$$l = 4/\varphi^* = 2 \text{ м}.$$

Необходимое количество витков на корпусе ОТ

$$n = l/\pi D = 2/0,942 = 2,12.$$

Два витка не смогут обеспечить изотермичность корпуса при любой монтажке трубопровода, хотя бы и встречной (бифилярной). Если трубопровод с внешним диаметром 0,5 см наматывать на корпус ОТ с шагом 1 см, то на внешнюю поверхность корпуса длиной 30 см может быть уложено 20 витков. Более точный расчет потребует учета не только температурного поля на поверхности корпуса, но и гидравлических потерь давления и скорости потока паров гелия в трубопроводе с использованием методик, изложенных в [15].

Выводы. Полученные в настоящей работе методики определения величины удельного показателя тепловой эффективности, основанные на применении формул (16)—(18), имеют особую ценность на начальной стадии проектирования криогенных телескопов. Формулы вида (19)—(21) позволяют получить прообраз тепловой модели системы криостатирования телескопа. Практическая значимость предложенной методики расчета заключается в том, что ее использование позволяет не проводить громоздкие численные расчеты, требующие специальной квалификации исполнителя. В результате расчеты предварительного этапа становятся доступными для конструкторов общего профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пос. для вузов. Л.: Машиностроение, 1977. 600 с.
2. Ханков С. И. Теоретические основы теплового проектирования теплонагруженных узлов оптико-электронных систем. СПб: Малая оперативная полиграфия НТЦ им. Л.Т. Тучкова, 2002. 182 с.
3. Олейников Л. Ш. Криооптические системы. СПб: ИПК „КОСТА“, 2013. 352 с.
4. Ханков С. И. Возможности использования криогенных оптико-электронных систем для обнаружения астероидов // Вестник международной академии холода. 2014. № 1. С. 46—50.
5. Ханков С. И. Системы обеспечения тепловых режимов оптико-электронных приборов. Методы расчетов и испытаний // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2015. № 3. С. 136—147.
6. Баева Ю. В., Ханков С. И. Принципы выбора материалов для криооптических систем по совокупности теплофизических свойств // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2014. Вып. 2. С. 111—125.

7. Горянкин Г. С., Денисов Р. Н., Ермаков Б. С., Маркин В. А., Олейников Л. Ш., Останин В. И. Криооптические системы // Оптический журнал. 1994. № 1. С. 71—75.
8. Винокуров Д. К., Кукина Г. В., Мишин Г. С., Пронин Ю. С. Исследование теплового режима инфракрасного радиометра и выбор параметров системы обеспечения теплового режима // Космонавтика и ракетостроение. 2006. Т. 44, № 3. С. 137—143.
9. Бойцев А. В., Олейников Л. Ш., Сергеев А. О., Сигалов А. В., Ханков С. И. Оптимизация теплового режима криостата // Изв. вузов. Приборостроение. 1986. Т. 29, № 12. С. 78—81.
10. Романенко В. А., Тихонов С. В., Ягупова Н. К., Ханков С. И. Классификация тепловых моделей проточных систем криостатирования объектов на разных температурных уровнях // Инж.-физ. журн. 1989. Т. 56, № 4. С. 617—625.
11. Гальчук А. Б., Лавренчук С. В., Романенко В. А., Ханков С. И. Исследование проточного криостата с последовательным охлаждением объектов // Инж.-физ. журн. 1989. Т. 56, № 5. С. 760—767.
12. Окунев А. В., Олейников Л. Ш., Романенко В. А., Тихонов С. В., Ханков С. И. Расчет тепловой проводимости коаксиальной трубчатой опоры криостата // Изв. вузов. Приборостроение. 1989. Т. 32, № 7. С. 76—82.
13. Клубков А. Г., Романенко В. А., Ханков С. И. Методика оценки интенсивности теплообмена паров гелия в теплообменниках проточных систем криостатирования // Инж.-физ. журн. 1990. Т. 59, № 6. С. 1027—1028.
14. Романенко В. А., Ханков С. И. Оценка эффективности конвективного теплообмена некоторых газов в теплообменниках проточных систем криостатирования // Инж.-физ. журн. 1994. Т. 67, № 1—2. С. 180—181.
15. Дзитоев А. М., Ханков С. И. Методика оптимизации параметров криостатируемого экрана в криогенно-вакуумном стенде // Вестн. международной академии холода. 2014. № 1. С. 11—15.
16. Формозов Б. Н. Введение в криогенную микроэлектронику. СПб: Наука, 2001. 327 с.
17. Золотовская С. В., Молчанов А. С. Гелиевые криостаты для научных исследований. Основы конструирования. М.: МИФИ, 1991. 120 с.
18. Методы получения и измерения низких и сверхнизких температур: Справочник / Под ред. Б. И. Веркина. Киев: Наук. думка, 1987. 232 с.
19. Криогенная техника / Под ред. Б. И. Веркина. Киев: Наук. думка, 1985. 184 с.
20. Zeyen C. M. E., Chagnon R., Disdier F., Morin H. A helium-flow cryostat (3 to 300 K) for neutron four-circle spectrometry // Rev. Phys. Appl. (Paris). 1984. N 19. P. 789—791.
21. Babenko V. A. Flow and heat transfer in outlet pipes of cryostatting systems // J. of Engineering Physics and Thermophysics. 1992. Vol. 63, is. 6. December. P. 1176—1182.
22. Eroshenko V. M., Lubanovskii V. I., Yaskin L. A. Calculating drag and heat transfer in viscous, quasistable pipe flow of supercritical helium // J. of Engineering Physics and Thermophysics. 1983. Vol. 44, is. 3. March. P. 250—255.
23. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.
24. Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники. М.: Энергоатомиздат, 1985. 432 с.
25. Акулов Л. А., Борзенко Е. И., Новотельнов В. Н., Зайцев А. В. Теплофизические свойства криопродуктов: учеб. пособие для вузов. СПб: Политехника, 2001. 243 с.

