

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), И. Н. ГОЛОВИН, Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора), А. К. КРАСИН, А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор), П. Н. ПАЛЕЙ, Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМИРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО.

СОДЕРЖАНИЕ

СТАТЬИ

- В. И. Баранов. Развитие радиогеологии в СССР . . . 419  
Я. Богач, П. Квиттнер, Э. Сабо. Определение некоторых примесей в кремнии высокой чистоты методом активационного анализа без разрушения образцов . . . 421  
Я. Божик, Е. Кубовский, С. Лягак. Измерение материального параметра критической сборки «Анна» . . . 425  
Н. Г. Ваданина, Ю. П. Сайков. Критерий сравнения состояния твэлов активной зоны реактора . . . 429  
Ю. В. Чушкин, Е. Ф. Давыдов, В. Н. Сюзьв, Т. М. Гусева, В. В. Колесов, М. Д. Дерибизов. Радиационная стойкость пластинчатых твэлов реактора СМ-2 . . . 432  
Б. Г. Егызаров, В. А. Зюбка, А. И. Новиков. Выбор оптимальной аналитической методики при инструментальном активационном анализе . . . 435  
В. И. Субботин, Д. М. Овечкин, Д. Н. Сорокин, А. П. Кудрявцев. Теплоотдача при кипении натрия в условиях свободной конвекции . . . 437  
В. П. Бобков, М. Х. Ибрагимов, В. И. Субботин. Расчет коэффициента турбулентного переноса тепла при течении жидкости в трубе . . . 442  
В. Я. Кудяков, М. В. Смирнов, Н. Я. Чукреев, Ю. В. Посохин. Образование двухвалентного тория в среде расплавленного хлористого калия . . . 448  
Н. М. Зуева, Л. С. Соловьев. Равновесие и устойчивость плазмы в аксиально симметричных тороидальных системах . . . 453

ПЕРСОНАЛИЯ

Исаак Константинович Кикоин (к 60-летию со дня рождения) . . . 460

АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ

Н. Е. Врежнева, Ю. И. Капшанинов, С. Н. Озипанер. Изучение кинетики электролитического выделения гидроокисных осадков редкоземельных элементов . . . 462

- А. С. Тшечкин. Вычислительное устройство для обработки  $\gamma$ -спектров . . . 462  
В. Е. Дроздов, Ю. С. Рябухин. К расчету мощностей поглощенных доз полоого цилиндрического облучателя с неравномерным распределением активности . . . 463  
М. Задубан, Л. Медвидь. Определение суммарной  $\beta$ -активности долгоживущих продуктов деления при помощи  $K^{40}$  . . . 464  
Г. П. Березина, Я. Б. Файнберг, А. К. Березин. Экспериментальное исследование потоков быстрых ионов, образующихся в системе пучок — плазма . . . 465

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

- М. А. Сарычев, Ю. Н. Алексеенко, Н. В. Звонов, В. И. Буйницкая, И. В. Рогожкин, А. А. Баталов, Ю. В. Александров. Распределение потока тепловых нейтронов в различных отражателях с каналами . . . 467  
Т. М. Гусева, Е. Ф. Давыдов, В. Н. Сюзьв, Ю. В. Чушкин. О возможном характере изменения объема тепловыделяющих композиций при твердом распухании . . . 469  
Е. М. Лобанов, Н. В. Зиновьев. Определение необходимой статистики при бескорреляционной расшифровке данных активационного анализа . . . 471  
С. Н. Вотвинов, Т. М. Гусева, В. И. Клименков. О радиационной стойкости сплава циркония с 1% ниобия в условиях работы реактора СМ-2 . . . 473  
А. Э. Шемьл-заде. О сухих выпадениях продуктов ядерных испытаний . . . 474  
К. П. Захарова, Г. М. Иванов, В. В. Куличенко, Н. В. Крылова, Ю. В. Сорокин, М. И. Федорова. Об использовании тепла химических реакций для термической переработки жидких радиоактивных отходов . . . 475

225381/не



Ж 53  
А92

Полное число регистрируемых  $\gamma$ -квантов  $S_p$  является функцией сечения реакции  $R$ , концентрации соответствующего радиоактивного изотопа  $C$ , изотопного содержания  $\nu$  и других ядерных характеристик.

