

Измерение теплопритоков вакуумных корпусов-криостатов инфракрасных матричных фотоприёмных устройств

Д. В. Маслов, В. Б. Куликов, А. Б. Барабанов

Представлен анализ нескольких модификаций калориметрического метода измерения теплопритоков вакуумных корпусов-криостатов инфракрасных матричных фотоприёмных устройств. Проведены измерения теплопритоков как с учётом, так и без учёта теплоёмкости отходящих паров азота. Проанализирован процесс теплообмена между отходящими парами азота и стенками колодца криостата. Показано, что наиболее достоверные результаты получаются при применении подхода с калибровкой.

Ключевые слова: вакуумный корпус-криостат, теплоприток, калориметрический метод.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-58-67

Введение

Вакуумные корпуса-криостаты (ВКК) являются составной частью инфракрасных охлаждаемых матричных фотоприёмных устройств. ВКК предназначены для размещения и охлаждения (термостатирования) фоточувствительных элементов фотоприёмных устройств, обеспечения приёма теплового излучения в заданном спектральном диапазоне и обеспечения электрического соединения фоточувствительных элементов с внешними цепями питания, управления и обработки сигналов.

Измерение теплопритоков ВКК является важной операцией, которую необходимо проводить для выбора подходящей микрокриогенной системы (МКС). Холодопроизводительность МКС должна быть больше теплопритока ВКК, который она должна охлаждать.

Теплоприток ВКК складывается из следующих компонентов:

- тепловыделение фотоприёмной матрицы;
- теплоприток за счет излучения материалов корпуса ВКК;
- теплоприток за счет теплопроводности гильзы-держателя и проводов, разваренных между охлаждаемым наконечником и гермовводами ВКК;
- теплоприток за счет теплопроводности остаточных газов внутри ВКК.

Последний компонент начинает проявляться только при давлении внутри ВКК выше 10^{-4} мм рт. ст. [1]. Как правило, сразу после вакуумирования и герметизации давление внутри ВКК меньше 10^{-4} мм рт. ст., и теплоприток ВКК при выключенной фотоприёмной матрице определяется излучением материалов корпуса ВКК и теплопроводностью гильзы-держателя и проводов. Однако в процессе эксплуатации давление остаточных газов может возрасти и стать больше 10^{-4} мм рт. ст. за счет газовой выделенности и натекания атмосферных газов внутрь ВКК, что приведет к увеличению теплопритока (за счет теплопроводности остаточных газов). Для увеличения срока службы внутри ВКК помещается геттер, поглощающий основную часть газов, поступающих внутрь ВКК. Прямое измерение точного значения давления внутри ВКК является непро-

Маслов Дмитрий Вадимович, нач. лаборатории, к.ф.-м.н.

E-mail: d.maslov@cyclone-jsc.ru

Куликов Владимир Борисович, нач. отдела, д.т.н.

Барабанов Антон Борисович, вед. инженер-конструктор.

АО «ЦНИИ «Циклон».

Россия, 107497, Москва, Щелковское ш., 77.

Статья поступила в редакцию 19 июля 2021 г.

© Маслов Д. В., Куликов В. Б., Барабанов А. Б., 2021

стой задачей; косвенно выводы об уровне вакуума можно сделать на основании результатов измерения теплопритока.

Чаще всего при измерении теплопритоков в качестве нормативного документа, действительного на территории РФ, используют РТМ-3-1033-77 (далее РТМ, [2]), разработанный более 40 лет назад. В основу метода положено измерение скорости испарения определённого количества жидкого азота, залитого в предварительно охлаждённый объём колодца ВКК. Для измерения скорости испарения азота в работе [2] используется ряд чередующихся мыльных плёнок, проходящих через мерный участок бюретки. С помощью секундомера измеряется время прохождения одной плёнкой мерного участка бюретки, соответствующего фиксированному количеству газообразного азота; помимо этого, измеряется температура отходящих паров на уровне верхнего среза горловины ВКК. Для расчёта теплопритока используется следующее выражение:

$$\dot{q} = \frac{m}{\tau} [r + \bar{C}(T - 77)] \quad (1)$$

где \dot{q} – измеряемый теплоприток, Вт; m – масса испарившегося азота, г; τ – время испарения азота массой m , с; r – скрытая теплота испарения азота, Дж/г; \bar{C} – средняя теплоёмкость азота в интервале температур 283–77 К, Дж/(г К); T – температура отходящих паров на уровне верхнего среза горловины криостата, К.

Для расчёта объёма бюретки, соответствующего фиксированному количеству испарившегося азота, нужно использовать уравнение состояния идеального газа.

