

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ОТ СКОРОСТИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА ВНУТРИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБ.

АННОТАЦИЯ

Обобщение большого числа опытов разных авторов показало, что при волновых режимах течения пленки имеют место условия, когда увеличение скорости пара не приводит к интенсификации теплообмена по сравнению с теплообменом при конденсации неподвижного пара. При турбулентном режиме течения пленки, при $We > We_{кр}$ начинается интенсивный унос пленки с гребней волн в паровое ядро, что приводит к существенной интенсификации теплообмена.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Обзор работ по теплообмену при конденсации внутри труб наиболее подробно представлен в монографиях [1-3], а также в статьях, обобщающих экспериментальные исследования [4-6]. Рассмотрим только задачу о спутном течении пара и жидкости при конденсации пара без неконденсируемых примесей.

1.1. Теплообмен при конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности.

При конденсации пара внутри труб отсутствуют режимы, когда его можно считать неподвижным. Однако малая скорость пара может не оказывать заметного влияния на теплообмен.

Анализ данных о конденсации неподвижного пара важен принципиально, поскольку:

а) Указывает на минимальные значения чисел Nu при конденсации данного вещества на вертикальной поверхности.

б) При обработке опытов по теплообмену при конденсации движущегося пара в координатах:

$$Nu^*/Nu_0^* = f(Re_0) \quad (1)$$

позволяет выявить некорректно выполненные результаты измерений или вычислений при конденсации чистого пара, которые окажутся расположенными ниже единицы.

При спутном течении пленки и пара может иметь место определенная интенсификация теплообмена по сравнению с неподвижным паром. Число Nu_0^* является масштабом, относительно которого при условиях $Re_L = idem$ и $Pr_L = idem$ можно судить о возможной интенсификации процесса теплообмена за счет трения на границе раздела.

В работе [8] представлены результаты экспериментальных исследований по теплообмену при конденсации неподвижного пара хладона R21 ($Pr_L = 3.5$), а в [9] – водяного пара ($Pr_L = 1.75$; $Pr_L = 1.12$) на вертикальной поверхности.

1.2. Анализ экспериментальных данных при конденсации пара в трубах.

Для такого анализа следует сделать ряд общих замечаний:

1. Если в публикации авторов приведено значение только среднего теплового потока и среднего по

длине трубы температурного напора и опыты выполнены при полной конденсации пара, то такие данные строгому анализу не поддаются. В таком эксперименте могут иметь место различные режимы течения пленки и пара. Четкой границы между ними неизвестно, следовательно, сопоставление их с расчетными моделями всегда будет некорректным.

2. При конденсации пара, особенно водяного, исследователи часто не приводят исходную концентрацию воздуха в нем. При конденсации пара она может оказаться значительной на выходном участке трубы. Это внесет заметные искажения в определение теплового потока, температурного напора, т. к. появляется заметное диффузионное сопротивление, которое никак не учитывается в перечисленных выше моделях [13].

3. При больших скоростях пара имеет место заметный унос жидкости из пленки в паровой поток. В [14] показано что, до настоящего времени не известны корректно определенные безразмерные параметры, которые позволили бы определить влияние этого явления на теплообмен.

В экспериментальных работах [7, 15–21] исследован теплообмен при конденсации движущегося пара внутри вертикальных труб. Опыты проведены при конденсации паров различных веществ, при разных давлениях, при полной и частичной конденсации пара в трубах разной длины и диаметра.

Необходимо отметить, что работы выполнены по различным методикам. Так, в [16, 17, 19] в экспериментальной трубе происходила полная конденсация пара. Каждой точке на графике или в таблице в этих публикациях соответствует свое значение скорости на входе и практически нулевая скорость пара на выходе из трубы. Изменение теплового потока приводило к изменению чисел Рейнольдса пленки на выходе из трубы и парового потока на входе в нее. На графиках или таблицах в цитируемых статьях приведены осредненные по длине значения удельного теплового потока и коэффициента теплоотдачи.