Зависимость временной части  $\lambda_p$  от искомых параметров  $t_1, t_2, t_3$  определяется выражением

$$\lambda_p = \frac{T_p}{\ln 2} \left(1 - e^{-\ln 2 \frac{t_1}{T_p}}\right) e^{-\ln 2 \frac{t_2}{T_p}} \times \left(1 - e^{-\ln 2 \frac{t_3}{T_p}}\right), \quad (8)$$

где  $T_p$  — период полураспада  $p$ -го изотопа.

После подстановки выражений (3) — (8) в уравнение (2), опустив промежуточные выкладки, получим

$$B_h(t) = \frac{H_k \lambda_h(t)}{H_k \lambda_h(t)} = \sum_{i=1}^i \left\{ H_i \exp \left[ -\frac{(E_i - E_h)^2}{2\sigma_i^2} \right] + \Gamma_i \left[ 2 + E_h \frac{E_h(E_i + m)^2 - E_i(E_h^2 + 2E_i m)}{E_i^2(E_i - E_h)^2} \right] \times \eta(D_i - E_h) \right\} \lambda_i(t)$$

Здесь

$$H_i = \left[ \frac{Q\gamma}{\sigma} \right]_i; \quad Q = \frac{bR\nu C}{A};$$

$$\Gamma_i = \frac{\sqrt{2\pi}}{m} \left[ \frac{Q\beta}{\frac{2(\alpha^3 + 9\alpha^2 + 8\alpha + 2)}{(2\alpha + 1)^2} + \frac{\alpha^2 - 2\alpha - 2}{\alpha} \ln(2\alpha + 1)} \right]_i,$$

где  $b$  — выход  $\gamma$ -квантов на распад;  $A$  — атомный вес изотопа;  $\alpha_i = \frac{E_i}{m}$ .

Выражение (8) дает возможность при помощи счетно-решающих устройств осуществлять оптимизацию аналитической методики определения искомого элемента. Процесс расчета сводится к вычислению значений  $B_h(t)$  при различных  $t_1, t_2, t_3$  для разных радиоактивных изотопов искомого элемента с целью определения максимального значения  $B_h(t)$ . Можно показать, что при  $t_1 = t_3$  значение  $B_h(t)$  максимально. Таким образом определяются наиболее оптимальный тип реакции и основные параметры экспериментальной методики.

В качестве промежуточных результатов в принятой программе вычислений можно получать и другие данные, представляющие интерес для экспериментатора. Например, для заданной комбинации элементов и их содержаний и выбранных  $t_1, t_2, t_3$  определяется интенсивность фотопиков и комптоновских распределений от соответствующих радиоактивных изотопов, что, в свою очередь, дает возможность оценить чувствительность и точность измерений, и т. д.

Приведем в качестве примера результаты расчета, выполненного на вычислительной машине «Минск-1» для образца следующего состава: 1,5% Fe, 16% Mo, 78% J, 1,5% Mg, 1,5% Si, 1,5% Ca. Анализировался элемент Ca. При расчете принимались во внимание все ядерные реакции при активации нейтронами с энергией 14 Мэв. По максимальному значению коэффициента  $B_h$  была выбрана реакция  $\text{Ca}^{44}(n, \alpha)\text{Ar}^{41}$  и найдено значение оптимальных времен:  $t_1 = 1800$  сек,  $t_2 = 1000$  сек,  $t_3 = 1800$  сек.

Поступила в Редакцию 16/II 1967 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Столярова. Прикладная спектрометрия ионизирующих излучений. М., Физматгиз, 1959.

