

Оптимальная толщина изоляционного слоя для обеспечения максимального теплопереноса при охлаждении металлической поверхности жидким азотом

С. В. Самойленков, В. И. Щербаков

В работе изучены особенности теплопереноса от металлической поверхности в жидкий азот через слой изоляции (например, полиимидного слоя) и границу её раздела с жидким азотом. Определены экспериментально и обоснованы теоретически оптимальные условия, отвечающие максимальному теплопереносу. Особенность процесса теплопереноса в системе «жидкий азот – слой изоляции – твердое тело» заключается в возможности пленочного кипения азота и низкой теплопроводности изоляторов на основе полимеров. Задача является практически значимой в криогенной технике, в частности, для оптимизации условий применения сверхпроводников в практических изделиях: токоограничивающих устройствах, кабелях, трансформаторах, двигателях и магнитах. Результаты работы могут оказаться полезны в других криогенных системах, где необходимо обеспечение эффективного охлаждения металлической поверхности жидким азотом.

Ключевые слова: теплоперенос, жидкий азот, изоляция, ВТСП-устройства.

Ссылка: Самойленков С. В., Щербаков В. И. // Прикладная физика. 2020. № 6. С. 68.

Reference: S. V. Samoilenkov and V. I. Shcherbakov, Applied Physics, No. 6, 68 (2020) [in Russian].

Введение

Для применения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в практически важных изделиях (кабелях, токоограничивающих устройствах, трансформаторах, двигателях, магнитных системах) важным аспектом является точное знание процессов теплопереноса от ВТСП-провода в охлаждающую среду, которой как правило является жидкий азот. Например, в случае токоограничивающих устройств и ВТСП-трансформаторов с эффектом токоограничения максимальная скорость охлаждения ВТСП-провода является ключевым требованием для обеспечения быстрого охлаждения токоограничивающего элемента после срабатывания устройства [1, 2].

ВТСП-провод более чем на 90 % состоит из металлов и сплавов, таких как хастеллой, нержавеющая сталь, медь, серебро, латунь и т. д. Керамический оксидный сверхпроводник присутствует внутри ВТСП-провода либо в виде жил диаметром порядка 10–20 мкм (ВТСП-провод первого поколения) [3], либо в виде покрытия толщиной 1–3 мкм (ВТСП-провод второго поколения) [4], занимая относительно небольшую площадь сечения. Внешняя поверхность ВТСП-провода всегда представляет из себя металл. В связи с этим, решение описанной выше задачи охлаждения фактически сводится к решению задачи теплопереноса от металлической поверхности в жидкий азот.

Процесс теплопереноса в жидкий азот является достаточно сложным и трудно моделируемым явлением, так как включает в себя не только теплопередачу в твердой и жидкой среде и конвекцию жидкого азота, но и процесс кипения жидкого азота. При этом процессы теплопереноса происходят в температурном градиенте, что существенно влияет на величины теплоемкости и теплопроводности материалов. Из литературы и криогенной практики известно, что теплоперенос от нагретого тела в жидкий азот можно кратно ускорить, если поверхность покрыта слоем, имеющим относительно низкую теплопроводность, например, слоем электроизоляции. Особенности процессов теп-

Самойленков Сергей Владимирович¹, ген. директор, к.х.н.

Щербаков Владимир Игоревич², в.н.с.

¹ ЗАО «СуперОкс».

Россия, 117246, Москва, Научный проезд, 20, стр. 2.

E-mail: ssv@superox.ru

² Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13.

Статья поступила в редакцию 22 октября 2020 г.

© Самойленков С. В., Щербаков В. И., 2020

лопереноса в этой системе приводят к тому, что добавление теплового барьера (а некоторые полимерные изоляционные материалы имеют на порядки более низкую теплопроводность, чем металлы) приводит не к уменьшению теплопотока, а к его увеличению.

Несмотря на очевидную практическую значимость, эта задача, на наш взгляд, пока не получила адекватного решения, так как появление дополнительного элемента в системе (слоя изоляционного материала) приводит к ещё большему усложнению модели. Например, в настоящий момент в литературе не существует данных, какая толщина слоя изоляции обеспечивает максимальную скорость охлаждения в зависимости от ключевых параметров: температуры, с которой начинается охлаждение, толщины и теплопроводности слоя изоляции. В настоящей работе мы предлагаем новое и простое решение для быстрой оценки условий эффективного теплопереноса в системе «жидкий азот – слой изоляции – твердое тело», которое удобно применять на практике для проектирования ВТСП-устройств. Выводы настоящей работы могут быть применены не только для охлаждения ВТСП-материалов, но и любых других металлических поверхностей.