В работах [7, 15] значение скорости пара на входе для каждой серии экспериментов оставалось постоянным, а значение удельного теплового потока и числа Re пленки изменялось за счет изменения скорости пара на выходе из трубы. В работах этих авторов также приведены осредненные значения параметров в эксперименте.

В работах [18, 21, 20] приведены локальные значения удельного теплового потока и коэффициента теплоотдачи для короткого участка трубы. Наибольшее количество опытов проведено по кон-

денсации водяного пара. Эксперименты в работе [19] проведены при существенном изменении дав-

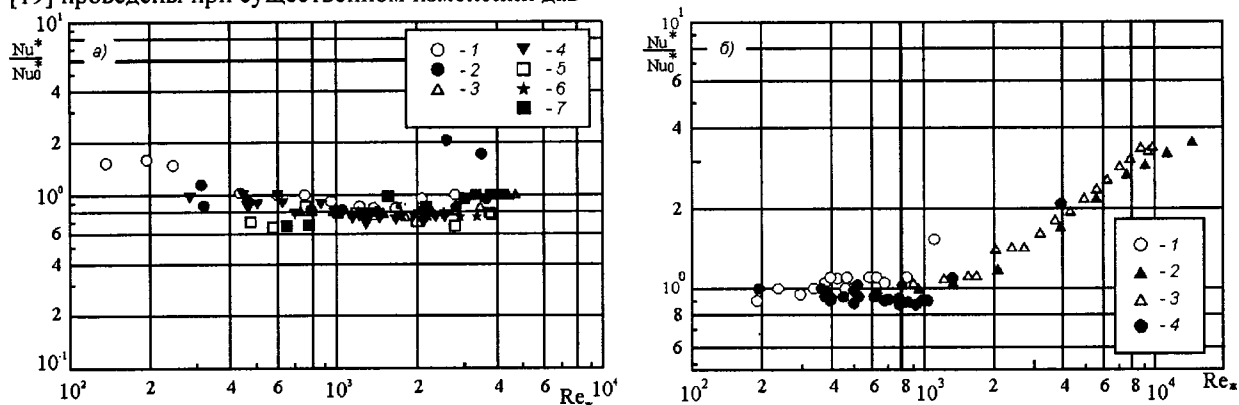


Рис. 1. Относительное изменение теплоотдачи в зависимости от Re_L при конденсации движущегося водяного пара в опытах [19]. (а) – $d = 19.3$ мм, $H = 1.5$ м: 1 – $P = 2.94$ МПа, 2 – 4.9, 3 – 6.86; $d = 20$ мм, $H = 3$ м: 4 – $P = 2.94$ МПа, 5 – 4.51, 6 – 6.87; 7 – $d = 10$ мм, $H = 1.5$ м, $P = 6.86$ МПа; (б) – $d = 10$ мм, $H = 1.5$ м: 1 – $P = 0.79$ МПа, 2 – $P = 2.94$; $d = 10$ мм, $H = 3.0$ м: 3 – $P = 2.94$ МПа, 4 – $P = 4.9$ МПа.

ления ($P = 0.79 - 6.86$ МПа) в трубах разной длины и диаметра. Результаты этих опытов в публикациях авторов представлены в виде таблиц с указанием всех параметров эксперимента. Наша обработка этих данных в координатах (1) показана на рис. 1 (опыты выполнены при полной конденсации пара в экспериментальной трубе).

Приведенная на рис. 1, а обработка опытов вызывает сомнение в достоверности этих данных. В подавляющем числе опытов, выполненных в трубах $d = 20$ мм отношение чисел Nu^*/Nu_0 меньше единицы и практически не зависит от скорости пара на входе в экспериментальный участок. Подобный результат получен в одной из серий опытов при конденсации в трубе $d = 10$ мм, $P = 6.86$ МПа. Эти результаты приведены на этом же рисунке.