## Теплоотдача при кипении натрия в условиях свободной конвекции

В. И. СУББОТИН, Д. М. ОВЕЧКИН, Д. Н. СОРОКИН, А. П. КУДРЯВЦЕВ

УДК 621.039.517

Теплоотдача при кипении натрия в условиях свободной конвекции экспериментально исследовалась в работах [1—10]. Опыты проводились в диапазоне давлений примерно от нескольких сотых долей до 1 бар и диапазоне тепловых потоков от нескольких десятков тыс.  $\text{вт/м}^2$  до потоков, близких к критическим. Эксперименты проведены с плоскими и цилиндрическими нагревателями, на поверхностях из хро-

ма, никеля, нержавеющей стали, молибдена и меди, причем некоторые из них имели различную обработку. На основе имеющихся данных можно установить некоторые закономерности, однако для получения разносторонней информации о теплообмене при кипении натрия необходимы дальнейшие исследования.

Работы [4, 6, 10], опубликованные в последние годы, подтвердили существование раз-



личных режимов теплосъема для натрия, обнаруженных ранее [8]. Анализ имеющихся данных позволяет сделать вывод, что для натрия в исследованном диапазоне давлений, когда температура жидкости близка к температуре насыщения или превышает ее, на поверхностях из хрома, никеля, нержавеющей стали и молибдена, не подвергнутых специальной обработке, характерны следующие режимы теплосъема: теплосъем при развитом кипении, теплосъем больших тепловых потоков (порядка  $10^6 \text{ вт/м}^2$ ) конвекцией с последующим отводом тепла испарением со свободной поверхности и теплосъем при неустойчивом кипении. Здесь не рассматривается теплосъем при переходном и пленочном кипении, так как на натрии экспериментально эти режимы еще не исследованы.

**Теплосъем при развитом кипении**

При развитом кипении натрия зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока и давления можно выразить формулой типа

$$\alpha = Cq^n P^m, \quad (1)$$

причем значение показателя степени при тепловом потоке  $n$  по результатам всех исследований, за исключением работы [10], лежит примерно в тех же пределах (0,6—0,8), что и для неметаллических жидкостей.

В работе [10] значения  $\alpha$  при развитом кипении натрия в диапазоне давлений 0,2—0,75 бар описываются формулой

$$\alpha = 430q^{1/3}P^{0,1}. \quad (2)$$

В этой работе опыты проведены только на одной теплоотдающей поверхности, имеющей относительно небольшие размеры (плоская поверхность из нержавеющей стали диаметром

28 мм). Из экспериментов с неметаллическими жидкостями известно, что величина показателя степени при  $q$  в формуле (1) может в определенных пределах изменяться в зависимости от состояния поверхности, так как  $\alpha \sim N^k$ , где  $N$  — число действующих центров парообразования,  $k > 0$ . Слабая зависимость, приближающаяся к зависимости для конвективного теплообмена,  $\alpha$  от  $q$  в формуле (2), возможно, объясняется незначительным увеличением числа действующих центров парообразования с ростом теплового потока, так как число относительно больших впадин, служащих центрами парообразования для натрия в исследованном диапазоне давлений [9], на поверхности с небольшими размерами могло быть ограниченным.

Зависимость коэффициента теплоотдачи от давления при кипении натрия определена менее четко, чем зависимость  $\alpha$  от  $q$ . В работах [7, 8] в диапазонах давлений примерно 0,15—1,25 и 0,1—1 бар заметной зависимости  $\alpha$  от  $P$  не получено. Зависимость  $\alpha$  от  $P$ , согласно работе [10], тоже слабая [см. формулу (2)]. В то же время в работе [4] для интервала давлений примерно 0,01—0,82 бар найдено, что  $\alpha \sim P^{0,25}$ .

На рис. 1 приведены опытные данные по теплоотдаче при развитом кипении натрия в зависимости от давления. Из работы [4] взяты только точки, относящиеся к максимальным тепловым потокам при каждом давлении, так как там в ряде опытов наблюдается очень крутая зависимость  $\alpha$  от  $q$ , что может быть связано с переходом от неустойчивого кипения к развитому по мере роста теплового потока [9]. Коэффициенты теплоотдачи, полученные в работе [6], отнесены нами, так же

как и остальные данные рис. 1, к разности температур между теплоотдающей поверхностью и жидкостью [5]. Значения коэффициентов теплоотдачи, полученные в опытах на плоской

