

УДК 536.248.2

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ТЕПЛОТДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕПЛОТДАЧУ К ЖИДКОМУ АЗОТУ

М. И. Делов, К. В. Куценко, А. А. Лаврухин

В работе изучена теплоотдача с поверхности высокотемпературных сверхпроводников к жидкому азоту. Исследовано влияние на характеристики теплообмена плотности теплового потока и ориентации теплоотдающей поверхности в поле силы тяжести. Показано, что коэффициент теплоотдачи в области развитого пузырькового кипения на двухсторонне охлаждаемой ленте имеет минимум при углах наклона, близких к 45° . Получены соотношения, описывающие зависимость коэффициента теплоотдачи от ориентации теплоотдающей поверхности.

Ключевые слова: ВТСП, жидкий азот, ориентация поверхности, пузырьковое кипение, кризис теплоотдачи, кривая кипения.

Введение. В настоящий момент в мире для нужд энергетики ведется большое количество разработок различных систем (генераторы, трансформаторы, токоограничители, накопители энергии и пр.) на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (ВТСП-2). Эти разработки позволят повысить эффективность производства и передачи электроэнергии, что положительно скажется на развитии энергетики.

Жидкий азот является основным хладагентом при работе с высокотемпературными сверхпроводниками, охлаждение устройств на основе ВТСП жидким азотом позволяет обеспечить их надежную тепловую стабилизацию. На характеристики теплообмена в жидком азоте влияет большое число различных факторов (давление, недогрев до температуры насыщения, геометрические и теплофизические характеристики теплоотдающей поверхности, ориентация в поле силы тяжести и т.д.). К настоящему моменту накоплено большое количество данных по теплообмену при кипении азота на различных

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31; e-mail: DelovMI@yandex.ru.

поверхностях нагрева [1], однако такие знания о кипении на подложках, используемых при производстве лент ВТСП-2, в литературе практически не представлены. При этом достоверные данные по теплообмену к жидкому азоту с подложек ВТСП-2 могут быть получены только в результате экспериментальных исследований.

Результаты экспериментов. Описание экспериментальной установки представлено в работе [2]. В качестве рабочих участков использовались ленты Ni-5at%W-evico-STANDARD, которые являются основой для производства ВТСП-2. Лента одновременно служила нагревателем и термометром сопротивления, разогрев осуществлялся за счет джоулева тепловыделения при пропускании через подложку постоянного тока. Эксперименты по исследованию теплообмена представлены в виде зависимости плотности теплового потока q от перегрева подложки относительно температуры азота ΔT (кривые кипения) для различных ориентаций подложки в поле силы тяжести с углами φ относительно вертикали $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ и 90° . Качественный характер кривых кипения в зависимости от угла ориентации теплоотдающей поверхности φ к нормали не меняется.

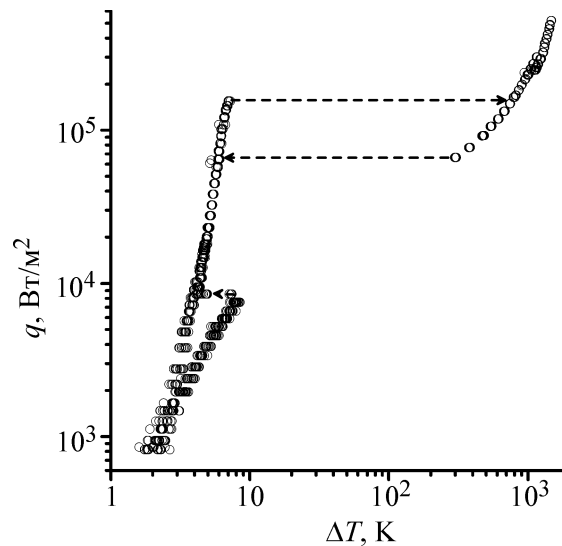


Рис. 1: Зависимость плотности теплового потока q от перегрева рабочего участка ΔT относительно температуры объема жидкости (кривая кипения) при вертикальной ориентации теплоотдающей поверхности ($\varphi = 0^\circ$).

На рис. 1 представлена кривая кипения жидкого азота при атмосферном давлении для вертикально ориентированной теплоотдающей поверхности. В режиме естественной конвекции экспериментальные данные хорошо согласуются с принятыми критериаль-

ными уравнениями [3].

