

УДК 536.423.4

РАСЧЕТ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ИСПАРЕНИИ И КИПЕНИИ ПЛЕНКИ, ОРОШАЮЩЕЙ ПАКЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

© 2020 г. И. И. Гогонин*

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: gogonin@itp.nsc.ru

Поступила в редакцию 18.03.2019 г.

После доработки 24.10.2019 г.

Принята к публикации 12.11.2019 г.

Изложен алгоритм расчета теплообмена при испарении и кипении пленки, орошающей пакет оребренных труб, и выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных. Расчетные параметры удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: пакет оребренных труб, теплообмен при испарении и кипении, интенсификация теплообмена

DOI: 10.31857/S0040357120030033

ВВЕДЕНИЕ

Теплообменные аппараты пленочного типа успешно используются во многих отраслях промышленности. Оребрение труб пакета является одним из основных способов интенсификации теплообмена. Если учесть, что оребрение приводит к существенной стабилизации пленочного течения и многократной интенсификации теплообмена, то такие теплообменники становятся особенно привлекательными. Однако число публикаций в журналах, где исследуется теплообмен при испарении и кипении пленки, орошающей пакет горизонтальных оребренных труб, крайне ограничено. Тепло-массообмен в этом случае описывается эмпирическими уравнениями. В статье сделана попытка описать теплообмен при испарении и кипении уравнениями, полученными на основании физических исследований гидродинамики пленочных течений на оребренных трубах. Теплообмен при кипении в пленке всегда сопровождается теплообменом при испарении, и охлаждение стенки зависит от обоих процессов.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ ПЛЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ, ОРОШАЮЩЕГО ПУЧОК ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

В работе [1] было установлено, что в зависимости от геометрических параметров оребрения заметно меняется количество жидкости, удерживаемой между ребрами. На рис. 1 приведена фотография, где отчетливо видно затопление

межреберной впадины жидкостью на нижней части оребренного цилиндра.

На рис. 2 показана физическая модель течения жидкости по оребренной трубе. Предполагается, что при течении жидкости в межреберном пространстве силы поверхностного натяжения существенно превышают силы тяжести. Такое предположение подтверждено визуальными наблюдениями и анализом видеofilмов. При орошении оребренных труб этиловым спиртом выделяющиеся микропузыри позволяли четко видеть траекторию движения жидкости по боковой поверхности ребра. Схема этого движения показана на рис. 2.

Результаты систематических измерений высоты слоя жидкости, удерживаемой между ребрами, выполненных в работе [1], показаны на рис. 3. Высота капиллярного удерживания жидкости измерялась с помощью катетометра. На рисунке представлены опыты, полученные на оребренных цилиндрах с прямоугольным и трапециевидным профилем ребра. Данные обработаны в виде зависимости средней безразмерной высоты затопления от обратного значения безразмерного (т.е. отнесенного к капиллярной постоянной) расстояния между ребрами \tilde{a} .

При значении $\tilde{a} > 1$ высота удерживаемого между ребрами слоя жидкости остается постоянной и равной $H/l_\sigma \approx 1.8$.

При значении параметра $\tilde{a} \leq 1.0$ высота удерживаемого в канавке слоя жидкости хорошо совпадает с высотой капиллярного поднятия жидко-

