

Д.А. Горяинов, В.Д. Гешеле, И.Л. Мостинский, И.П. Раскатов

Институт высоких температур РАН, Москва, Россия

ПОВЫШЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООТДАЧИ В ЗАКРИЗИСНОЙ ОБЛАСТИ С ПОМОЩЬЮ ЛУНОК

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование влияния системы сферических лунок на критические тепловые потоки и коэффициенты теплоотдачи при кипении пароводяной смеси в кольцевом канале в закризисной области. Полученные экспериментальные данные при сравнении со значениями $q_{кр}$ и с коэффициентами теплоотдачи α в гладком канале показали существенную роль лунок. Для теплоотдачи получена обобщающая зависимость в виде эмпирической формулы в безразмерных критериях.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема интенсификации теплообмена давно стоит перед исследователями и инженерами. Изобретено, исследовано и применяется на практике большое количество методов интенсификации теплоотдачи в каналах при течении в них как однофазных теплоносителей, так и двухфазных сред. Однако их применение в подавляющем большинстве случаев влечет за собой существенный рост гидравлического сопротивления, увеличивающий затраты на циркуляцию теплоносителя в рабочем контуре и часто делающий интенсификацию теплоотдачи неэкономичной.

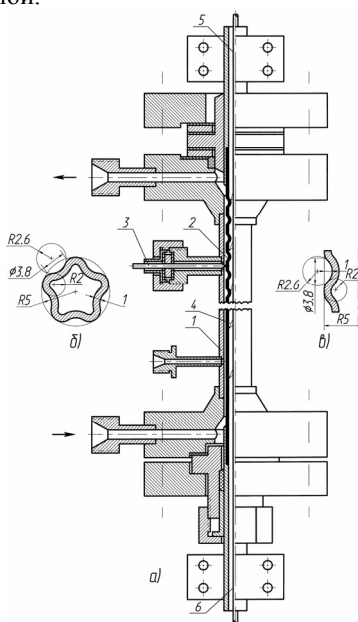


Рис. 1. Схема экспериментального участка (а), поперечный (б) и продольный (в) разрезы внутренней трубки по центрам лунок

В конце 80-х годов прошлого века внимание специалистов привлек эффект увеличения интенсивности теплоотдачи при обтекании жидкостью или газом теплообменной поверхности с выдавлен-

ными на ней сферическими углублениями, иначе называемыми «лунками». При обтекании потоком лунок в них самогенерируются вихревые течения в виде смерчей, нарушающие известную аналогию Рейнольдса между теплообменом и обменом импульсом. Проведенные исследования с однофазными потоками показали, что в этих условиях интенсивность теплоотдачи увеличивалась в 1,5–3 раза, тогда как гидравлическое сопротивление возрастало не так значительно, а иногда даже оставалось на прежнем уровне.

При кипении жидкости предельным тепловым потоком является критический, когда имеет место либо переход от пузырькового режима кипения к пленочному (кризис первого рода), либо, при дисперсно-кольцевом режиме обтекания стенки пароводяной смесью, кипящая на ней пленка жидкости высыхает вследствие недостаточной интенсивности орошения стенки летящими в потоке каплями (кризис второго рода). В первом случае температура стенки возрастает на сотни градусов, трубы разрушаются от потери прочности или прогорают. Во втором – кризис приводит лишь к умеренному повышению температур стенки (500–800 К), при которых возможна длительная работа испарительных поверхностей. Здесь смерчевые структуры, самогенерирующиеся в лунках, будут выбрасывать от стенки в поток перегретую паровую массу, а на ее место всасывать теплоноситель из пароводяного потока, содержащий капли. Это должно снизить температуру стенки, повысить надежность работы теплообменных поверхностей.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование кризисов кипения и интенсификации теплоотдачи с помощью сферических лунок к кипящей пароводяной смеси в закризисной области при вынужденном ее движении в кольцевом канале.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыты проводились на имеющемся в ИВТ РАН большом парогенерирующем стенде «Гамма». Тепловая мощность стенда – 500 кВт, теплоноситель – обессоленная вода, пароводяная смесь или перегретый пар. Предельные параметры теплоносителя: давление 25 МПа, температура 780 К, максимальный расход 250 кг/ч.