Таблица 1. Локальные значения чисел Нуссельта при конденсации движущегося [21] и неподвижного [9] пара.

$U_v, \text{ м/с}$	Re_L			
	200	300	500	1000
4,8 [21]	0,195	0,19	0,18	0,19
10,4 [21]	0,2	0,195	0,185	0,19
15,1 [21]	0,205	0,2	0,19	0,2
0 [9]	0,21	0,2	0,195	0,19

При анализе данных, показанных на рис. 1, б видно, что достаточно большое количество измерений выполнено при условиях, когда влияние скорости пара практически отсутствует, поскольку отношение чисел Нуссельта при конденсации движущегося и неподвижного пара близка к единице $Re_L \leq 2 \cdot 10^3$. Только результаты измерений при высокой скорости пара на входе в трубу указывают на существенную интенсификацию процесса тепло-

обмена за счет воздействия пара на пленку конденсата (трения на границе раздела фаз и возможного уноса пленки в паровой поток). Дальнейшая обработка результатов измерений указанных авторов выполнялась только для опытов, показанных на рис. 1, б.

При анализе данных [21] обращает на себя внимание также практическое отсутствие влияния скорости пара на локальное число Нуссельта при изменении числа Рейнольдса пленки в диапазоне $200 \leq Re_L \leq 10^3$. В табл. 1 указаны значения локальных чисел Нуссельта для разных скоростей пара, которая менялась от 4,8 до 15,1 м/с при числах Re_L в диапазоне 200 – 1000. Здесь же для сравнения показаны числа Нуссельта при конденсации неподвижного пара [9]. Из таблицы видно, что полученные в экспериментах [21] числа Нуссельта чрезвычайно слабо зависят от скорости пара на входе в трубу и практически не отличаются от приведенных в [9] чисел Нуссельта при конденсации неподвижного пара.

Если считать, что при волновом режиме течения пленки термическим сопротивлением является «остаточная» толщина и теплообмен полностью зависит только от нее, то приведенный в табл. 1 результат нельзя считать неожиданным. Это лишь означает, что «остаточная» толщина пленки при изменении скорости пара в указанном диапазоне не меняется и, следовательно, термическое сопротивление пленки, измеренное в эксперименте, не зависит от скорости пара.

Числа Прандтля в опытах при конденсации неподвижного пара R21 [8] и движущегося при конденсации R11 [7] очень близки между собой. Сопоставление выполнено при $Re_L = idem$. При обработке данных отчетливо следует, что с ростом скорости пара растет отношение чисел Нуссельта. Для заданной скорости пара это отношение практически независимо от числа Re пленки. Отношение Nu^*/Nu_0 для всех представленных опытов больше единицы, что свидетельствует о влиянии скорости

пара на процесс теплообмена при конденсации пара в трубе.

Таким образом, данные, приведенные на рис. 1, б и в табл. 1, а также обработка опытов Кавалини [7], свидетельствуют о том, что существуют две области параметров, при которых:

- а) теплообмен практически не зависит от скорости пара на входе в трубу;
- б) наблюдается существенная интенсификация теплообмена с ростом скорости пара.

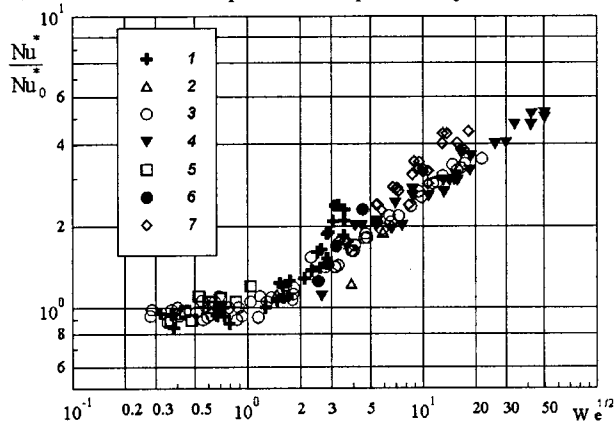


Рис. 2. Влияние уноса на теплообмен при конденсации движущегося пара: 1 – 5 – водяной пар (1 – по данным [15], 2 – [18], 3 – [19], 4 – [17], 5 – [20; 21]); 6 – бензол, по данным [16], 7 – хладон R11, [7].