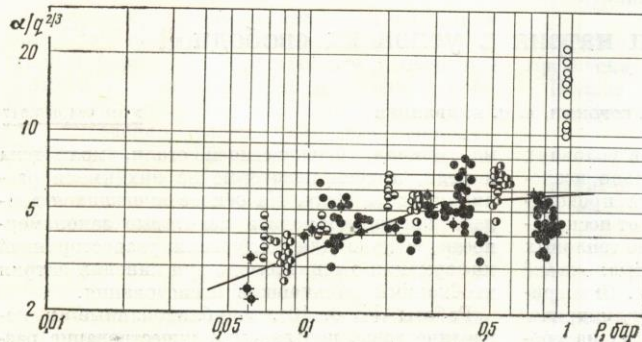


Рис. 1. Экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении натрия:  
 ● — горизонтальная плоская поверхность из нержавеющей стали, никеля, хрома, меди [8, 9]; ○ — горизонтальная плоская поверхность из никеля [6]; ◐ — горизонтальная трубка из молибдена [2, 3]; ◑ — горизонтальная трубка из нержавеющей стали [4]; ○ — горизонтальная трубка из нержавеющей стали [1].



поверхности [6, 8, 9], в целом, как видно из рис. 1, удовлетворительно согласуются со значениями  $\alpha$ , полученными в опытах при кипении натрия на поверхности горизонтальных трубок [2-4]. Значительно выше остальных лежат только данные Лайона [1]. На рис. 1 не нанесены точки из работ [7, 10], так как в работе [7] данные построены только в координатах  $\alpha - q$  для достаточно широкого диапазона давлений ( $\sim 0,15 \div 1,25$  бар), а зависимость  $\alpha$  от  $q$  в работе [10] значительно отличается от полученной в других работах и принятой при построении рис. 1.

Рассмотрение результатов работ, приведенных на рис. 1, показывает, что при низких давлениях зависимость  $\alpha$  от  $P$  сильнее. Через точки на рис. 1 можно провести осредняющие линии, наклон которых будет таким же, как и наклон линий, осредняющих опытные данные авторов по цезию. При давлениях примерно до 0,3 бар осредняющей линии соответствует формула

$$\alpha = 8,5q^{2/3}P^{0,4}, \quad (3)$$

а при давлениях примерно 0,3-1 бар

$$\alpha = 6q^{2/3}P^{0,1}. \quad (4)$$

Однако для более четкого выявления зависимости  $\alpha$  от  $P$  опыты следует провести в широком диапазоне изменения давлений, оставляя другие условия неизменными.

Величина коэффициента  $C$  в формуле (1), как показали опыты на неметаллических жидкостях, зависит от вида жидкости и состояния поверхности. На рис. 2 приведены данные, полученные в работе [5], при кипении натрия на гладкой поверхности и на поверхности с искусственными впадинами резервуарного типа. На последней интенсивность теплоотдачи, а следовательно, и значение коэффициента  $C$  в формуле (1) увеличивается примерно в четыре раза по сравнению с гладкой поверхностью. Нанесение на поверхности нагрева насечек размерами  $0,5 \times 0,5 \times 0,5$  мм в опытах авторов и конических углублений в работе [5] не приводит к заметному изменению коэффициента теплоотдачи при кипении натрия. Следовательно, и для натрия значение  $C$  в формуле (1) может изменяться в зависимости от состояния поверхности. Однако к увеличению значения  $C$  приводит нанесение на поверхности нагрева только специфической шероховатости, создающей устойчивые центры парообразования [4, 5, 9].

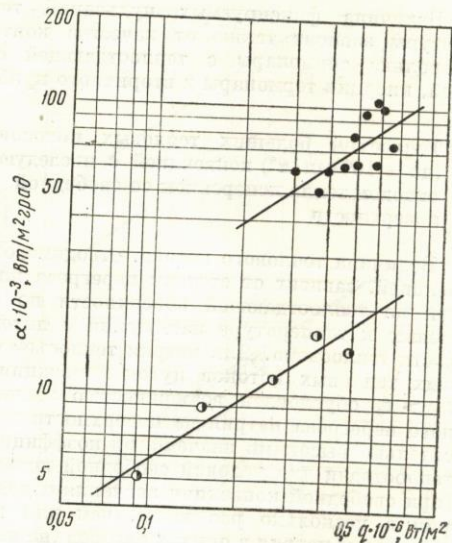


Рис. 2. Влияние обработки поверхности на коэффициент теплоотдачи при кипении натрия [5, 6] ( $P = 0,08$  бар):  
 ○ — гладкая поверхность; ● — поверхность с искусственными впадинами резервуарного типа.