Экспериментальный участок (рис. 1, а) представлял собой кольцевой канал с постоянной гладкой наружной трубкой 1 диаметром 18/14 мм и сменной внутренней трубкой 2 диаметром 10/8 мм.

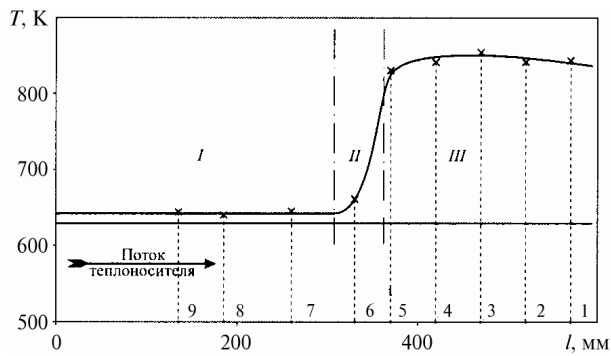


Рис. 2. Изменение температуры стенки трубки с лунками по всей длине (№2) с кризисом кипения в ее средней части и последующей закризисной областью; $P = 17,7$ МПа, $\rho w = 430$ кг/(м²·с), $q = 322$ кВт/м², $X_{вх} = 0,01$

Образованная этими трубками кольцевая щель имела ширину $\delta = 2$ мм. Во избежание контакта наружной и внутренней трубок на наружной крепились дистанционирующие электроизолированные штыри 3, установленные в трех сечениях по высоте экспериментального участка и фиксирующие трубку с трех сторон (через 120°) в каждом сечении. Измерение температуры стенки обогреваемой трубки производилось девятью хромель-копелевыми термопарами 4, вставлявшимися в виде двух жгутов 5 и 6 в полость внутренней трубки через ее верхний и нижний концы.

Лунки на внутренних трубках делались путем вдавливания подшипниковых шариков диаметром 4,8 мм. При этом получались лунки глубиной 1 мм с наружным диаметром около 4 мм с закругленными краями при радиусе закругления 2 мм. Поперечный и продольный разрезы стенки внутренней трубки по центрам лунок приведены на рис. 1, б, в. В исследованиях использовались пять типов внутренних трубок, конструктивные параметры которых приведены в табл. 1.

Методика проведения опытов стандартна. После вывода стенда на режим по давлению P , массовой скорости ρw и входному паросодержанию или относительной энтальпии $X_{вх}$ на входе в экспериментальный участок на него подавалась тепловая нагрузка q . Ее последовательное увеличение малыми ступенями, почти плавно, приводило сначала к появлению кризиса кипения (скачкообразный рост локальной температуры стенки) в конце трубки, а затем к передвижению кризиса по трубке навстречу потоку теплоносителя. При этом за кризисом оставалась так называемая закризисная область с высокой температурой стенки трубки $T_{ст}$. Эта область и являлась объектом настоящего исследования. Увеличение тепловой нагрузки на экспериментальном

Таблица 1. Типы и конструктивные размеры экспериментальных трубок

| №№ трубки | Тип трубки | Расположение лунок | Продольный шаг $S_{пр}$, мм | Поперечный шаг $S_{поп}$, мм | Длина гладкого участка $l_{гл}$, мм | Длина участка с лунками $l_{л}$, мм |
|-----------|-------------------------|--------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | Гладкая | — | — | — | 587 | — |
| 2 | С лунками по всей длине | коридорное | 6,0 | 6,3 | — | 600 |
| 3 | Комбинированная | коридорное | 6,0 | 6,3 | 344 | 250 |
| 4 | Комбинированная | коридорное | 12,0 | 6,3 | 331 | 256 |
| 5 | Комбинированная | шахматное | 6,0 | 5,2 | 330 | 256 |

участке производилось вплоть до достижения стенкой предельно допустимой температуры $T_{ст}^{max} = 850$ К. Распределение температуры стенки по длине трубки приобретало вид, изображенный на рис. 2.