Физический смысл уравнения (1) заключается в том, что тепло, подводимое к криостату, расходуется на испарение жидкого азота (представлено в уравнении (1) первым слагаемым) и нагрев паров азота выше температуры кипения жидкого азота (представлен в уравнении (1) вторым слагаемым).

Одним из серьёзных недостатков методики, представленной в [2], является её невысокая точность. Для получения более высокой точности измерений авторы патента [3] предложили вместо мыльной плёнки, бюретки и секундомера использовать электронный расходомер, проводящий измерение скорости ис-

парения азота в автоматическом режиме. Для расчёта теплопритока нужно использовать значение расхода G в момент времени стабильного испарения азота, но за 10–20 секунд до резкого уменьшения расхода, то есть фактически скорость испарения «последней капли». Данный способ измерения скорости испарения азота представляется более точным.

Важно отметить, что значение теплопритока, получаемое в работе [3] с использованием расходомера, включает в себя (аналогично РТМ) как теплоприток, расходуемый на испарение жидкого азота, так и теплоприток, идущий на нагрев паров азота выше температуры кипения жидкого азота, поскольку при расчёте теплопритока используется удельная энтальпия газообразного азота при температуре T на верхнем срезе колодца криостата.

Другим вариантом улучшения точности является использование электронных весов, способных проводить измерения и сохранять их результаты в автоматическом режиме.

Несмотря на свою востребованность, методика измерения теплопритоков на основе РТМ подвергается критике. Например, авторы работы [4] полагают, что величина теплопритока, полученная по формуле (1), является завышенной, и предлагают при расчёте теплопритока не использовать второе слагаемое уравнения (1), то есть не учитывать мощность, расходуемую на нагрев паров азота. При этом производители МКС при оценке холодопроизводительности МКС зачастую используют имитаторы ВКК, теплопритоки которых измерены с учётом нагрева отходящих паров азота [5]. Поэтому при конструировании фотоприёмных устройств на основе ВКК и МКС измерения теплопритоков ВКК и холодопроизводительности МКС могут проводиться фактически по разным методикам (без учёта и с учётом теплоёмкости отходящих паров).

Следует отметить, что сам РТМ содержит некоторую неопределённость, так как в пункте 4.4 говорится о том, что «допускается ... производить измерение теплопритоков без контроля температуры отходящих паров».

В зарубежной научно-технической литературе проблема измерения теплопритоков также активно обсуждается [6, 7]. В работе [4] ссылаются на опыт фирмы Ricog (Израиль) – мирового лидера в производстве МКС – который использует измеритель теплопритоков

собственного производства BS-4230, созданный на основе расходомера газообразного азота типа DFM26S-VADL4-B5A. Авторы работы [4] отмечают, что данный прибор измеряет расход азота, и на его основе рассчитывает теплоприток без учёта теплоёмкости отходящих паров азота.

Однако в работах [6, 7] указывается, что при измерении теплопритоков без учёта теплоёмкости отходящих паров также может возникать ошибка. Поэтому для измерения теплопритока предлагается использовать модифицированный калориметрический метод с калибровкой; в англоязычной литературе – метод *boil-off calorimetry with calibration*. В данном методе для измерения теплопритока используется имитатор ВКК, в котором вместо фотоприёмника размещён дополнительный источник тепла мощностью $\dot{q}_{\text{доп}}$ (сопротивление, через которое пропускается электрический ток). Таким образом, суммарный теплоприток равен сумме собственного теплопритока криостата $\dot{q}_{\text{стат}}$ (который требуется измерить) и теплопритока от дополнительного источника тепла $\dot{q}_{\text{доп}}$. Для проведения калибровки измеряется зависимость теплопритока $\dot{q}_{\text{изм}} = \frac{m}{\tau} r$, измеренного без учёта теплоёмкости отходящих паров, от мощности дополнительного источника тепла $\dot{q}_{\text{доп}}$. Аппроксимируя зависимость $\dot{q}_{\text{изм}}(\dot{q}_{\text{доп}})$ линейной функцией

$$\dot{q}_{\text{изм}}(\dot{q}_{\text{доп}}) = a \times \dot{q}_{\text{доп}} + b, \quad (2)$$

находят значения параметров a и b . Тогда значение собственного теплопритока криостата будет равно $\dot{q}_{\text{стат}} = b/a = \dot{q}_{\text{изм}}(\dot{q}_{\text{доп}} = 0)/a$. При этом параметр a – тангенс угла наклона зависимости $\dot{q}_{\text{изм}}(\dot{q}_{\text{доп}})$ – фактически является корректирующим коэффициентом, учитывающим влияние теплоёмкости отходящих паров. Если влияние теплоёмкости отходящих паров ничтожно мало, то $a = 1$. В дальнейшем для рабочих ВКК (не имитаторов) можно проводить измерения теплопритоков без проведения калибровки и без учёта теплоёмкости отходящих паров, а полученный результат нормировать на значение корректирующего коэффициента a .