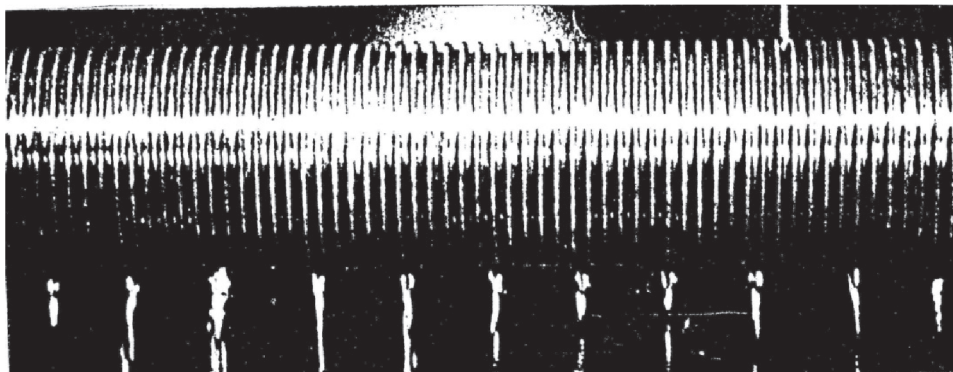


Рис. 1. Капиллярное удерживание жидкости между ребрами при $\tilde{a} = 0.75$ и $Re = 100$.

сти в бесконечной вертикальной щели с шириной, равной расстоянию между ребрами

$$H_0 = \frac{2\sigma}{(\rho_L - \rho_V)ga} \quad (1)$$

Для трапециевидных ребер имеет место более общее соотношение

$$H_1 = \frac{2\sigma}{(\rho_L - \rho_V)ga_*} \quad (2)$$

где в качестве линейного размера впадины используем эмпирическое расстояние, предложенное в [2]:

$$a_* = \frac{a \cos \varphi + h \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$

где a — ширина впадины у основания; a_* — условное расстояние, вычисляемое по зависимости (3);

h — высота ребра; φ — угол наклона боковой поверхности ребра.

Экспериментальные результаты по капиллярному удерживанию на оребренных цилиндрах с прямоугольными и трапециевидными профилями ребра удовлетворительно описываются единой зависимостью.

Значительное увеличение радиуса кривизны межфазной поверхности при $\tilde{a} > 1$ приводит к уменьшению вклада сил поверхностного натяжения, и высота удерживающегося на цилиндре слоя жидкости перестает зависеть от расстояния между ребрами и остается постоянной. Имеет место четко выраженный переход одной области зависимости в другую. В общем случае доля затопленной поверхности трубы является функцией безразмерного комплекса $\tilde{a}\tilde{D}$. Приведенные результаты позволяют учесть влияние капиллярного удерживания жидкости на теплообмен и более корректно сопоставить их между собой.

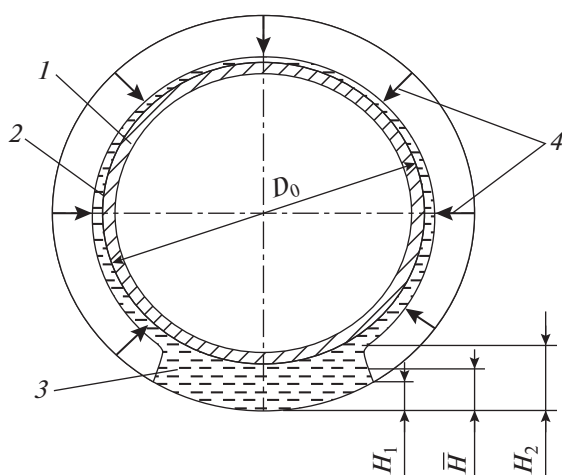


Рис. 2. Схема движения жидкости по ребру: 1 — основание оребренной трубы; 2 — пленка жидкости; 3 — слой жидкости, удерживаемый между ребрами; 4 — траектория движения жидкости по ребру; H — среднее значение высоты удерживаемого слоя жидкости.

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ИСПАРЕНИИ И КИПЕНИИ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ, ОРОШАЮЩЕЙ ПУЧОК ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

В обзорной статье [3] приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при испарении и кипении пленки хладона R11, орошающей пучок оребренных и гладких труб. Пакет состоял из 5 труб, из которых только две трубы обогрелись.

На рис. 4 и в табл. 1 приведены геометрические параметры оребрения на медной трубе наружным диаметром $D = 25$ мм, $\delta_w = 7.5$ мм.