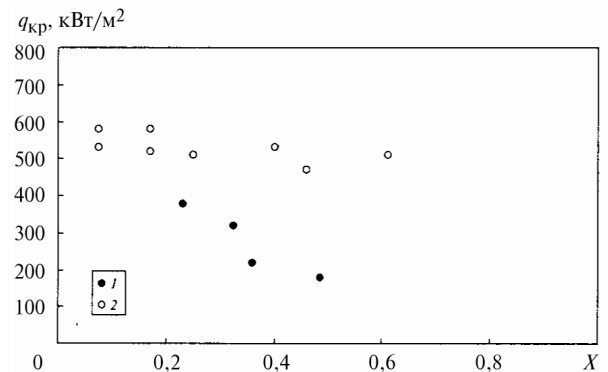


Рис. 3. Сравнение экспериментальных значений $q_{кр}$, полученных на гладкой трубке №1 (1) и на трубке с лунками №2 (2). $P = 19,7$ МПа, $\rho w = 550$ кг/(м²·с)

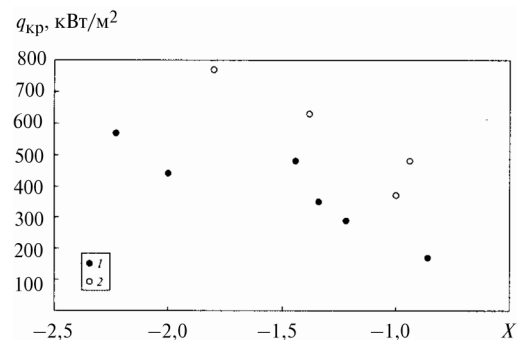


Рис. 4. Сравнение экспериментальных значений $q_{кр}$, полученных на гладкой трубке №1 (1) и на трубке с лунками №2 (2): $P = 21,7$ МПа, $\rho w = 350$ кг/(м²·с)

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследованиях [1, 2] было показано, что при пузырьковом кипении, где турбулизация потока и так чрезвычайно велика, удельный вклад лунок в теплоотдачу оказался практически незаметным. Кризис кипения должен затягиваться, а величина критического теплового потока $q_{кр}$ — возрастать. Приведенные в [1] экспериментальные данные подтвердили это предположение: кризис кипения в кольцевых каналах на трубке с лунками возникал при тепловых потоках $q_{кр}$ на 30–50% больше, чем на гладкой трубке, при низких давлениях ($P = 0,2$ МПа) и на 20–30% — при высоких ($P = 4 \div 9,8$ МПа). Однако это были отдельные точки.

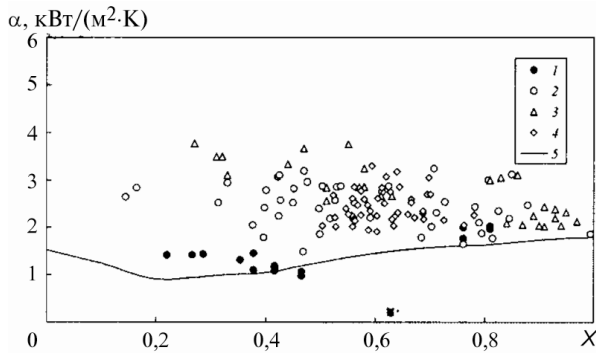


Рис. 5. Сравнение коэффициентов теплоотдачи α от гладкой трубки и трубок с лунками, расположенными в коридорном и шахматном порядке при продольном шаге $S_{пр} = 6$ мм; $P = 17,7$ МПа, $\rho w = 350$ кг/(м²·с): 1 – трубка №1; 2 – трубка №2; 3 – трубка №3; 4 – трубка №5; 5 – данные [3]