При развитии кипения натрия термометры, заделанные в теплоотдающую стенку, обычно фиксируют лишь незначительные пульсации температуры или не фиксируют их совсем, так же как и при пузырьковом кипении неметаллических жидкостей. Вместе с тем известно, что при кипении обычных жидкостей в пограничном слое и непосредственно на теплоотдающей поверхности имеют место значительные пульсации температуры [11-14]. При развитии кипения натрия величина пульсаций температуры вблизи теплоотдающей поверхности соизмерима с величиной среднего температурного напора между теплоотдающей поверхностью и жидкостью [9].

Эти пульсации температуры связаны с образованием и отрывом паровых пузырей. Величина пульсаций температуры  $A$  на расстоянии  $y$  от теплоотдающей стенки может быть оценена по формуле [15]

$$A_y = A_0 e^{-\sqrt{\pi\omega/a} y}, \quad (5)$$

где  $A_0$  — амплитуда пульсаций на поверхности, °C;  $\omega$  — частота пульсаций, 1/с.



Величина фиксируемых пульсаций температуры зависит также от качества контакта королька термомпары с теплоотдающей стенкой, инерции термомпары и вторичного прибора.

**Теплосъем больших тепловых потоков (до  $\sim 10^6$   $вт/м^2$ ) конвекцией с последующим отводом тепла испарением со свободной поверхности**

Величина теплового потока, отводимого конвекцией, зависит от степени перегрева жидкости на теплоотдающей поверхности по отношению к температуре насыщения и интенсивности теплосъема. Для натрия теплосъем больших тепловых потоков путем конвекции при  $t_{ж} > t_s$  обусловлен возможностью значительного перегрева натрия на поверхности и относительно высокими значениями коэффициентов теплоотдачи для условий свободной конвекции (при свободной конвекции значения  $\alpha$  для натрия в несколько раз выше, чем для воды). Перегревы натрия в опытах авторов (на поверхности из нержавеющей стали) достигали примерно  $150^\circ C$  при давлении  $0,1$  бар и  $60^\circ C$  при давлении  $1$  бар. В работе [16] были получены перегревы натрия до  $250^\circ C$  при давлении  $1,2$  бар.

Зная перегревы на теплоотдающей поверхности, можно рассчитать значение коэффициентов теплоотдачи по формулам конвективного теплообмена при свободной конвекции [17, 18].

**Теплосъем при неустойчивом кипении**

Для этого режима характерны значительные пульсации температуры теплоотдающей стенки с относительно низкой (доли герца) частотой. Максимальная величина пульсаций при неустойчивом кипении равна разности температурных напоров при теплосъеме конвекцией без кипения и при развитом кипении, а усредненные во времени значения коэффициентов теплоотдачи лежат между значениями  $\alpha$  для этих режимов теплосъема. Чем меньше величина таких низкочастотных пульсаций температуры теплоотдающей стенки, тем больше значения  $\alpha$  приближаются к  $\alpha$  при развитом кипении.

В опытах с натрием наблюдалась неустойчивость теплообмена, заключающаяся в «произвольном» переходе от одного режима теплосъема к другому при неизменных значениях теплового потока и давления.