Сведения об авторах

- Азамат Миронович Дзитоев** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского; преподаватель; E-mail: dzitoi8@gmail.com
- Евгений Владимирович Лаповок** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского; ст. научный сотрудник; E-mail: leva0007@rambler.ru
- Максим Михайлович Пеньков** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, начальник Академии; E-mail: vka@mil.ru
- Сергей Иванович Ханков** — д-р техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского; ст. научный сотрудник

Поступила в редакцию
21.10.19 г.

Ссылка для цитирования: Дзитоев А. М., Лаповок Е. В., Пеньков М. М., Ханков С. И. Методика определения удельного показателя тепловой эффективности проточного теплообменника // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 2. С. 170—177.

METHOD FOR DETERMINING THE SPECIFIC THERMAL EFFICIENCY INDEX OF A FLOW HEAT EXCHANGER

A. M. Dzitoev, E. V. Lapovok, M. M. Penkov, S. I. Khankov

Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: leva0007@rambler.ru

A method for determining the conditions of maximum efficiency of a helium vapor flow cryostat designed to maintain a predetermined temperature level of the lens of a cryogenic optoelectronic device is proposed. A mathematical model of the process of cryostatting object cooling with the use of a pipeline mounted on the surface of the object for a constant mass rate flow of helium vapors, is presented. The pipeline contact with the object surface is assumed to be ideal. It is shown that it is necessary to ensure full recovery of helium vapors with the pipeline for the most efficient cooling with a minimum flow rate of cryoagent. Requirements for the length of the pipeline providing full recovery in the heat exchanger are determined using preliminary calculated thermal efficiency per unit length of the pipeline. This specific index of thermal efficiency (SITE) of the flow heat exchanger is an objective criterion of the condition of full recovery. Analytical formulas for calculating the thermal efficiency index for laminar, transient, and turbulent regimes of helium vapor flow are derived. The formulas represent the dependences on the mass flow rate and the diameter of the pipeline accounting for the cryostatting temperature level. The efficiency and convenience of the obtained analytical dependences for practical calculations, as well as for the choice of parameters of flow cryostats are demonstrated.

Keywords: flow cryostat, cryogenic optoelectronic device, helium vapor cooling, cryostat temperature, recovery