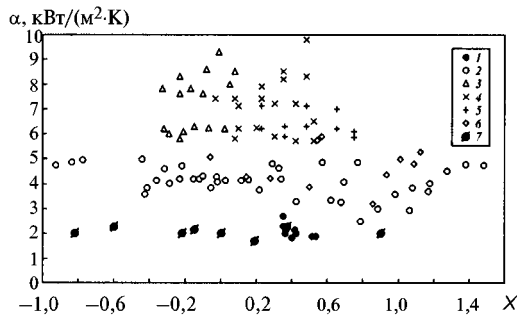


Рис. 6. Сравнение коэффициентов теплоотдачи α для трубок с лунками со значениями α для гладких трубок; $P = 21,7$ МПа: 1 – гладкая трубка №1, $q = 318 - 370$ кВт/м², $\rho w = 330 - 345$ кг/(м²·с); 2 – трубка №2, 411 – 762; 370 – 380; 3 – трубка №3, 350 – 480, 330 – 345; 4 – трубка №3, 550 – 630, 330 – 345; 5 – трубка №3, 722, 330 – 345; 6 – трубка №5, 260 – 415, 339 – 394; 7 – данные [4], 220 – 300, 400 – 480

Полученные в настоящей работе новые данные по $q_{кр}$, представленные на рис. 3–4, в виде зависимости от X при P и ρw в качестве параметров позволили при сравнении со значениями $q_{кр}$ для гладких трубок определять влияние лунок и протекающих в них смерчобразующих процессов на величину $q_{кр}$ практически в «чистом виде». На рис. 3 приведены экспериментальные данные по критическим тепловым потокам $q_{кр}$, полученные в опытах с гладкой трубкой №1 (точки 1) и с трубкой с лунками №2 (точки 2) при давлении $P = 19,7$ МПа и $\rho w = 550$ кг/(м²·с). Из рисунка следует, что заметная разница значений $q_{кр}$ при больших паросодержаниях X (до двукратной при $X = 0,5$) существенно сокращается при уменьшении паросодержания и при $X = 0,2$ составляет всего 40%.

При давлении 21,7 МПа в зоне положительных X кризис кипения практически вырождается, скачки температур при изменении режима кипения снижаются до 20–30 К. Поэтому в настоящей работе изучение критических тепловых потоков проводилось при больших недогревах воды ($X \leq -0,5$), где скачки температуры стенки превышали 50 К. Опыты в этих условиях (рис. 4) показали значительное – до двукратного – увеличение $q_{кр}$ для трубки с лунками, нанесенными по всей ее длине (№2).

Существенно большее влияние, чем на кризис кипения, оказали лунки на интенсивность теплоотдачи в закризисной области, где рост значений коэффициента теплоотдачи α на трубках с лунками достигал четырехкратного.

При определении коэффициентов теплоотдачи к пароводяной смеси в закризисной области обработке подвергались только точки, относящиеся заведомо к области III (рис. 2). Это наиболее высокие температуры $T_{ст}$, лежащие на верхнем плато. Им соответствуют наименьшие устойчивые значения коэффициентов теплоотдачи, представляющие наибольший практический интерес.

На рис. 5 приведены экспериментальные значения α при $P = 17,7$ МПа и $\rho w = 350$ кг/(м²·с), полученные на поверхностях с лунками трубок №2 и №3. Здесь же приведены и значения α для гладкой трубки. И хотя последние соответствуют несколько большей массовой скорости $\rho w = 510$ кг/(м²·с), отвечающие им значения α оказываются в 1,5–2 раза меньше, чем для трубок с лунками. Примерно такое же различие наблюдается при сравнении полученных значений α с данными скелетной таблицы [3].

На рис. 6 приведены значения α , полученные при $P = 21,7$ МПа и $\rho w = 350$ кг/(м²·с) для гладкой трубки №1 (точки 1) и для трубок с лунками №2, №3 и №5 (точки 2, 3, 4, 5, 6), а также точки 7 для гладкой трубки цилиндрического канала [4].

В дополнение к экспериментам с основными трубками (№1, №2 и №3) были проведены опыты еще на двух типах комбинированных трубок: с увеличенным в 2 раза продольным шагом лунок при коридорном их расположении (№4) и с расположением их в шахматном порядке (№5). Значения α для трубок №1, №2, №4 и №5 при давлении $P = 19,7$ МПа и массовой скорости $\rho w = 550$ кг/(м²·с) представлены на рис. 7. Хорошо видно снижение величины α при увеличении продольного шага лунок в 2 раза для трубки №4 (точки 3). Такое снижение эффекта лунок с увеличением продольного шага является закономерным – аналогичная зависимость локальных значений α от расстояния лунки наблюдалась в работе [5], авторы которой специально определяли локальные значения коэффициента теплоотдачи на участке между лунками.