На основании анализа наших экспериментальных данных для двухсторонне охлаждаемой ленты в области развитого пузырькового кипения получено следующее эмпирическое уравнение для коэффициента теплоотдачи α :

$$\alpha(\varphi) = A(\varphi) \cdot q^m,$$

$$A(\varphi) = A(\varphi = 0) \cdot (1 + d_1 \cdot \sin^2 \varphi + d_2 \cdot \sin^4 \varphi).$$

Значения коэффициентов равны $a_1 = -1.3$ и $a_2 = 1.4$. Показатель степени m практически не зависит от угла наклона и равен $m = 0.78 \pm 0.04$. Наименьшее значение A наблюдается при углах, близких к 45° (рис. 2).

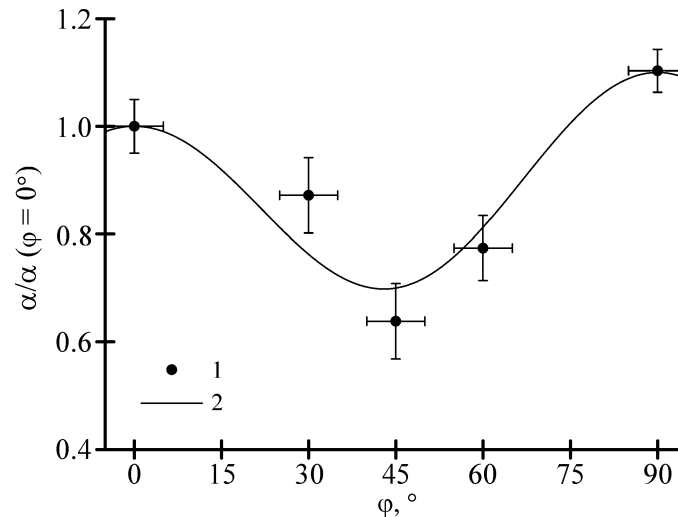


Рис. 2: Зависимость коэффициента теплоотдачи от ориентации теплоотдающей поверхности. 1 – экспериментальные точки, 2 – аппроксимация выражением $1 + a_1 \times \sin^2 \varphi + a_2 \sin^4 \varphi$.

Максимальное значение первого критического теплового потока q_{cr1} , т.е. потока, при котором поверхность покрывается паровой пленкой, достигается при вертикально ориентированной теплоотдающей поверхности (рис. 3). В закризисной области результаты расчета по формуле Д. А. Лабунцова [4] для вертикальной ориентации показывают хорошее согласие с экспериментальными данными вплоть до перегревов порядка 1000 К. Последующее улучшение теплоотдачи, по-видимому, объясняется механизмом уноса тепла за счет излучения.

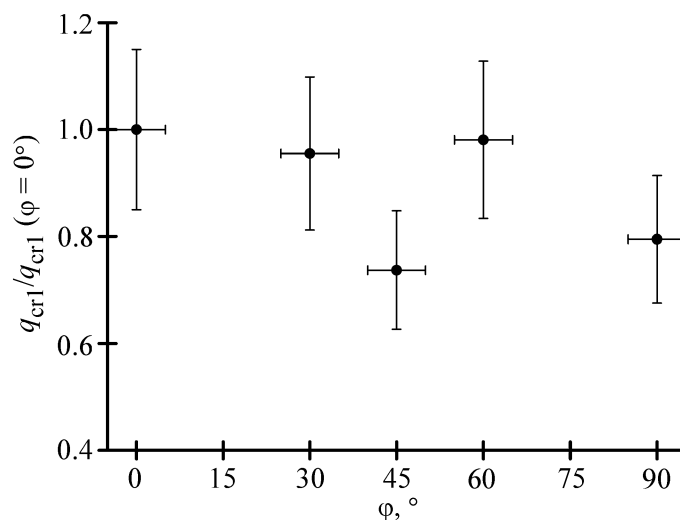


Рис. 3: Зависимость первого критического теплового потока от ориентации теплоотдающей поверхности.

Анализ результатов. В настоящее время отсутствуют какие-либо физические модели, позволяющие получить функциональную зависимость $\alpha(\varphi)$. Известны лишь несколько работ [1, 5, 6], в которых экспериментально исследовалось влияние угла наклона на теплоотдачу при кипении на плоских нагревателях с односторонним охлаждением.

Ухудшение теплоотдачи в области развитого пузырькового кипения при углах наклона, близких к 45° , можно объяснить влиянием двух конкурирующих процессов. Первый заключается в наличии жидкостного микрослоя большой площади, который образуется между обращенной вниз теплоотдающей поверхностью и прижатыми к ней паровыми пузырями. Испарение этого микрослоя приводит к интенсификации теплообмена и увеличению коэффициента теплоотдачи с нижней поверхности α_{\downarrow} . При уменьшении угла φ влияние этого эффекта быстро уменьшается. Второй эффект связан с интенсификацией теплоотдачи восходящими двухфазными потоками при вертикальной ориентации ленты (рис. 4), который ослабевает с увеличением угла. Рост коэффициента теплоотдачи с нижней поверхности α_{\downarrow} и уменьшение коэффициента теплоотдачи с верхней поверхности α_{\uparrow} при увеличении угла наклона φ приводит к появлению минимума в зависимости $\alpha(\varphi)$ (рис. 2).