Из данных, показанных на рис. 5, следует, что теплообмен при испарении и кипении пленки, орошающей пучок оребренных труб, многократно интенсивнее, чем при испарении на пакете гладких труб при $G = \text{idem}$. Как следует из эксперимента, наибольшая интенсификация теплооб-

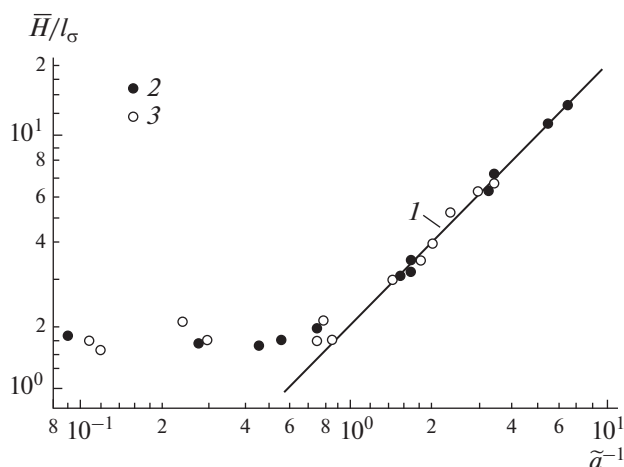


Рис. 3. Зависимость высоты капиллярного удерживания жидкости от безразмерного расстояния между ребрами: 1 – расчет по зависимости (2), 2 – вода, 3 – хладон R12.

мена достигнута на трубе, где форма ребра – острый треугольник.

Интересно, что начало кипения на оребренных трубах происходит при значительно меньшем температурном напоре стенка–жидкость, чем на пучке гладких труб и практически при одинаковом удельном тепловом потоке в том и другом случае. Авторы [3] не указывают причин столь значительной интенсификации теплообмена при кипении, показанной на рис. 5, хотя подробно анализируют теплообмен при испарении на гладкой трубе.

Особенности теплообмена на оребренной трубе связаны с тем, что гидродинамика течения пленки, помимо сил тяжести и вязкости, существенным образом зависит от сил поверхностного натяжения. Градиент капиллярного давления существенным образом зависит от геометрических параметров оребрения. Результаты наших систематических измерений высоты слоя жидкости,

удерживающейся между ребрами, показаны на рис. 3, а на рис. 2 – схема течения жидкости при орошении пленкой наружной поверхности оребренной трубы. Показано, что боковые поверхности ребер оказываются покрытыми очень тонким слоем жидкости. Наши визуальные наблюдения и анализ фильмов показали, что с вершины ребра под действием сил поверхностного натяжения жидкость по боковой поверхности ребра стекает вниз впадины по траектории, приведенной на рис. 2. Донная часть впадины частично заполнена жидкостью, которая по периметру цилиндра стекает вниз. Необходимо иметь в виду, что на линии раздела жидкость–пар–твердая стенка образуется тонкая пленка под действием градиента капиллярного давления. Она смачивает боковую площадь ребра и интенсивно испаряется.

Это означает, что при орошении пленкой жидкости оребренной трубы характерным линейным размером становится высота ребра.

Теплообмен при испарении пленки с боковой поверхности ребра можно вычислить лишь приблизительно при следующих допущениях.

1. Силы поверхностного натяжения существенно превышают силы тяжести. Боковая поверхность ребра орошается жидкостью, которая стекает с торцевой поверхности ребра во впадину по траектории, указанной на рис. 2.
2. Теплообмен на торцевой части ребра и во впадине между ребрами происходит так же, как и на гладкой трубе [5].
3. Массовый поток жидкости, орошающей торец ребра и боковую поверхность ребра, определяется из балансных соотношений.
4. Ребро находится в области начального участка теплового пограничного слоя с характерным линейным размером – высотой ребра.