Описание модели

Известно, что при увеличении разницы температур охлаждаемого твердого тела и жидкого азота процесс кипения последовательно проходит через пузырьковое кипение и кризис кипения (пленочное кипение), вследствие чего теплоперенос является в значительной степени нелинейным процессом. На рис. 1 приведены экспериментально определенные зависимости потока тепла от поверхности в жидкий азот от разницы между температурой поверхности и температурой жидкого азота (ΔT) (кривая 1 – [5], 2 – [6], 3 – [7]). Ранее было показано, что, отражая протекание описанных выше процессов, эффективность теплопереноса при росте ΔT сначала увеличивается, достигая максимального значения, которое составляет 120 000–140 000 Вт м⁻² при $\Delta T = 13$ К. Затем эффективность теплопереноса резко уменьшается за счет перехода к пленочному кипению азота. Минимальное значение около 5 000 Вт м⁻² устанавливается при ΔT около 27 К, после чего дальнейший рост температуры поверхности приводит лишь к медленному увеличению теплового потока и определяется в основном теплопереносом через сплошную газовую пленку азота на поверхности нагретого тела. Особенности этого поведения в применении к системе «жидкий азот – ВТСП-провод» рассмотрены авторами ранее [8].

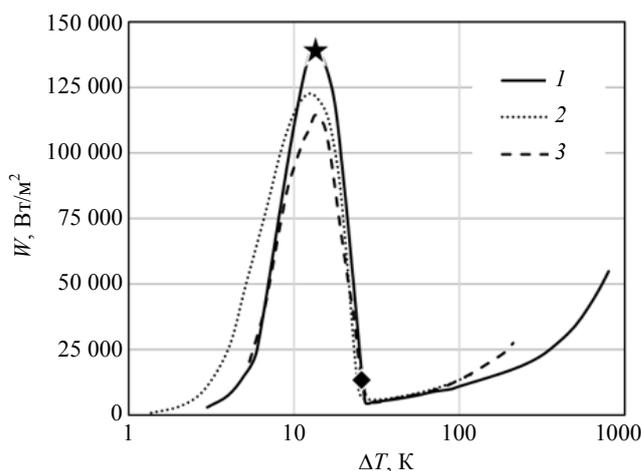


Рис. 1. Зависимость теплопереноса от нагретой поверхности в жидкий азот от разницы температур поверхности и жидкого азота по литературным данным (кривая 1 – [5], 2 – [6], 3 – [7]). Звездочкой отмечены условия максимального теплового потока, ромбом – начало резкого роста теплопотока при снижении температуры.

Тепловой барьер приводит к появлению в нем градиента температуры, что снижает температуру поверхности в контакте с жидким азотом и позволяет сдвинуть процесс в область небольших ΔT , что существенно повышает эффективность теплопереноса. В применении к сверхпроводникам, это поведение наблюдается для изолированных проводов. В частности, ВТСП-провода со слоем полиимидной изоляции охлаждаются азотом быстрее, несмотря на низкую теплопроводность полиимидного покрытия [7].

В дальнейшем рассмотрении мы используем следующие предпосылки:

- Жидкий азот находится при нормальном давлении и имеет температуру кипения 77 К.

- Твердое тело представляет из себя металл (основой ВТСП-провода являются металлы и сплавы [3, 4]) и его теплопроводность (около 10 Вт м⁻¹ К⁻¹) многократно превышает теплопроводность полимерных изоляционных материалов (около 0,1 Вт м⁻¹ К⁻¹). Можно принять, что для реализуемых потоков тепла температура T_{solid} распределена по объему твердого тела равномерно.

- Учитывая относительно малый объем изоляционного покрытия относительно объема и массы охлаждаемого тела, рассматриваемая модель не принимает во внимание теплоемкость самого изоляционного слоя.

- При наиболее эффективном теплопереносе тепловой поток через поверхность соприкосновения изоляции и жидкого азота равен максимально возможному, то есть, 120 000 Вт м⁻² согласно [6, 7].