Имеющихся в настоящее время данных еще недостаточно для определения количественных значений параметров, например величин давления и теплового потока, при которых будет иметь место тот или иной режим теплосъема натрия, поскольку на это влияют еще некоторые неучтенные факторы. Например, в работе [10] указаны пределы давлений и тепловых потоков, при которых существовали те или иные режимы теплосъема. В частности, указывается, что развитое кипение наступало при давлениях выше  $0,2$  бар при тепловых потоках начиная с  $90 \cdot 10^3$   $вт/м^2$ . Однако эти величины давлений и тепловых потоков относятся только к данному конкретному опыту и не могут быть распространены на другие случаи, что, к сожалению, не отмечено авторами работы [10]. Так, в опытах [9] (при постоянном давлении) в начале эксперимента существовало развитое кипение при тепловом потоке примерно  $200 \cdot 10^3$   $вт/м^2$ , а в конце эксперимента даже при тепловом потоке примерно  $1000 \times 10^3$   $вт/м^2$  теплосъем осуществлялся конвекцией с последующим отводом тепла испарением. В работе [16] также в зависимости от продолжительности контакта поверхности с натрием перегревы, при которых происходит вскипание, изменялись от  $\sim 75$  до  $\sim 230^\circ C$  при температуре натрия  $900^\circ C$ . Поэтому сейчас можно говорить лишь о большей или меньшей вероятности существования того или иного режима теплосъема в зависимости от некоторых факторов.

Анализ опытных данных показывает, что с ростом давления и теплового потока увеличивается как вероятность перехода от теплосъема конвекцией к теплосъему кипением, так и вероятность перехода от теплосъема при неустойчивом кипении к теплосъему при развитом кипении. Увеличение времени контакта (по-видимому, до определенного предела) теплоотдающей поверхности из таких материалов, как, например, нержавеющая сталь и никель, с натрием приводит к возрастанию неустойчивости теплосъема при кипении и увеличению перегрева (теплового потока), необходимого для поддержания кипения. Изменение содержания кислорода в натрии от  $\sim 10^{-3}$  до  $\sim 10^{-1}$  вес. % не повлияло на теплообмен при кипении натрия [9]. Однако содержание окислов в натрии было ниже предела растворимости при температуре опытов.

Опыты Марто и Росеноу [5, 6] показали, что специфическая обработка поверхности нагрева (углубления, расширяющиеся книзу;



нанесение шероховатости сваркой; использование пористого материала) приводит к увеличению стабильности кипения натрия и к росту значений коэффициентов теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью, в то время как нанесение цилиндрических впадин на поверхности нагрева заметного влияния не оказывает (см. рис. 2).

Значительные перегревы жидкости на теплоотдающей поверхности, существование неустойчивого кипения и нестабильность режимов теплоотдачи, обнаруженные в экспериментах с натрием в условиях свободной конвекции, можно объяснить совокупным влиянием следующих основных факторов: а) большими размерами паровых зародышей при перегреве в 1° С в исследованном диапазоне давлений; б) хорошей смачиваемостью натрием таких материалов, как нержавеющая сталь, никель, молибден; в) высоким значением температуропроводности натрия.

Интересно сравнить экспериментальные данные для натрия с расчетом по обобщенным формулам для теплоотдачи при пузырьковом кипении. На рис. 3 и 4 построены зависимости по эмпирическим формулам (3) и (4) и по обобщенным формулам:

Кружилина [19]

$$\alpha = 3,7 \cdot 10^{-2} \frac{\lambda^{0,75} q^{0,7}}{\mu^{0,45} C_p^{0,12} T^{0,37}} \left( \frac{r\gamma''}{\gamma - \gamma''} \right)^{0,033} \times \left( \frac{\gamma}{\sigma} \right)^{0,333}, \quad (6)$$

Кутателадзе [20]

$$\alpha = 2,22 \frac{\lambda q^{0,7}}{\sigma^{0,5} (\gamma - \gamma'')^{0,2}} \left( \frac{P}{r\gamma'' a} \right)^{0,7} Pr^{-0,35}, \quad (7)$$

Минченко [21]

$$\alpha = 2,75 \frac{\lambda q^{0,7}}{\sigma^{0,5} (\gamma - \gamma'')^{0,2}} \left( \frac{P}{r\gamma'' a} \right)^{0,7}, \quad (8)$$

Лабунцова [22]

$$\alpha = 0,1 \left( \frac{\lambda C_p \gamma}{\sigma T} \right)^{1/3} q^{2/3}. \quad (9)$$

Аладьева [23]

$$\alpha = 100 \left( \frac{\lambda T}{r 10^{-6}} \right)^{0,3} q^{0,7}. \quad (10)$$

В формулах (6) — (8) значения постоянных и показателей степеней найдены на основе обработки опытных данных по теплоотдаче при кипении неметаллических жидкостей, а формулы (9) и (10) рекомендованы для расчета теплоотдачи при кипении металлов.