Описанный метод измерения теплопритоков с применением калибровки позволил получить экспериментальные результаты, совпадающие с хорошей точностью с результатами моделирования, представленными в [7].

Вместе с тем остались неисследованные особенности взаимодействия паров азота со стенками колодца ВКК, а также вопрос о величине вклада данного взаимодействия в значение собственного теплопритока ВКК. Кроме того, в работах [6, 7] калибровка была применена только для единичного криостата.

Учитывая вышесказанное, цель настоящей работы состояла в проверке возможности подхода с применением калибровки для измерения теплопритоков и использования найденных параметров калибровки для криостатов внутри одной серии, а также в анализе процесса теплообмена между отходящими парами азота и стенками колодца ВКК и оценке влияния данного теплообмена на результаты измерения величины собственных теплопритоков ВКК.

Экспериментальные образцы и методы измерений

Для проведения измерений были подготовлены два имитатора ВКК. В качестве основы для имитаторов использовались ВКК [8], чертёж которых представлен на рис. 1. Внутри каждого имитатора ВКК на охлаждаемом наконечнике вместо фотоприёмника был размещён резистор номиналом 200 Ом. Через резистор пропускался ток от нуля до 50 мА. Падение напряжения на резисторе при этом изменялось от нуля до 10 В, что было эквивалентно подведению дополнительной тепловой нагрузки от нуля до 500 мВт внутрь криостата. Шаг изменения мощности дополнительной тепловой нагрузки составлял примерно 100 мВт. При каждом значении тепловой нагрузки производились измерения скорости испарения азота и температуры отходящих паров азота.

Для измерения скорости испарения азота использовались электронные весы ВК 150.1 (точность измерения 5 мг), на которые помещался имитатор ВКК после предварительного охлаждения и заливки азота на 10–15 мм выше дна колодца (согласно РТМ).

Для измерения температуры отходящих паров азота использовалась термопара «медь-константан», закреплённая на уровне верхнего среза колодца криостата. Усиление сигнала и компенсация температуры холодного спая термопары осуществлялись с помощью микросхемы AD8495; сигнал с выхода микросхемы подавался на вход калибратора-мультиметра Keithley 2400. Для расчёта исходного напряжения термопары показания мультиметра делились на коэффициент усиления микросхемы AD8495; для определения температуры использовалась градуировочная таблица.

Для автоматизации измерений веса и калибратор-мультиметр были подключены к компьютеру. Значения массы и температуры сохранялись на компьютере с временным шагом примерно 1 с.

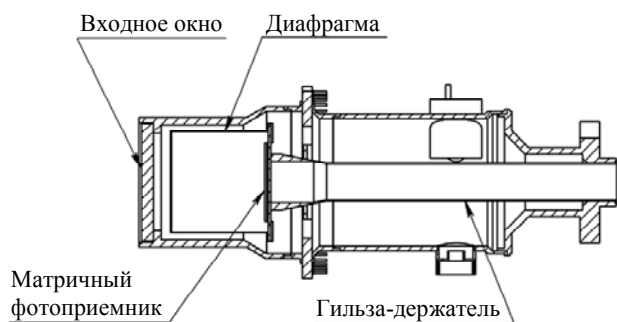


Рис. 1. Вакуумный корпус-криостат.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена типичная зависимость $\dot{q}_{изм}$ ($\dot{q}_{доп}$), полученная для одного из имитаторов ВКК. Результаты измерения теп-