Решим уравнение в отношении толщины слоя изоляции d_{max_q} , соответствующего макси-

мальному теплопереносу при начальной температуре твердого тела 300 К:

$$d_{\max_q} = \frac{k \cdot S \cdot (T_{\text{solid}} - T_{\text{boundary}})}{q} \quad (1)$$

где q – поток тепла ($120\,000 \text{ Вт м}^{-2}$); S – площадь контакта (1 м^2); k – коэффициент теплопроводности ($0,15 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$) – среднее значение теплопроводности полиимида в интервале от 77 до 300 К [10]), T_{solid} и T_{boundary} – температуры твердого тела и границы слоя изолятора с жидким азотом (300 К и 90 К, соответственно, т. к. «холодная» граница диэлектрического слоя должна быть на $\Delta T = 13 \text{ К}$ теплее азота [5–7]). Решая уравнение, получаем $d_{\max_q} = 0,263 \text{ мм}$.

По экспериментальным данным, минимальное время охлаждения наблюдалась для образцов с толщиной полиимидного покрытия 0,165 мм (наши данные), 0,150 и 0,225 мм [6] или толщиной эпоксидного покрытия 0,15 и 0,20 мм [7]. Таким образом, толщина слоя полиимидной изоляции, необходимая для наиболее быстрого охлаждения (обозначим эту толщину d_{\min_t}), находится в интервале 0,150–0,225 мм, т. е. в среднем можно считать, что $d_{\min_t} \approx 0,19 \text{ мм}$.

Рассчитанное значение толщины для максимального теплового потока d_{\max_q} примерно на 30 % больше, чем толщина, необходимая для достижения минимального времени охлаждения тела до 77 К, d_{\min_t} . Это объясняется тем, что для снижения времени охлаждения наиболее благоприятными являются скорее условия, когда начальный момент отвечает не максимуму зависимости (рис. 1, звездочка), а началу роста теплового потока через границу раздела при охлаждении (рис. 1, ромб). В этом случае, режим охлаждения в начальной стадии является «саморазгоняющимся» и последовательно проходит через все условия с высоким тепловым потоком порядка $100\,000 \text{ Вт м}^{-2}$ (этот режим соответствует диапазону примерно $10 \text{ К} < \Delta T < 27 \text{ К}$). В этом случае, интегрально процесс охлаждения происходит быстрее.

Обсуждение результатов

Исходя из представленных выше результатов, наилучшие условия для быстрого охлаждения покрытой изоляцией металлической поверхности от температуры T_{solid} до 77 К можно сформулировать следующим образом:

$$d_{\min_t} = \frac{0,7 \cdot k \cdot (T_{\text{solid}} - 90)}{120\,000} \quad (2)$$

Если эти условия не соблюдаются, то охлаждение происходит медленнее, а именно:

– Если толщина слоя изоляции меньше оптимальной, её поверхность не имеет возможности охладиться в начальный момент до оптимальной температуры, ΔT между азотом и поверхностью превышает 27 К и охлаждение провода начинается в заведомо неоптимальной области пленочного кипения, достигая оптимума только через некоторое время, когда постепенно понизится температура. Предельный случай этой ситуации – отсутствие слоя изоляции.

– Толщина слоя изоляции больше оптимальной: теплоизолирующий полимерный слой эффективно препятствует проникновению тепла из металла, ΔT между азотом и поверхностью изоляции в начальный момент времени ниже 27 К и максимальная скорость теплопереноса ($120\,000 \text{ Вт м}^{-2}$) реализуется либо недостаточно долго, либо не реализуется вообще (если ΔT в начальный момент меньше 13 К). Здесь стоит отметить, что наличие любого слоя с низкой теплопроводностью с неизбежностью приводит к увеличению времени охлаждения тела до 77 К, если начальная температура этого тела меньше 90 К, по сравнению с телом без покрытия.

Отметим достаточно универсальный характер сформулированного нами правила, который имеет большую практическую ценность для проектирования криогенных систем. Например, описанное поведение не зависит от толщины или массы охлаждаемого твердого тела, то есть, определяющим является именно толщина и теплопроводность изоляционного покрытия. По наличию характерного перегиба на временной зависимости температуры в ходе процесса охлаждения можно определить, является толщина слоя недостаточной или же, наоборот, избыточной относительно оптимального значения (рис. 2).