1.3. Влияние уноса на теплообмен.

Авторы монографии [14] отмечают, что при кольцевом режиме течения поверхностные волны в пленке действуют как насосы, которые перекачивают жидкость из пленки в паровое ядро. Кроме того, существует движение капель в направлении поверхности пленки. Между этими процессами устанавливается динамическое равновесие, в котором скорость подачи капель в газовое ядро от пленки волнами возмущения уравнивается выпадением капель. В настоящее время существует достаточно большое количество эмпирических и полумемпирических зависимостей для определения скорости пара при которой начинается унос [14; 23-27]. В качестве параметра, характеризующего начало уноса пленки в [25] приводится следующее значение критерия Вебера, определенного в экспериментах:

$$We_{cr}^{1/2} = U_V \rho_V^{1/2} \delta^{1/2} / \sigma^{1/2} = 2 \quad (2)$$

Недостатком выражения (2) является сложность при вычислении среднего значения толщины пленки, которая неоднозначно зависит от числа Re пленки (режима течения).

При волновом режиме течения пленки в [28] рекомендуется среднюю толщину пленки определять по эмпирической зависимости Фулфорда

$$\delta = 0,883(3\nu^2/g)^{1/3} Re_L^{0,337} \quad (3)$$

$$Re. \leq Re_L \leq Re_{cr}$$

При турбулентном режиме течения пленки, когда $Re_L > Re_{cr}$, согласно [11], средняя толщина определяется как:

$$\delta = Re_{cr}^{-0,2} (3\nu^2/g)^{1/3} Re_L^{8/15} \quad (4)$$

Здесь числа Рейнольдса пленки Re , и Re_{cr} соответствуют переходу ламинарного режима к волновому и волнового к турбулентному и вычисляются из приведенных выражений в [11].

Представленные зависимости для определения толщины пленки позволяют записать, что

$$\delta \approx (\nu^2/g)^{1/3} Re_L^n \quad (5)$$

Подставив (5) в (2) получим:

$$We^{1/2} = [Fr_V^{1/2} (\rho_V / \rho_L)^{1/2} Ga^{1/6} Re_L^{n/2}] / Ka^{1/6} \quad (6)$$

Число Фруда здесь определяется по скорости пара на входе в трубу, а число Рейнольдса пленки – по плотности орошения на выходе из трубы.

В выражении (6) показатель степени при Re_L будет варьироваться в пределах $1/6 \leq n_1 \leq 1/4$ по мере изменения режима течения пленки.

Обработка опытов при конденсации движущегося водяного пара [15, 17-19; 20; 21] при конденсации бензола [16], а также хладона R11 [7], в трубах различной длины и диаметра на рис.2 показана в координатах:

$$Nu^* / Nu_0^* = (Fr_V^{1/2} (\rho_V / \rho_L)^{1/2} Ga^{1/6} Re_L^n) / Ka^{1/6} \quad (7)$$

Сопоставление выполнено при $Re_L = idem$ и $Pr = idem$.

Представленная зависимость (7) естественно является эмпирической, поскольку в ее основе лежит эмпирическое выражение для вычисления критического значения числа Вебера (2). Определяющие критерии в выражении (7) содержат два линейных масштаба: вязко-гравитационную постоянную $(\nu^2/g)^{1/3}$ и длину трубы H , и не зависят от диаметра трубы. Экспериментальные данные, показанные на рис. 2, получены при конденсации в трубах, диаметр которых многократно изменялся.

2. ВЫВОД.