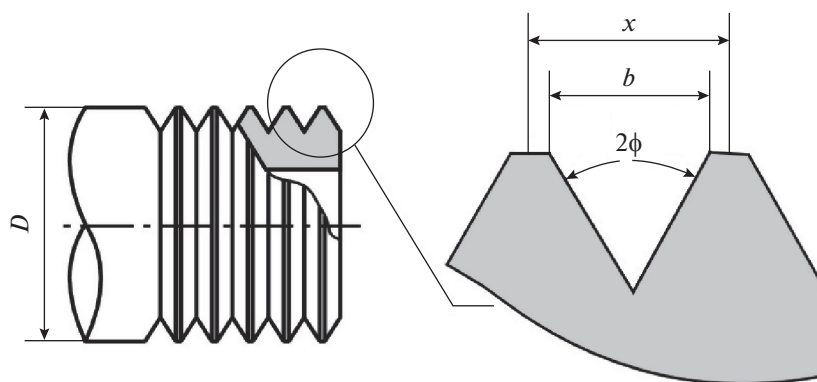


Рис. 4. Параметры оребрения в экспериментах по орошению пленкой пучка оребренных труб [3].

Таблица 1. Геометрические параметры оребрения

Параметр	Размерность	G1	G2	G3
x	мм	0.5	1.0	2.0
b	мм	0.5	0.7	1.50
h	мм	0.43	0.6	1.30
2ϕ	град	60	60	60
x/b	—	1.00	1.67	1.54
F_{op}/F	—	2.03	1.74	1.87

5. Медная оребренная труба может считаться изотермической стенкой, так как эффективность ребра близка к единице.

6. Боковая поверхность ребра в своей верхней части орошается ламинарной пленкой жидкости, стекающей с торца ребра. Нижняя часть ребра, находящаяся в глубине межреберной впадины, орошается основным потоком жидкости, который переносится во впадине между ребрами и является турбулентным или волновым. Плотность орошения боковой поверхности ребра вычисляется по зависимости $G_{T_2} = \frac{m_T}{2\pi R}$ [кг/(м с)], где m_T [кг/с] – массовый поток жидкости, стекающей по торцу ребра. Число Re_2 пленки на боковой поверхности ребра равно $Re_2 = G_{T_2}/\mu$.

Другой принципиальной особенностью орошения пакета горизонтальных труб является существование начального участка теплового пограничного слоя на каждой трубе пакета, распо-

ложенных одна под другой [3–5]. Как показано в [5], роль начального участка может быть определяющей, а может быть ничтожно малой. Опыты, приведенные на рис. 5, выполнены при орошении пакета оребренных труб при числах $Re = \frac{G}{2\mu} = 125$ и 250. В этих условиях ребро находится полностью в области начального участка.

Теплообмен при испарении для вертикальной стенки можно вычислить по зависимости, приведенной в [7]:

$$Nu_d^* = 0.91Pr^{1/3} \left(\frac{Re}{Ga} \right)^{1/9} \tag{4}$$

Здесь $Nu_d^* = \frac{\alpha \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3}}{\lambda}$; $Ga = \frac{gL^3}{v^2}$.

При орошении пакета оребренных труб движущей силой пленочного течения является поверхностное натяжение, которое превышает силу тяжести.

Можно предположить, что теплообмен в области начального участка теплового пограничного слоя описывается зависимостью, аналогичной уравнению (4):

$$Nu_d^* = 0.6Pr^{1/3} \left(\frac{Re}{h} \right)^{1/9} \tag{5}$$

Зависимость (5) является эмпирической, однако удовлетворительно описывает результаты опытов при испарении пленки на оребренных трубах.

В [7] приведено аналитическое решение задачи о теплообмене при испарении пленки на начальном участке теплового пограничного слоя на вертикальной стенке. Зависимость имеет вид, приведенный в уравнении (4).