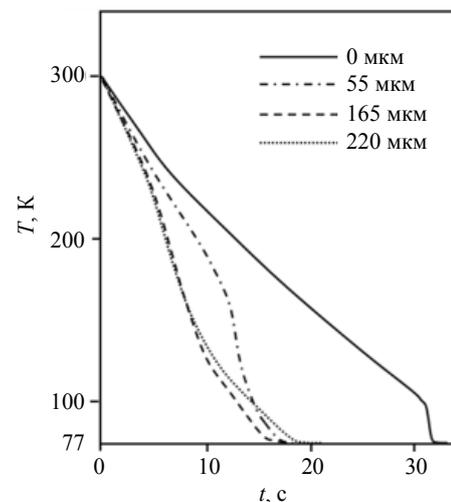


Рис. 2. Временная зависимость температуры охлаждаемой жидким азотом медной пластины (площадь $0,00095 \text{ м}^2$, масса 9,5 г) с полиимидными покрытиями разной толщины.

Из уравнения (2) также можно заметить, что оптимальное значение толщины слоя изоляции прямо пропорционально коэффициенту её теплопроводности k , а также разнице температур.

Пользуясь найденной закономерностью, определим толщину полиимидного покрытия, при которой реализуется максимальный тепловой поток d_{\max_q} при заданной температуре металла. Для выполнения этого расчета используем среднее значение коэффициента теплопроводности полиимида для каждого интервала температур по данным [10]. Результаты этого расчета представлены на рис. 3 в сравнении с экспериментальными результатами [6, 7]. Видно, что расчетные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными наблюдениями. (В данном случае, для сравнения нами выбрано значение d_{\max_q} , так как оно с достаточно большой точностью определяется в условиях эксперимента путем дифференцирования зависимости температуры от времени.)

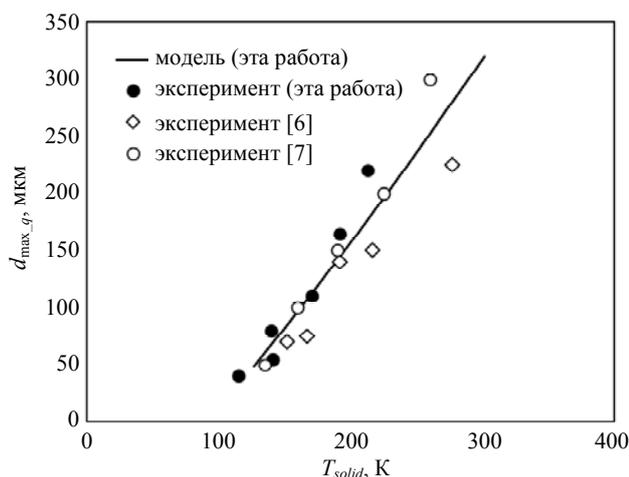


Рис. 3. Толщина слоя полиимидной изоляции, при которой реализуется максимальный теплопоток при заданной температуре металлической поверхности (линия). Символы – экспериментально определенные значения, соответствующие максимальному потоку тепла через границу раздела «полимерная изоляция – жидкий азот» по данным разных авторов.

Коррекции в описанные закономерности вносит зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, теплоемкость слоя изолятора и другие факторы, которые необходимо принимать во внимание при точном моделировании. Например, известно, что параметры теплопереноса (рис. 1) меняются при переохлаждении азота – в этом случае необходимо делать коррекцию также на значение максимального потока тепла q и другое значение ΔT , которому отвечает этот максимальный поток. То же самое можно отнести к случаю, когда в качестве хладагента используется не

азот, а другие сжиженные газы, например, водород или гелий.

Заключение

Нами разработана удобная для применения на практике модель, позволяющая определять оптимальную толщину слоя изолятора для увеличения теплопереноса от металлической поверхности в жидкий азот, а также оптимальные условия для наиболее быстрого охлаждения металлической поверхности жидким азотом. Полученные расчетным способом результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными [6, 7] и собственными данными авторов, что говорит о справедливости сделанных в нашей работе предположений.