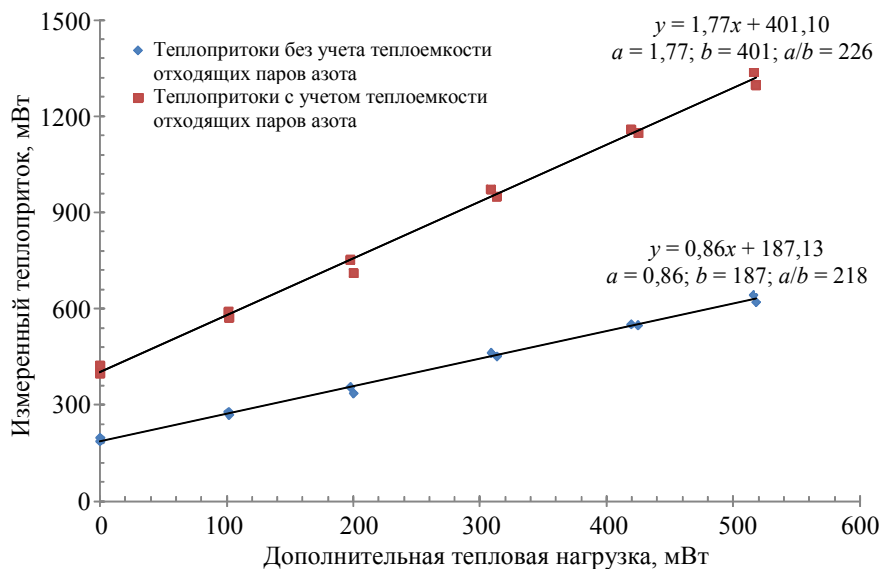


Рис. 2. Зависимости измеренных теплопритоков от мощности дополнительной тепловой нагрузки, подводимой к криостату.

лопритоков представлены как с учётом (по формуле (1)), так и без учёта теплоёмкости отходящих паров азота (по формуле $\dot{q}_{изм} = \frac{m}{\tau} r$).

Прежде всего, отметим, что обе зависимости $\dot{q}_{изм}$ ($\dot{q}_{доп}$) хорошо аппроксимируются прямой. Поэтому применение подхода с калибровкой для определения теплопритока представляется оправданным.

Значения теплопритоков, полученные без проведения калибровки, составляют 187 мВт (без учёта теплоёмкости отходящих паров азота) и 401 мВт (при учёте теплоёмкости отходящих паров азота). Обозначим данные значения теплопритоков $\dot{q}_{БК}^{БУТОП}$ и $\dot{q}_{БК}^{СУТОП}$ соответственно. После применения калибровки значения теплопритоков составляют 218 мВт и 226 мВт соответственно, то есть совпадают в пределах точности измерений. Далее будем обозначать значение теплопритока после калибровки $\dot{q}_{калибр}$ (в разделе Введение оно было обозначено как $\dot{q}_{стат}$).

Таким образом, применение калибровки практически полностью устраняет различия в результатах измерений теплопритоков с учётом и без учёта теплоёмкости отходящих паров. С практической точки зрения, измерение теплопритока без учёта теплоёмкости отходящих паров азота является более предпочтительным (особенно при серийном производстве), так как значительно проще, поскольку пропадает необходимость измерять температуру паров азота.

Значение теплопритока, полученное без проведения калибровки и без учёта теплоёмкости отходящих паров азота $\dot{q}_{\text{БК}}^{\text{БУТОП}}$, намного ближе к значению $\dot{q}_{\text{калибр}}$, чем значение $\dot{q}_{\text{БК}}^{\text{СУТОП}}$, полученное без проведения калибровки, но с учётом теплоёмкости отходящих паров азота. Можно предположить, что это связано с некорректным расчётом вклада в значение теплопритока теплоёмкости отходящих паров азота.

На рис. 3 представлены зависимости вклада в значение теплопритока теплоёмкости отходящих паров азота (слагаемое $\frac{m}{\tau}\bar{C}(T-77)$ из формулы (1)) и зависимости температуры на верхнем срезе колодца ВКК в момент полного испарения азота от мощности дополнительной тепловой нагрузки $\dot{q}_{\text{доп}}$, подводимой к криостату. Из данных рис. 3 видно, что величина $\frac{m}{\tau}\bar{C}(T-77)$ растёт линейно с подводимой тепловой нагрузкой. При этом температура на верхнем срезе колодца криостата при увеличении тепловой нагрузки немного уменьшается, что, на первый взгляд, противоречит физическим принципам, на ос-

новании которых получена формула (1).

Так как выражение $\frac{m}{\tau}\bar{C}(T-77)$ описывает нагрев паров азота за счёт теплопритока изнутри криостата, то при увеличении теплопритока должен происходить более интенсивный нагрев отходящих паров азота, приводящий, в свою очередь, к более высокой температуре на верхнем срезе криостата. Наблюдаемый же на рис. 3 рост величины $\frac{m}{\tau}\bar{C}(T-77)$ при увеличении тепловой нагрузки связан только с уменьшением времени испарения τ при увеличении тепловой нагрузки.

Для изучения процесса теплообмена между отходящими парами азота и стенками колодца ВКК был проведён эксперимент, в котором спай термопары поочередно размещали на разном расстоянии от дна колодца ВКК (глубина колодца ВКК составляет 70 мм), и регистрировали изменение массы и температуры от времени. При этом фиксировали положение термопары таким образом, чтобы она не касалась стенок колодца ВКК. Результаты данного эксперимента представлены на рис. 4 и 5.