Если в (4) число Галилея заменить безразмерной высотой ребра $\bar{h} = h / \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)}}$ и изменить коэффициент, то по аналогии с решением, приведенным в [7], можно записать эмпирическое уравнение (5). В числе Галилея масштабом является вязко-гравитационная постоянная $\left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3}$, а в (5) масштабом является капиллярная постоянная жидкости $l_\sigma = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)}}$.

Теплообмен при кипении может быть вычислен по зависимости, приведенной в [6]:

$$Nu^* = 0.01 Re_*^{0.8} Pr^{1/3} b K_t^{0.4} \left(\frac{\lambda C_p}{\lambda_w C_w \rho_w} \right)^{-0.2} R_z^{-0.2} \tag{6}$$

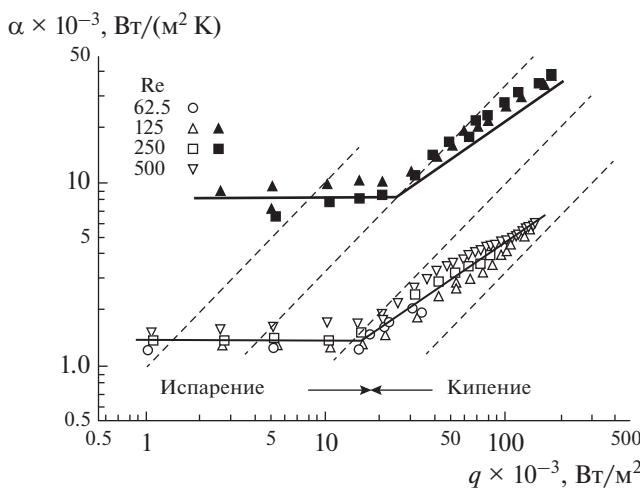


Рис. 5. Теплообмен при испарении и кипении пленки хладона R11, орошающего пучок оребренных труб [3]. Темные точки – результаты эксперимента на оребренных трубах; светлые точки – на гладкой трубе; линии – расчет по изложенному алгоритму.

Зависимость (6) является модифицированным критериальным уравнением Лабунцова [9], дополненная членами $\left(\frac{\lambda C_p}{\lambda_w C_w \rho_w}\right)$ и $\overline{R_z}$. Здесь

$\frac{\lambda C_p}{\lambda_w C_w \rho_w}$ – отношение физических свойств теплоносителя к физическим свойствам охлаждаемой стенки; $\overline{R_z} = R_z / (v^2/g)^{1/3}$ – безразмерный параметр, характеризующий шероховатость теплоотдающей стенки. Как показано в [6], зависимость удовлетворительно описывает результаты опытов по теплообмену при кипении различных жидкостей в условиях свободной конвекции на стенках из разнородных материалов и различной шероховатости. Определение теплоотдачи по (6) предполагает, что механизм теплообмена при кипении в пленке не отличается от механизма теплообмена при кипении в большом объеме.

При сравнении расчета и эксперимента, показанного на рис. 5, необходимо иметь в виду, что удельный тепловой поток и коэффициент теплоотдачи отнесены к площади гладкой трубы диаметром $D = 25$ мм.

На оребренной трубе истинное значение удельного теплового потока в расчете на полную поверхность оребренной трубы уменьшится в n раз. Здесь n – коэффициент оребрения, $q_{\text{ист}} = \frac{q}{n}$. При вычислении теплоотдачи при кипении принималось $q_{\text{ист}}$ и вычислялось $Re_* = \frac{q_{\text{ист}} l_{\sigma}}{r \rho_w v}$.

Интегральное значение коэффициента теплоотдачи определялось как

$$\bar{\alpha} = (\alpha_d + \alpha_0) n. \quad (7)$$

Здесь α_d – коэффициент теплоотдачи при испарении, вычисленный по зависимости (5) и α_0 – коэффициент теплоотдачи при кипении, вычисленный по зависимости (6).