*Работа выполнена при поддержке
Министерства образования и науки РФ
по соглашению № 075-11-2018-176.*

*Уникальный идентификационный номер проекта:
RFMEFI58818X0009.*

*Конфликт интересов: авторы заявляют,
что у них нет конфликта интересов.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Min Cheol Ahn, Dong Keun Park, Seong Eun Yang, Min Jae Kim, Ho-Myung Chang, Yong Soo Yoon, Bok-Yeol Seok, Jung-Wook Park, and Tae Kuk Ko // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. Vol. 17. № 2. P. 1859.
2. Yazdani-Asrami M., Staines M., Sidorov G., Eicher A. // Supercond. Sci. Technol. 2020. Vol. 33. № 9. P. 095014.
3. Sato K. // Superconductors in the power grid. – Woodhead Publishing Series in Energy, 2015. P. 75.
4. Samoilenkov S., Molodyk A., Lee S., Petrykin V., Kalitka V., Martynova I., Makarevich A., Markelov A., Mozykh M., Blednov A. // Supercond. Sci. Technol. 2016. Vol. 29. № 2. P. 024001.
5. Kozak S., Janowski T., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak J., Wojtasiewicz G. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2005. Vol. 15. P. 2098.
6. Hellmann S., Noe M. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014. Vol. 24. P. 0501605.
7. Jagga S., Vanapalli S. // Cryogenics. 2020. Vol. 109. P. 103114.
8. Самойленков С. В., Щербаков В. И., Кумаров Д. Р., Горбунова Д. А. // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. С. 28.
9. Rubeli T., Dutoit B., Martynova I., Makarevich A., Molodyk A., Samoilenkov S. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 171. P. 012123.
10. Ekin J. W. Experimental techniques for low-temperature measurements. – Oxford University Press, 2006.

The optimal thickness of insulation layer for the most efficient heat transfer from metal surface to liquid nitrogen

S. V. Samoilenkov^{1,2} and V. I. Shcherbakov¹

¹ SuperOx

Bd. 2, 20 Nauchnyi proezd, Moscow, 117246, Russia

² Joint Institute for High temperature of Russian Academy of Sciences

Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

Received October 22, 2020

We have studied peculiarities of heat transfer from metal surface to liquid nitrogen through the insulation layer (e.g., polyimide layer) and its boundary with liquid nitrogen. Optimal conditions for the most efficient heat transfer enabling rapid cooling were experimentally determined and theoretically explained. The unique feature of the heat transfer in “liquid nitrogen – insulation layer – solid” system is connected with the possibility of the film boiling of nitrogen and low heat conductivity of polymer insulators. This task is of significant importance for applied superconductivity and cryogenics, especially for use of high temperature superconducting wires in practical devices such as fault current limiters, cables, transformers, motors and magnets. Results can be useful in other cryogenic systems where efficient cooling of metal by liquid nitrogen is important.

Keywords: heat transfer, liquid nitrogen, insulation, HTS devices.

REFERENCES

1. Min Cheol Ahn, Dong Keun Park, Seong Eun Yang, Min Jae Kim, Ho-Myung Chang, Yong Soo Yoon, Bok-Yeol Seok, Jung-Wook Park, and Tae Kuk Ko, IEEE Trans. Appl. Supercond. **17**, 1859 (2007).
2. M. Yazdani-Asrami, M. Staines, G. Sidorov, and A. Eicher, Supercond. Sci. Technol. **33**, 095014 (2020).
3. K. Sato, *Superconductors in the power grid*. (Woodhead Publishing Series in Energy, 2015).
4. S. Samoilenkov, A. Molodyk, S. Lee, V. Petrykin, V. Kalitka, I. Martynova, A. Makarevich, A. Markelov, M. Moyzykh, A. Blednov, Supercond. Sci. Technol. **29**, 024001 (2016).
5. S. Kozak S., T. Janowski, B. Kondratowicz-Kucewicz, J. Kozak, G. Wojtasiewicz, IEEE Trans. Appl. Supercond. **15**, 2098 (2005).
6. S. Hellmann and M. Noe, IEEE Trans. Appl. Supercond. **24**, 0501605 (2014).
7. S. Jagga and S. Vanapalli, Cryogenics. **109**, 103114 (2020).
8. S. V. Samoilenkov, V. I. Shcherbakov, D. R. Kumarov, and D. A. Gorbunova, Tech. Phys. Lett. **46**, 23 (2020).
9. T. Rubeli, B. Dutoit, I. Martynova, A. Makarevich, A. Molodyk, and S. Samoilenkov, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. **171**, 012123 (2017).
10. J. W. Ekin, *Experimental techniques for low-temperature measurements* (Oxford University Press, 2006).