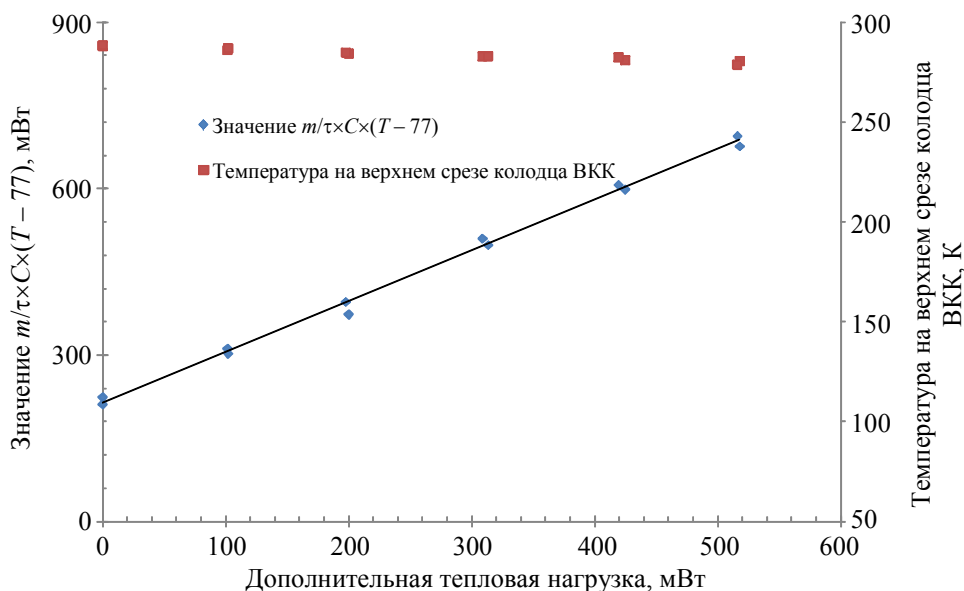


Рис. 3. Зависимости величины $\frac{m}{\tau}\bar{C}(T-77)$ и температуры в момент полного испарения азота на верхнем срезе колодца ВКК от мощности дополнительной тепловой нагрузки, подводимой к криостату.

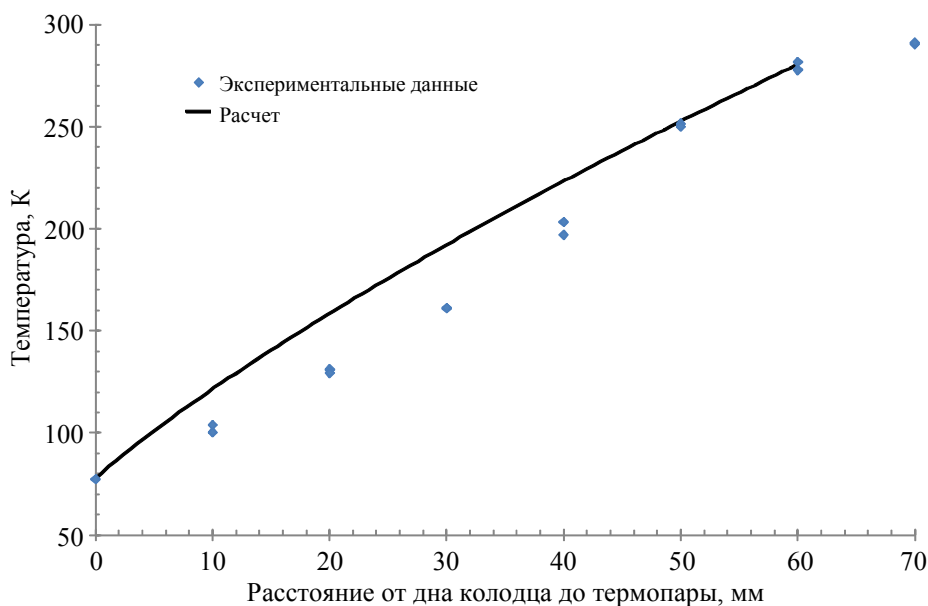


Рис. 4. Зависимость температуры в момент полного испарения азота в зависимости от положения термопары. Точки – экспериментальные данные; сплошная кривая – результат расчета распределения температуры по гильзе в квазистационарном режиме в отсутствие взаимодействия с парами азота (см. текст). Глубина колодца криостата 70 мм.