Линиями на рис. 5 показано значение коэффициента теплоотдачи, определенное по зависимости (7), а точками – экспериментальные данные. Видно, что результаты расчета удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными.

Необходимо отметить, что зависимость (5) получена в предположении, что течение пленки ламинарное. В кипящей пленке течение вряд ли можно считать ламинарным, так как сама пленка турбулизируется растущими паровыми пузырями и ее поверхность не является гладкой. Приведенный по (5) расчет теплоотдачи при испарении для кипящей пленки нужно рассматривать как оценочный. Корректно вычислить теплообмен при

испарении кипящей пленки, когда ее поверхность многократно увеличилась, пока не представляется возможным.

Основным недостатком публикации [3] является отсутствие сведений о шероховатости гладкой и оребренной труб. Сравнение результатов эксперимента с расчетом может быть выполнено только при следующих предположениях. Поверхность гладкой трубы близка к полированной, и ее шероховатость $R_z \sim 0.5$ мкм или меньше. Такое предположение подтверждается очень высоким температурным напором, при котором начинается кипение $\Delta T_{\text{н.к}} \sim 13^\circ\text{C}$. Вероятнее всего, оребренные трубы имели повышенную шероховатость, так как кипение на них начиналось при $\Delta T_{\text{н.к}} \sim 3^\circ\text{C}$, что позволяет предполагать, что $\overline{R_z} \geq 0.9$. В этих условиях теплообмен уже не зависит от шероховатости стенки, а член $(\overline{R_z})^{0.2}$ в уравнении (6) равняется единице. При испарении на гладкой трубе доля начального участка теплового пограничного слоя может быть вычислена по зависимости, приведенной в [7]. На остальной части периметра трубы теплообмен определяется по зависимости, приведенной в [5]. Теплообмен при кипении вычисляется по зависимости (6). При принятых предположениях о шероховатости труб данные расчетов удовлетворительно совпадают с экспериментальными результатами. На рис. 5 данные расчета показаны линиями, а данные эксперимента – соответствующими точками.

Оценки по зависимости (2) показали, что из-за капиллярного удерживания жидкости между ребрами около 20% поверхности исследуемых оребренных труб в теплообмене практически не участвуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе отношение диаметра трубы к высоте ребра изменилось в несколько десятков раз, что привело к многократной интенсификации теплообмена при испарении на оребренной трубе. Ребро полностью находится в области начального участка теплового пограничного слоя.

Острая межреберная впадина является активным центром парообразования, что приводит к многократному снижению температурного напора, при котором начинается кипение в пленке. Кроме того, теплоотдача всегда является интегральным процессом, так как теплообмен при кипении сопровождается теплообменом при испарении пленки. В конечном итоге это приводит к существенной интенсификации теплопередачи при больших тепловых потоках.

Работа выполнена в ИТ СО РАН за счет средств, полученных по программе ФНИГАН за 2013–2020 годы (тема III.18.2.3.АААА–17117030310025–3).

ОБОЗНАЧЕНИЯ

$$b = \left[1 + 10 \left(\frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V} \right)^{2/3} \right]$$

C_p, C_w теплоемкость жидкости и стенки, Дж/(кг К)

D диаметр трубы или стержня, м

$\bar{D} = D/l_\sigma$ безразмерный диаметр трубы

G плотность орошения, кг/(м с) или м³/(м с)

H высота поднятия жидкости в межреберной впадине

h высота ребра, м

\bar{h} безразмерная высота

$$K_t = \frac{(g\rho_V)^2 l_\sigma}{C_p T_s \rho_L \sigma}$$

критерий теплового подобия

L длина, м

$$l_\sigma = \sqrt{\sigma/g(\rho_L - \rho_V)}$$

капиллярная и вязко-гравитационная постоянная, м

$$l_v = (v^2/g)^{1/3}$$

q удельный тепловой поток, Вт/м²

R_Z высота неровностей охлаждаемой стенки, мкм

$\bar{R}_Z = R_Z/l_v$ безразмерная шероховатость

r скрытая теплота парообразования, Дж/кг

T_s температура насыщения, К

t_s температура насыщения, °С

y координата, м

$\alpha_0, \alpha_d, \bar{\alpha}$ коэффициенты теплоотдачи при кипении; на начальном участке теплового пограничного слоя; при испарении; осредненное значение по (6), Вт/(м² К)