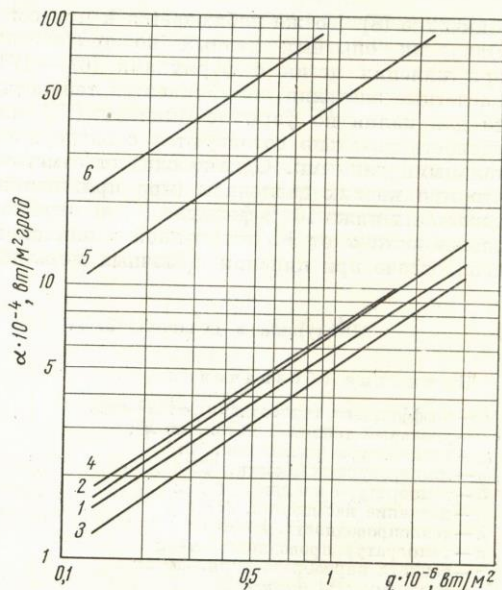


Рис. 3. Сравнение значений коэффициентов теплоотдачи при кипении натрия при атмосферном давлении, рассчитанных по эмпирической формуле (4) — линия 1 и по обобщенным формулам: 2 — Минченко (8); 3 — Аладьева (10); 4 — Лабунцова (9); 5 — Кутателадзе (7); 6 — Кружилина (6).

Из совместного рассмотрения рис. 3 и 4 следует, что лучше других согласуется с эмпирическими зависимостями (3) и (4) формула

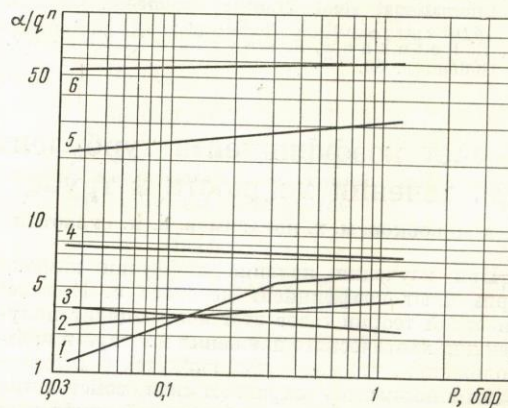


Рис. 4. Сравнение зависимости коэффициентов теплоотдачи при кипении натрия от давления по эмпирическим формулам (3) и (4) — линия 1 и по обобщенным формулам: 2 — Минченко (8); 3 — Аладьева (10); 4 — Лабунцова (9); 5 — Кутателадзе (7); 6 — Кружилина (6).

Минченко (8). То же наблюдается и при сопоставлении опытных данных по теплоотдаче при кипении цезия с формулами (6) — (10). Расчетные значения коэффициентов теплоотдачи для калия по формуле Минченко (8) также удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Однако следует отметить, что при низких давлениях (при приведенных давлениях ниже  $10^{-3}$ ) формула (8) не отражает зависимости  $\alpha$  от  $P$ , полученной в опытах по теплоотдаче при кипении щелочных металлов.

Поступила в Редакцию 27/IV 1967 г.