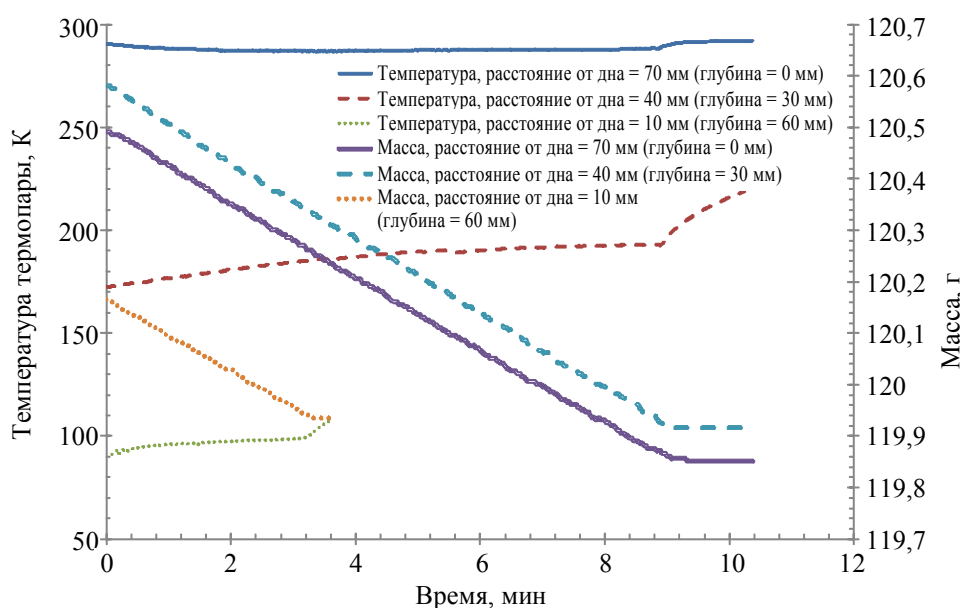


Рис. 5. Зависимости температуры термопары и массы криостата с азотом от времени при разных положениях термопары. Глубина колодца криостата 70 мм.

На рис. 4 приведена зависимость температуры (в момент полного испарения азота) от места крепления термопары, из которого следует, что чем ниже крепится термопара, тем меньше её температура в момент полного испарения азота. На рис. 5 приведены графики изменения массы и температуры от времени при разных положениях термопары.

Полученные на рис. 4 и 5 результаты можно объяснить следующим образом. В слу-

чае размещения термопары глубоко внутри колодца ВКК сразу после заливки жидкого азота термопара резко охлаждается. После опускания уровня азота ниже спая термопары, начинается её плавный нагрев за счёт теплообмена с парами испаряющегося азота, которые, в свою очередь, нагреваются за счёт взаимодействия со стенками колодца ВКК (при этом нагрев стенок происходит главным образом за счёт теплопритока изнутри криостата).

После полного испарения азота нагрев пространства внутри колодца ВКК происходит в основном уже за счёт теплообмена с воздухом (имеющим температуру, близкую к температуре окружающей среды), что приводит к резкому росту температуры термопары и увеличению скорости её нагрева.

В случае, когда термопара крепится на уровне верхнего среза криостата (или не очень глубоко внутри колодца ВКК), то её температура изначально примерно равна комнатной. После заливки жидкого азота происходит незначительное охлаждение до некоторого квазистационарного уровня, при котором воздействие «холодных» паров азота и «тёплого» воздуха окружающей среды компенсируют друг друга. После полного испарения азота (так же, как и в случае глубокого погружения термопары в колодец ВКК) происходит скачкообразный рост температуры термопары за счёт теплообмена с воздухом.

Отсюда становится понятным, почему при увеличении тепловой нагрузки ВКК температура на верхнем срезе колодца ВКК в момент полного испарения азота немного уменьшается (см. рис. 3) – при увеличении тепловой нагрузки скорость испарения и, соответственно, поток «холодного» азота через верхний срез колодца увеличиваются, что приводит к более сильному охлаждению термопары.

Таким образом, температура T на верхнем срезе колодца криостата в момент полного испарения азота определяется, прежде всего, температурой окружающей среды. Поэтому очевидно, что использование формулы (1) является некорректным и будет давать завышенные значения теплопритоков.

Однако при этом важно обратить внимание на факт взаимодействия паров азота со стенками колодца ВКК. Прежде всего, это следует из нагрева паров азота по мере их движения вверх (точки на рис. 4).

Другим моментом, указывающим на взаимодействие паров азота со стенками колодца, является форма профиля температуры вдоль гильзы ВКК (см. рис. 4). Сплошной кривой изображен профиль, полученный путем решения одномерного стационарного уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (3)$$

с граничными условиями $T(x = 0) = 77,4 \text{ К}$ – температура кипения жидкого азота, $T(x = 60) = 280 \text{ К}$ – значение температуры, измеренное в момент полного выкипания азота при погружении термопары в колодец на глубину 10 мм (60 мм от дна). Левая граница при моделировании была аналогом дна колодца в момент полного выкипания азота; правая – точкой, отстоящей на 60 мм от дна колодца. Такой выбор правой границы был обусловлен тем, что температурный профиль в верхней части колодца ВКК в значительной степени определяется влиянием окружающего воздуха. Распределение температуры рассчитывалось с учетом зависимости теплопроводности k от температуры; использовались данные теплопроводности нержавеющей стали 304 [9, 10]. Из рис. 4 видно, что распределение температуры вдоль гильзы ВКК при отсутствии взаимодействия с окружающей средой должно быть выпуклой функцией – вторая производ-