REFERENCES

1. Miroshnikov M.M. *Teoreticheskiye osnovy optiko-elektronnykh priborov* (Theoretical Foundations of Optoelectronic Devices), Leningrad, 1977, 600 p. (in Russ.)
2. Khankov S.I. *Teoreticheskiye osnovy teplovogo proyektirovaniya teplonagruzhennykh uzlov optiko-elektronnykh sistem* (Theoretical Foundations of Thermal Design of Heat-Loaded Nodes of Optoelectronic Systems), St. Petersburg, 2002, 182 p. (in Russ.)
3. Oleynikov L.Sh. *Krioopticheskiye sistemy* (Cryooptic Systems), St. Petersburg, 2013, 352 p. (in Russ.)
4. Khankov S.I. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 2014, no. 1, pp. 46–50. (in Russ.)
5. Khankov S.I. *Voprosy Radioelektroniki. Seriya: Tekhnika Televideniya*, 2015, no. 3, pp. 136–147. (in Russ.)
6. Baeva Yu.V., Khankov S.I. *Voprosy Radioelektroniki. Seriya: Tekhnika Televideniya*, 2014, no. 2, pp. 111–125 (in Russ.)
7. Goryankin G.S., Denisov R.N., Ermakov B.S., Markin V.A., Oleynikov L.Sh., Ostanin V.I. *Journal of Optical Technology*, 1994, no. 1, pp. 71–75.
8. Vinokurov D.K., Kukina G.V., Mishin G.S., Pronin Yu.S. *Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2006, no. 3(44), pp. 137–143.
9. Boytsev A.V., Oleynikov L.Sh., Sergeev A.O., Sigalov A.V., Khankov S.I. *Journal of Instrument Engineering*, 1986, no. 12(29), pp. 78–81. (in Russ.)
10. Romanenko V.A., Tikhonov S.V., Yagupova N.K., Khankov S.I. *Journal of Engineering Physics*, 1989, no. 4(56), pp. 617–625. (in Russ.)
11. Galchuk A.B., Lavrenchuk S.V., Romanenko V.A., Khankov S.I. *Journal of Engineering Physics*, 1989, no. 5(56), pp. 760–767. (in Russ.)
12. Okunev A.V., Oleynikov L.Sh., Romanenko V.A., Tikhonov S.V., Khankov S.I. *Journal of Instrument Engineering*, 1989, no. 7(32), pp. 76–82. (in Russ.)
13. Klubkov A.G., Romanenko V.A., Khankov S.I. *Journal of Engineering Physics*, 1990, no. 6(59), pp. 1027–1028. (in Russ.)
14. Romanenko V.A., Khankov S.I. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1994, no. 1-2(67), pp. 180–181. (in Russ.)
15. Dzitoyev A.M., Khankov S.I. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 2014, no. 1, pp. 11–15. (in Russ.)
16. Formozov B.N. *Vvedeniye v kriogennuyu mikroelektroniku* (Introduction to Cryogenic Microelectronics), St. Petersburg, 2001, 327 p. (in Russ.)
17. Zolotovskaya S.V., Molchanov A.S. *Geliyevyye kriostaty dlya nauchnykh issledovaniy. Osnovy konstruirovaniya* (Helium Cryostats for Scientific Research. Design Basics), Moscow, 1991, 120 p. (in Russ.)

18. Verkin B.I., ed., *Metody polucheniya i izmereniya nizkikh i sverkh nizkikh temperatur* (Methods of Obtaining and Measuring Low and Ultra-Low Temperatures), Kyiv, 1987, 232 p. (in Russ.)
19. Verkin B.I., ed., *Kriogennaya tekhnika* (Cryogenic Technique), Kyiv, 1985, 184 p. (in Russ.)
20. Zeyen C.M.E., Chagnon R., Disdier F., Morin H. *Rev. Phys. Appl.* (Paris), 1984, no. 19, pp. 789–791.
21. Babenko V.A. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1992, no. 6(63), December, pp. 1176–1182.
22. Eroshenko V.M., Lubanovskii V.I., Yaskin L.A. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1983, no. 3(44), March, pp. 250–255.
23. Dul'nev G.N., Semyashkin E.N. *Teploobmen v radioelektronnykh apparatakh* (Heat Transfer in Electronic Devices), Leningrad, 1968, 360 p. (in Russ.)
24. Malkov M.P., Danilov I.B., Zel'dovich A.G., Fradkov A.B. *Spravochnik po fiziko-tekhnicheskim osnovam kriogeniki* (Handbook of the Physical and Technical Foundations of Cryogenics), Moscow, 1985, 432 p. (in Russ.)
25. Akulov L.A., Borzenko E.I., Novotel'nov V.N., Zaytsev A.V. *Teplofizicheskiye svoystva krioproductov* (Thermophysical Properties of Cryogenic Products), St. Petersburg, 2001, 243 p. (in Russ.)

Data on authors

- Azamat M. Dzitoev** — PhD; Mozhaisky Military Aerospace Academy, Lecturer;
E-mail: dzitoi8@gmail.com
- Evgeny V. Lapovok** — PhD; Mozhaisky Military Aerospace Academy; Senior Scientist;
E-mail: leva0007@rambler.ru
- Maxim M. Penkov** — Dr. Sci., Professor; Mozhaisky Military Aerospace Academy, Head of the Academy; E-mail: vka@mil.ru
- Sergey I. Khankov** — Dr. Sci.; Mozhaisky Military Aerospace Academy; Senior Scientist

For citation: Dzitoev A. M., Lapovok E. V., Penkov M. M., Khankov S. I. Method for determining the specific thermal efficiency index of a flow heat exchanger. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 2. P. 170—177 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-2-170-177