Принятые обозначения

- $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  $вт/м^2 \cdot град$ ;
- $q$  — удельный тепловой поток,  $вт/м^2$ ;
- $t_s$  — температура насыщения,  $^{\circ}C$ ;
- $t_{ж}$  — температура жидкости,  $^{\circ}C$ ;
- $T$  — температура насыщения,  $^{\circ}K$ ;
- $P$  — давление насыщения,  $бар$ ;
- $\lambda$  — теплопроводность,  $вт/м \cdot ^{\circ}C$ ;
- $a$  — температуропроводность,  $м^2/ч$ ;
- $r$  — теплота парообразования,  $дж/кг$ ;
- $C_p$  — теплоемкость,  $дж/кг \cdot ^{\circ}C$ ;
- $\gamma$  — удельный вес жидкости,  $н/м^3$ ;
- $\gamma''$  — удельный вес пара,  $н/м^3$ ;
- $\sigma$  — поверхностное натяжение,  $н/м$ ;
- $\mu$  — вязкость,  $псек/м^2$ ;
- $P_r$  — критерий Прандтля.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Lyon, A. Foust, D. Katz. Chem. Engng Progr. Sympos., 51, 41 (1955).
2. Нойс. «Теплопередача. Сер. С», № 2, 59 (1963).
3. R. Nouy, H. Lurie. Proceedings of the 3rd International Heat Transfer Conference. Chicago, August, 1966, vol. 5, p. 92.
4. B. Petukhov, S. Kovalev, V. Zhukov. Ibidem, p. 80.

5. P. Marto, W. Rohsenow. Massachusetts Institute of Technology. Rep. No. 5219-33, 1965.
6. P. Marto, W. Rohsenow. Trans. ASME. Ser. C, 88, No. 2, 51 (1966).
7. В. М. Боришанский и др. «Атомная энергия», 19, 191 (1965).
8. В. И. Субботин и др. Proc. of the Third Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy (Geneva, 1964). Vol. 8, N.Y., Unit. Nat., 1965, p. 192.
9. А. П. Кудрявцев и др. В сб. «Жидкие металлы». М., Атомиздат, 1967, стр. 268.
10. В. И. Деев и др. «Атомная энергия», 22, 49 (1967).
11. S. Hsu, F. Schmidt. Trans. ASME. Ser. C, 83, No. 3, 254 (1961).
12. F. Moore, R. Mesler. AIChE Journal, 7, No. 4, 620 (1961).
13. T. Rogers, R. Mesler, AIChE Journal, 10, No. 5, 656 (1964).
14. Маркус, Дропкии. «Теплопередача. Сер. С», № 3, 14 (1965).
15. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. М., Гостехиздат, 1952.
16. G. Grass, H. Kottowski, K. Spiller. Rep. 11-B/4. Conference Internationale Sur La Surete des Reacteurs a Neutrons Rapides. Aix, En, Provence, September, 1967.
17. А. П. Кудрявцев и др. В сб. «Жидкие металлы». М., Атомиздат, 1967, стр. 131.
18. С. С. Кутателадзе и др. Жидкометаллические теплоносители. М., Атомиздат, 1967.
19. Г. И. Кружилин, В. И. Субботин. В кн. «Труды Второй международной конференции по мировому использованию атомной энергии (Женева, 1958)». Доклады советских ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 134.
20. С. С. Кутателадзе. Основы теории теплообмена. М., Машиз, 1962.
21. Ф. П. Минченко. «Энергомашиностроение», № 6, 17 (1960).
22. Д. А. Лабунцов, Е. М. Шевчук, П. А. Пазюк. «Теплофизика высоких температур», 3, № 2, 276 (1965).
23. I. Aladyev et al. Third International Heat Transfer Conference, Chicago, August, 1966, vol. 3, p. 123.

Расчет коэффициента турбулентного переноса тепла при течении жидкости в трубе

В. П. БОБКОВ, М. Х. ИБРАГИМОВ, В. И. СУББОТИН

УДК 621.039.517.3

При изучении явлений диффузии широко применяют коэффициент переноса  $\epsilon$ . В кинетической теории газов этот коэффициент получен для хаотического движения молекул в предположении, что молекулы движутся с интервалами и полностью сохраняют свои свойства при столкновении. При турбулентной диффузии жидкие частицы движутся непрерывно, взаимодействуя между собой. Тейлор [1] и Кампде Ферье [2] обобщили результаты теоретиче-

ского анализа диффузии в кинетической теории газов для случая непрерывного движения частиц в турбулентном потоке. При однородном течении жидкости во времени и пространстве коэффициент турбулентного переноса, в частности, тепла для больших времен диффузии выражается формулой

$$\epsilon_a = \sigma_v^2 \int_0^{\infty} R_{II}(\tau) d\tau = \sigma_v^2 T_{II}. \quad (1)$$