ная $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ меньше нуля. Такой профиль обусловлен тем, что теплопроводность k нержавеющей стали растет при увеличении температуры. Однако полученный экспериментально с помощью термопары профиль (по крайней мере, до расстояния 50 мм от дна) является вогнутым – вторая производная $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$

больше нуля. Такое различие может быть объяснено только значительным взаимодействием паров азота со стенками колодца ВКК после испарения.

Отметим, что температурный профиль, измеренный с помощью термопары в парах азота, не является полностью идентичным температурному профилю гильзы. Однако если предположить, что коэффициент теплоотдачи стенок колодца постоянен по всей глубине колодца ВКК, то форма температурного профиля (его вогнутость/выпуклость) не должна зависеть от места измерения (непосредственно на стенках колодца или в парах азота). Кроме того, аналогичный (вогнутый) профиль распределения температуры вдоль гильзы ВКК был получен в работе [6].

Обсуждаемое выше взаимодействие испаряющихся паров азота со стенками колодца криостата по мере их движения вверх происходит до испарения «последней капли» азота,

однако можно предположить, что в момент испарения «последней капли» также может происходить отличный от нуля теплообмен между стенками и парами азота. Насколько сильным будет этот теплообмен зависит от формы и размеров гильзы ВКК. Наиболее предпочтительным способом его учесть является применение калибровки.

Следующий важный вопрос: как сильно изменяется корректирующий коэффициент a внутри криостатов одного типа? Как уже было сказано выше, нами были изготовлены два

имитатора ВКК. С каждым из образцов было проведено несколько экспериментов по измерению теплопритоков в течение достаточно продолжительного времени. Если с течением времени обнаруживалось ухудшение вакуума (и, как следствие, рост теплопритоков), то заново проводились процедуры вакуумирования и герметизации ВКК.

Результаты измерений представлены в таблице. Относительно высокая погрешность измерений связана с использованием весов для измерения скорости испарения азота.

Таблица

Результаты измерения теплопритоков

№ измерения	a	$\dot{q}_{\text{БК}}^{\text{БУТОП}}$, мВт	$\dot{q}_{\text{калибр}} = b/a$, мВт
Криостат № 1			
1	0,93	209	226
2	0,88	251	286
3	0,85	366	432
4	0,86	187	218
5	0,85	189	223
Среднее	0,86		
Криостат № 2			
1	0,83	174	210
2	0,83	233	279
3	0,82	241	295
4	0,91	192	210
5	0,85	263	310
6	0,86	211	244
7	0,84	239	285
8	0,92	160	173
9	0,82	196	240
Среднее	0,85		

Примечание: a – корректирующий коэффициент из уравнения (2), $b = \dot{q}_{\text{БК}}^{\text{БУТОП}}$ – теплоприток, полученный без проведения калибровки без учёта теплоёмкости отходящих паров азота, $\dot{q}_{\text{калибр}} = \dot{q}_{\text{стат}} = b/a$ – теплоприток после калибровки.

Из таблицы видно, что корректирующий коэффициент a , учитывающий влияние теплоёмкости отходящих паров азота, оставался постоянным в пределах погрешности измерений. При этом важно отметить, что он практически не изменялся после изменения давления внутри ВКК и сопутствующего изменения теплопритоков.

Тот факт, что корректирующий коэффициент a остаётся постоянным для ВКК одного

типа независимо от уровня вакуума внутри каждого конкретного образца, позволяет применять подход с калибровкой для измерения теплопритоков рабочих ВКК внутри одной серии. На первом этапе требуется изготовить имитатор, с помощью которого определить корректирующий коэффициент a , зависящий от формы и размеров гильзы ВКК и учитывающий влияние теплоёмкости отходящих паров азота. Для упрощения процедуры калиб-

ровки измерения теплопритоков предпочтительнее проводить без учёта теплоёмкости отходящих паров. Далее для рабочих ВКК (не имитаторов) проводить измерения теплопритоков без проведения калибровки и без учёта теплоёмкости отходящих паров, а полученный результат нормировать на значение корректирующего коэффициента a .