Условия эвакуации пара для вертикальной теплоотдающей поверхности являются наилучшими и постепенно ухудшаются вплоть до горизонтального положения ленты.

Это объясняет максимум q_{cr1} при вертикальной ориентации ленты.

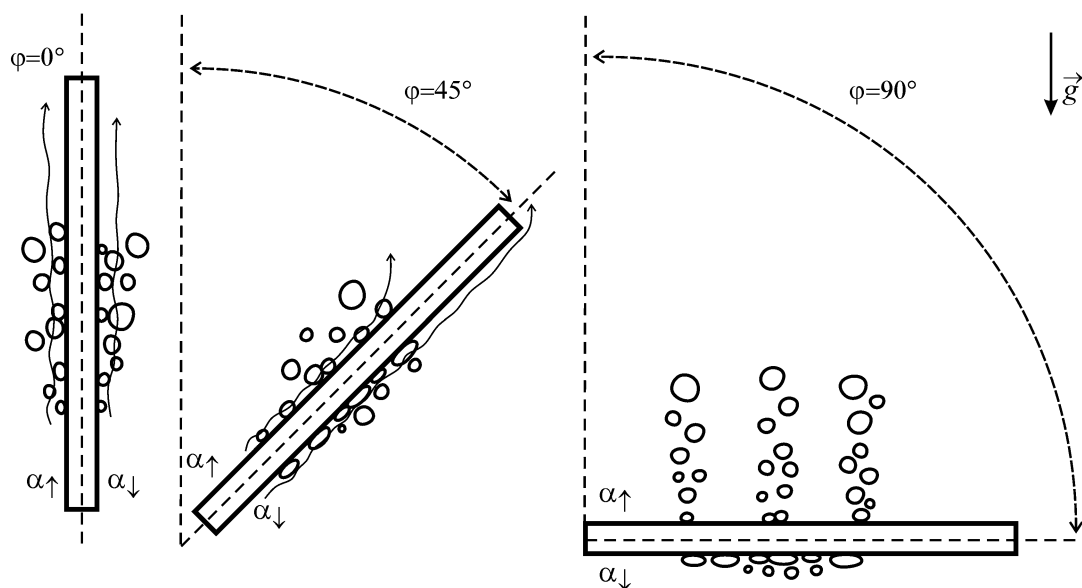


Рис. 4: Качественный характер кипения на двухсторонне охлаждаемой ленте при различной ориентации теплоотдающей поверхности.

Заключение. В работе показано, что на процесс теплоотдачи с поверхности высокотемпературных сверхпроводников к жидкому азоту влияет ориентация поверхности в поле силы тяжести. Коэффициент теплоотдачи в области развитого пузырькового кипения на двухсторонне охлаждаемой поверхности имеет минимум при углах наклона, близких к 45° . Тем самым, наилучшее охлаждение достигается при кипении на горизонтальных и вертикальных поверхностях.

Уменьшение критического теплового потока с ростом угла наклона говорит о наибольшем запасе до кризиса теплоотдачи при вертикальной ориентации ленты. Значительный рост температуры при переходе к пленочному кипению после кризиса теплоотдачи может приводить к разрушению сверхпроводниковых устройств.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ю. А. Кириченко, С. М. Козлов, К. В. Русанов, *Теплообмен при кипении азота и вопросы охлаждения высокотемпературных сверхпроводников* (Наук. думка, Киев, 1992).

- [2] V. I. Deev, K. V. Kutsenko, A. A. Lavrukhin, et al., *Cryogenics* **38**(7), 715 (1998).
- [3] О. Г. Мартыненко, Ю. А. Соковишин, *Свободно-конвективный теплообмен: Справочник* (Наука и техника, Минск, 1982).
- [4] Д. А. Лабунцов, *Теплоэнергетика* **5**, 60 (1963).
- [5] S. Ishigai, M. Kaji, T. Watanabe, and A. Yamaji, *Technol. Repts. Osaka Univ.* **27**, 485 (1977).
- [6] И. И. Берлин, В. В. Костюк, Х. С. Нурмухамедов и др., *Соврем. пробл. гидродинамики и теплообмена в элементах энерг. установок и криог. технике* **11**, 21 (1982).

Печатается по материалам III Международной молодежной научной школы-конференции "Современные проблемы физики и технологий", Москва, МИФИ, апрель 2014 г.

Поступила в редакцию 7 мая 2014 г.