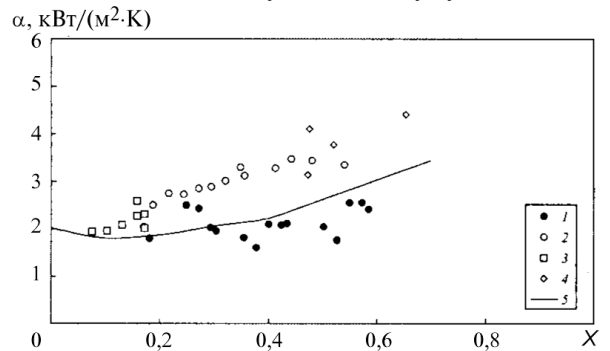


Рис. 7. Сравнение коэффициентов теплоотдачи α для трубок №1, №2, №4 и №5; $P = 19,7$ МПа, $\rho w = 550$ кг/(м²·с): 1 – трубка №1; 2 – трубка №2; 3 – трубка №4; 4 – трубка №5; 5 – данные [3]

Переход к шахматному расположению лунок не дал сколько-нибудь заметного изменения α по

сравнению с трубкой №2, т.е. имеющей коридорное расположение лунок с тем же продольным шагом.

Итак, все приведенные на рис. 5–7 экспериментальные данные во всем исследованном диапазоне параметров демонстрируют существенную интенсификацию теплоотдачи сферическими лунками. Коэффициент теплоотдачи от поверхности с лунками превышал аналогичный для гладкой трубки в 1,5–4 раза.

4. ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОТДАЧИ ЛУНКАМИ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ

При рассмотрении известных методов обобщения данных по теплоотдаче был выбран наиболее подходящий метод З.Л. Миропольского [6], использованный им для описания теплоотдачи при кипении воды и пароводяной смеси в гладких трубках в закризисной области. Влияние на теплоотдачу продольного расстояния между лунками предлагается описывать безразмерным критерием $S_{пр}/(10d_{л})$, полученным при анализе данных настоящего исследования с учетом физического эксперимента [5]. Число 10 в знаменателе отражает скорое (заведомо менее 10 калибров лунки) затухание смерчевых структур. Для учета влияния на коэффициент теплоотдачи шага расположения лунок на поверхности была получена единая зависимость вида $\alpha \sim [S_{пр}/(10d_{л})]^n$ для всех исследованных давлений и массовых скоростей, где $n = -0,6 (\rho''/\rho')^{0,8}$ – зависящий от давления показатель степени.

Сильное изменение свойств перегретого пара при удалении от линии насыщения учитывается введением в формулу множителя $(\Delta T/T_s)^m$. Для всех трех давлений и массовых скоростей была получена единая зависимость: $\alpha \sim (\Delta T/T_s)^{-0,56}$.

В итоге обобщающая формула приняла следующий вид:

$$\begin{aligned} Nu &= 3,9 \cdot 10^{-3} Re^{0,8} Pr_{ст}^{0,8} \times \\ &\times \left[1 - 0,1(\rho''/\rho' - 1)^{0,4} (1 - X)^{0,4} \right] \times \\ &\times (\Delta T/T_s)^{-0,56} \left[S_{пр}/(10d_{л}) \right]^{-0,6 (\rho''/\rho')^{0,8}}. \end{aligned} \quad (1)$$

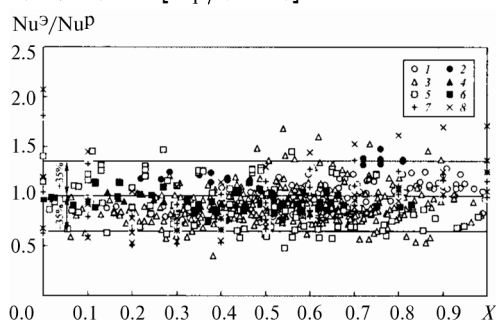


Рис. 8. Сравнение полученных экспериментальных данных с расчетом по формуле (1):