Заключение

В работе проведён анализ процесса теплообмена между отходящими парами азота и стенками колодца ВКК. Было обнаружено, что учёт теплоёмкости отходящих паров, согласно РТМ, практически в два раза завышает значение теплопритока. При этом показано, что расчёт теплопритока без учёта теплоёмкости отходящих паров также является некорректным и даёт заниженные результаты (вероятнее всего, из-за наличия ненулевого теплообмена между стенками колодца ВКК и парами азота).

Применение калибровки позволяет получать более достоверные результаты. Практическая реализация данного подхода предполагает экспериментальное определение корректирующего коэффициента a с помощью имитатора ВКК с дальнейшим использованием данного коэффициента при измерениях теплопритоков на рабочих ВКК. Как было установлено, корректирующий коэффициент a

остаётся постоянным для ВКК одного типа независимо от уровня вакуума внутри каждого конкретного образца, что может быть использовано при измерениях теплопритоков ВКК при серийном производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пономаренко В. П., Трошкин Ю. С., Филатов А. В. // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 71.
2. Приёмники излучения криостатные. Метод определения теплопритоков на уровне 77 К. РТМ-3-1033-77.
3. Дерюгин М. В., Колесников А. М., Булаков И. Д. Патент RU 2332647. 2008.
4. Карпов В. В., Козырев М. Е., Кузнецов Н. С., Ильин А. С., Марущенко А. В., Никологорский С. В. // Контенант. 2015. Т. 14. № 3. С. 95.
5. Система микрокриогенная МСМГ-0,9А-0,35/65 (МКС-640-27). Технические условия. КВО.0751.000-01 ТУ.
6. Willems D., Garcia S., Arts R., Ligtenberg K., Vasse C. // Proc. of SPIE. 2019. Vol. 11002. P. 1100208.
7. Veprik A., Shlomovich B., Tuito A. // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9451. P. 945122.
8. Куликов В. Б., Маслов Д. В., Сабиров А. Р., Барабанов А. Б., Кацавец Н. И., Чалый В. П., Шуков И. В. // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 27.
9. Mann D. B. LNG materials & fluids: a user's manual of property data in graphic format – Boulder: U.S. National Bureau of Standards, 1977.
10. Touloukian Y. S. Thermophysical Properties of Selected Aerospace Materials: Part II: Thermophysical Properties of Seven Materials – West Lafayette: TEPAC/CINDAS, 1976.

PACS: 44

The heat leakage measurement of dewars for infrared detector arrays

D. V. Maslov, V. B. Kulikov, and A. B. Barabanov

Joint Stock Company “Central Scientific-Research Institute “Cyclone”
77 Schelkovskoe shosse, Moscow, 107497, Russia
E-mail: d.maslov@cyclone-jsc.ru

Received July 19, 2021

Consideration is given to the analysis of a number of implementation of calorimetry method of infrared detector array dewar's heat leakage measurements. The heat leakage measurements were made both with and without nitrogen vapor heat capacity consideration. The heat exchange process between nitrogen vapor and Dewar's well walls was analyzed. The most reliable results were achieved by means of approach with calibration.

Keywords: dewar, heat leakage, calorimetry.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-58-67

REFERENCES

1. V. P. Ponomarenko, Y. S. Troshkin, and A. V. Filatov, *Applied Physics*, No. 5, 71 (2007) [in Russian].
2. Cryostat radiation detector. Heat leakage measurement method at the level of 77 K. *Technical Guides-3-1033-77*.
3. M. V. Deryugin, A. M. Kolesnikov, and I. D. Burlakov, Patent RU 2332647. 2008.
4. V. V. Karpov, M. E. Kozirev, N. S. Kuznetsov, A. S. Ilyin, A. V. Marushenko, and S. V. Nikolgoroskiy, *Kontenant* **14**, 95 (2015).
5. *Micro cryogenic system MSMG-0.9A-0.35/65 (MKS-640-27). Full product specifications. KVO.0751.000-01 TU*.
6. D. Willems, S. Garcia, R. Arts, K. Ligtenberg, and C. Vasse, *Proc. of SPIE* **11002**, 1100208 (2019).
7. A. Veprik, B. Shlomovich, and A. Tuito, *Proc. of SPIE* **9451**, 945122 (2015).
8. V. B. Kulikov, D. V. Maslov, A. R. Sabirov, A. B. Barabanov, N. I. Katsavets, V. P. Chaly, and I. V. Shukov, *Applied Physics*, No. 3, 27 (2020) [in Russian].
9. D. B. Mann, *LNG materials & fluids: a user's manual of property data in graphic format* (U.S. National Bureau of Standards, Boulder, 1977).
10. Y. S. Touloukian, *Thermophysical Properties of Selected Aerospace Materials: Part II: Thermophysical Properties of Seven Materials* (TEPIAC/CINDAS, West Lafayette, 1976).