Обработка опытов позволяет утверждать, что унос гребней волн в поток пара является одним из основных механизмов интенсификации теплообмена при конденсации движущегося пара внутри труб. При $We > We_{cr}$ начинается многократная интенсификация теплообмена по сравнению с неподвижным.

При $We < We_{cr}$ влияние уноса не наблюдается и интенсивность теплообмена при конденсации движущегося и неподвижного пара совпадают между собой. По нашему мнению, это связано с тем, что при волновом режиме течения пленки «остаточная» толщина пленки не изменяется под действием потока пара.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ.

a – коэффициенты температуропроводности, m^2/c ; α_0 и α – коэффициенты теплоотдачи при конденсации неподвижного и движущегося пара, $Вт/(m^2 \cdot град)$; C_p – теплоемкость жидкости, $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$; d и H – внутренний диаметр трубы и ее длина, m ; F – площадь поперечного сечения трубы, m^2 ; g – ускорение свободного падения, m^2/c ; $(\nu^2/g)^{1/3}$ – вязко-гравитационная постоянная, m ; P – давление, $Н/м^2$; q – удельный тепловой поток, $Вт/м^2$; r – скрытая теплота парообразования, $Дж/кг$; t_w и t_s – темпера-

тура стенки и насыщенного пара, град; U_V и U_L – скорости пара и скорость жидкости, м/с; \bar{u}_L – средняя скорость жидкости, м/с; $\Delta t = t_s - t_w$ – температурный напор пар – стенка, град; δ и δ_{cr} – толщина и критическая толщина, м; λ – теплопроводность, Вт/(м·град); ν , μ – кинематическая и динамическая вязкость, м²/с, Па·с; ρ – плотность жидкости и пара, кг/м³; σ – поверхностное натяжение, Н/м; $Fr_V = U_V^2 / gH$ – число Фруда (6); $Ga = H^3 g / \nu^2$ – число Галилея; $Ka = (\sigma^3 / \nu_L^4 \rho_L^3 g)^{1/2}$ – число Капицы; n и n_1 – переменные показатели степени в (6) и (7); $Nu_0^* = \alpha_0 (\nu_L^2 / g)^{1/3} / \lambda$ и $Nu^* = \alpha (\nu_L^2 / g)^{1/3} / \lambda$ – числа Нуссельта при конденсации неподвижного и движущегося пара; $Pr_L = \nu_L / a_L$ и $Pr_V = \nu_V / a_V$ – числа Прандтля для жидкости и пара; $Re_L = \bar{U}_L \cdot \delta / \nu_L = \bar{q}H / \mu$ – число Рейнольдса пленки; $We = U_V^2 \rho_V \cdot \delta / \sigma$ – критерий Вебера. Индексы: * – волновой; *in* – вход; *out* – выход; *L* – жидкость; *cr* – критический; *l* – ламинарный; *V* – пар; *W* – стенка; *max* – максимальный; черта сверху – среднее значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исаченко В. П. Теплообмен при конденсации. М.: Энергоиздат, 1977.
- Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1980.
- Крекунов О. П., Савус А. С. Процессы конденсации и конденсаторы масложирового производства. /Под ред. Фирсовой Э. П., С.-Пб., 1998.
- Shah M. M. A General Correlation for Heat Transfer During Film Condensation Inside Pipes // Int. J. Heat Mass Transfer. 1979. Vol. 22, No. 4. Pp. 547–556.
- Cavallini A., Delcol D., Doretto L., Longo G. A., and Rossetto L. Condensation Heat Transfer with Refrigerants. Two Phase Flow Modelling and Experimentation., Pisa, 1999. Edizione EST Pisa, 1999. Vol.1. Pp. 71–88
- Bell K. J. and Panchal C. B. // Condensation. Sixth Intern. Heat Transfer Conference. Toronto, Canada, 7–11 august 1978, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, London, 1978, Vol.6. Pp. 361–369.