δ, δ_0 толщина пленки и остаточная толщина пленки, м

$$\bar{\delta} = \delta/l_v$$

безразмерная толщина пленки, м

λ, λ_w

коэффициент теплопроводности жидкости и охлаждаемой стенки, Вт/(м² К)

$$\frac{\lambda C_p}{\lambda_w C_w \rho_w}$$

отношение физических свойств жидкости к физическим свойствам охлаждаемой стенки

μ, μ_t

динамическая и турбулентная вязкость, Па с

ν

кинематическая вязкость, м²/с

ρ_L, ρ_V, ρ_w

плотность жидкости, пара и охлаждаемой стенки, кг/м³

$$Ga = \frac{gD^3}{\nu^2}$$

критерий Галилея

$$Nu_0^* = \alpha_0 l_\sigma / \lambda,$$

$$Nu^* = \alpha l_v / \lambda$$

числа Нуссельта, построенные по капиллярной и вязко-гравитационной постоянной

$$Pr = \frac{\nu}{a}$$

число Прандтля

$$Re = G/2\mu$$

число Рейнольдса пленки для пакета горизонтальных труб

$$Re_* = \frac{ql_\sigma}{r\rho_V}$$

число Рейнольдса по скорости парообразования

ИНДЕКСЫ

0	кипение
d	начальный участок
L	жидкость
S	насыщение
T	турбулентный
V	пар
W	стенка
σ	пленка

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гогонин И.И., Кабов О.А. Влияние капиллярного удерживания жидкости на теплообмен при конденсации на оребренных трубах // Изв. Сиб. отд. Акад. наук СССР. Сер. тех. наук. 1983. № 8. С. 3.
2. Bressler R.J., Wyatt P.W. Surface wetting through capillary grooves // J. Heat Transfer. 1970. V. 92. № 2. P. 126.
3. Fujita J., Tsatsui M. Experimental and analytical study of evaporation heat transfer in falling films on horizon-

- tal tubes // Proc. 10th International Heat Transfer Conference. Brighton, 1994. V. 6. P. 175.
4. Паркен, Флетчер, Сернас, Хань. Теплопередача при испарении и кипении жидкой пленки, стекающей по горизонтальной трубке // Соврем. машиностр. Сер. А. 1991. № 2. С. 11. [*Parken W.H., Fletcher L.S., Sernas V., Han J.C.* Heat transfer through falling film evaporation and boiling on horizontal tubes // J. Heat Transfer. 1990. V. 112. № 3. P. 744. <https://doi.org/10.1115/1.2910449>]
 5. Гогонин И.И. Теплообмен при испарении и кипении пленки, орошающей пучок горизонтальных труб // Теор. осн. хим. технол. 2014. Т. 48. № 1. С. 103.
 6. Гогонин И.И. Зависимость теплообмена при кипении от свойств и геометрических параметров теплоотдающей стенки // Теплофиз. выс. темп. 2006. Т. 44. № 6. С. 918.
 7. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. Неизотермическая абсорбция в термотрансформаторах. Новосибирск: Наука, 2010.
 8. Rogers J.T. Laminar falling film flow and heat transfer characteristics on horizontal tubes // Can. J. Chem. Eng. 1981. V. 59. № 2. P. 213.
 9. Лабунцов Д.А. Приближенная теория теплообмена при развитом пузырьковом кипении // Изв. Акад. наук СССР. Энерг. трансп. 1963. № 1. С. 58.