1 – $P = 17,7$ МПа, трубка с лунками; 2 – $P = 17,7$ МПа, гладкая трубка; 3 – $P = 19,7$ МПа, трубка с лунками; 4 – $P = 19,7$ МПа, гладкая трубка; 5 – $P = 21,7$ МПа, трубка с лунками; 6 – $P = 21,7$ МПа, гладкая трубка; 7 – круглая трубка, $d = 10$ мм, $P = 18$ МПа [3]; 8 – круглая трубка, $d = 10$ мм, $P = 20$ МПа [3]

Она обобщает данные по теплоотдаче только к пароводяному потоку ($0 < X < 1$). Сравнение расчетов по формуле (1) с данными настоящего исследо-

вания приведено на рис. 8. Около 93% экспериментальных точек лежат в полосе с разбросом $\pm 35\%$.

На этом же рисунке нанесены точки для трубок диаметром 10 мм из скелетной таблицы [3], взятые при давлениях 18 и 20 МПа и массовых скоростях 200 и 500 кг/(м²·с). Как и следовало ожидать, разброс этих точек оказался несколько большим.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Использование лунок на поверхностях, работающих в закризисной области, привело к увеличению:
 - критических тепловых потоков от 40% до двукратного;
 - коэффициентов теплоотдачи в 1,5–4 раза.
2. Получена обобщающая формула для расчета теплоотдачи в закризисной области к пароводяной смеси ($X > 0$) при давлениях 18–22 МПа.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- d – диаметр, мм;
 l – длина, мм;
 P – давление, МПа;
 q – плотность теплового потока, кВт/м²;
 S – шаг лунок, мм;
 T – температура, К;
 w – массовая скорость, кг/(м²·с);
 X – относительная энтальпия теплоносителя; при $0 < X < 1$ – массовое расходное паросодержание потока;
 Nu – число Нуссельта;
 Pr – число Прандтля;
 Re – число Рейнольдса;
 α – коэффициент теплоотдачи, кВт/(м²·К);
 δ – ширина кольцевого зазора, мм;
 Δ – разность величин;
 ρ – плотность, кг/м³.
 Индексы:
 гл – гладкий;
 кр – критический;
 л – лунки;
 пр – продольный;
 ст – стенка;
 max – максимальный;
 s – насыщение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кикнадзе Г.И., Крючков И.И., Чушкин Ю.В. Кризис теплоотдачи при самоорганизации смерчеобразных структур в потоке теплоносителя. Препринт ИАЭ–4841/1. М.: ЦНИИАтоминформ, 1989. 29 с.
2. Kiknadze G.I., Gachechiladze I.A., Alekseev V.V., Chushkin Yu.V. Boiling under conditions of selforganised tornado-like jets on moulded surfaces passed around with liquid or two-phase heat carrier // Proc. of Int. Symp. on the Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation. Moscow, Russia, 1997. P. 483–490.
3. Скелетная таблица для коэффициента теплоотдачи в закризисной области при течении воды в трубе. (Версия 1997 года) / А.Д. Ефанов, П.Л. Кириллов, И.П. Смогалева и др. // Труды Междунар. конф. «Теплофизика-98», Обнинск, 1998. Т. 1. С. 356–371.
4. Миропольский З.Л., Шицман М.Е. Допустимые тепловые потоки и теплоотдача при кипении воды в трубах // Исследования теплоотдачи к пару и воде, кипящей в трубах при высоких давлениях / Под ред. Н.А. Доллежала. М.: Атомиздат, 1958. С. 24–53.
5. Некоторые результаты экспериментального исследования аэродинамики и теплообмена на поверхностях с полусферическими кавернами / Э.П. Волчков, С.В. Калинина, И.И. Матрохин и др. // Сиб. физ.-техн. журнал. 1992. Вып. 5. С. 3–9.
6. Миропольский З.Л. Теплоотдача при пленочном кипении пароводяной смеси в парогенерирующих трубах // Теплоэнергетика. 1963. №5. С. 49–52.