- Cavallini A. and Zeechin R. High velocity condensation of R11 vapors inside vertical tubes // ANNEX. 1969. No 7. Pp. 385–396.
- Гогонин И. И., Дорохов А. Р., Сосунов В. И. Теплообмен при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности. // ИФЖ. 1978. Т. 35, № 6. С. 1050–1056.
- Кутателадзе С. С., Шренцель А. Н. Формулы и графики для расчетов общего коэффициента теплоотдачи в вертикальных подогревателях при пленочной конденсации медленно движущегося насыщенного пара. // Советское котлотурбостроение. 1938. № 4. С. 149–152.
- Кутателадзе С. С., Гогонин И. И., Григорьева Н. И. Анализ теплообмена при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности // ИФЖ. 1983. Т. 44, № 6. С. 885–894.
- Brauer H. Stromung und Wärmeübergang bei Rieselfilmen. VDI – Forschungs, 1956. Helt. 457. S. 5–40.
- Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1979.
- Берман Л. Д. Влияние скорости пара на теплообмен при ламинарной пленочной конденсации. // ТОХТ. 1973. Т. 3, № 5. С. 706–716.
- Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения. М.: Энергия, 1974.
- Iacob M., Erk S., Eck H. Verbesserte Messungen und Berechnungen des Wärmeüberganges beim Kondensieren strömenden Dampfes in einem vertikalen Rohr. Phys., Zeitschrift, 1935. Bd 36. Ss. 73–84.
- Tepe J. B. and Mueller A. C. Condensation and subcooling inside an inclined tube. // Chem. Eng. Progress. 1947. Vol. 43. Pp. 267–278.
- Кутателадзе С. С., Консетов В. В. Теплообмен при конденсации пара внутри вертикальных труб. // Изв. ВУЗов. Энергетика. 1961. № 11. С. 63–69.
- Исаченко В. П., Солодов А. П., Тирунараян М. А. Исследование теплоотдачи при конденсации водяного пара внутри вертикальной трубы. // Тр. МЭИ. 1965. Вып. 63. С. 97–106.
- Боришанский В. М., Волков Д. И., Иващенко Н. И., Воронцова Л. А., Илларионов Ю. Т., Крекунов О. П., Борков А. П., Макарова Г. А., Алексеев И. А. Теплоотдача при конденсации пара внутри труб и змеевиков. // Труды ЦКТИ. 1975. Вып. 131. С.122–126.
- Blangetti F., Schlünder E. U. Local Heat Transfer Coefficients on condensation in vertical Tube. // 6th Intern. Heat Transfer Conference, Toronto, 1978. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, London, 1978. Vol. 2. Pp. 437–442.
- Blangetti F., Krebs R. Film condensation and Evaporation in vertical Tubes with Superimposed Vapor Flow. // Heat Exchanger Sourcebook. Springer – Verlag, 1986. Pp. 449–453.
- Дейч М. Е., Тетера И. П. Результаты статистического анализа волновой структуры поверхности раздела фаз в двухфазном пограничном слое. // ТВТ. 1980. Т. 18, № 4, С. 801–811.
- Ishii M. And Goolmes M. A. Inception Criteria for Droplet Entrainment in Two-Phase Concurrent Film-Flow. // AJChE J.. 1975. Vol. 21, No. 2. Pp. 308–318.
- Быков В. Н. Исследование образования и деформации спектра капель в двухфазных потоках методом голографии: Автор. дис. канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1975.
- Гирин А. Г. Гидродинамическая неустойчивость и режимы дробления капель // ИФЖ. 1985. Т. 48, № 5. С. 771–776.
- Jensen M. K. The liquid film and the core region velocity profiles in annular two-phase flow. // Int. J. Multiphase Flow. 1987. Vol. 13, No. 5. Pp. 615–628.
- Тананайко Ю. М., Воронцов Е. Г. Методы расчета и исследования пленочных процессов. Киев: Техника, 1975. С. 311.