

ПЛЕНОЧНАЯ КОНДЕНСАЦИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПАРА НА ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ

И. И. Гогонин, А. Р. Дорохов, В. И. Сосунов

(Новосибирск)

Расчет теплообмена при пленочной конденсации движущегося пара на горизонтальном цилиндре в настоящее время возможен при целом ряде упрощающих предпосылок. Актуальной является задача экспериментальной проверки предлагаемых зависимостей [1—3] с целью дальнейшего уточнения механизма конденсации движущегося пара. В литературе имеется ограниченное количество данных, которые могли бы быть использованы для этой цели [4—8]. Следует отметить их значительное расхождение в сопоставимых условиях, а также отсутствие систематических измерений по таким важным для анализа зависимостям, как зависимость коэффициента теплоотдачи от температурного напора, давления конденсации, геометрических параметров.

Данная работа является продолжением исследований по конденсации движущегося пара фреона-21 (Ф-21, CHFCl_2) на горизонтальных цилиндрах. Опыты проводились на стенде и по методике [8].

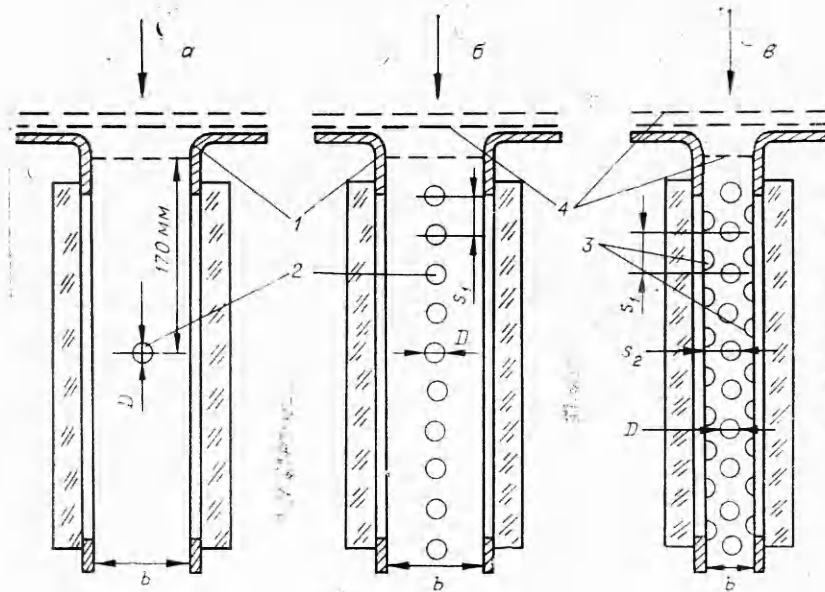
Опыты проводились на горизонтально расположенных никелевых трубах наружным диаметром $D = 16$ мм и длиной $L = 580$ мм, которые помещались в конденсатор с внутренним диаметром 400 мм. Температуру стенки t_w экспериментальных участков измеряли шестью термопарами, зачеканенными в среднем сечении по периметру трубы, показания которых осреднялись. Температуру насыщенного пара t'' измеряли термопарой и определяли по $p - T$ данным для фреона-21, измеряя давление насыщенного пара образцовым манометром класса 0,35.

Тепловой поток q на наружной поверхности экспериментального участка определяли по изменению энтальпии охлаждающей воды, которая поступала из бака постоянного уровня. Изменение температурного напора $\Delta t = t'' - t_w$ достигалось добавлением в охлаждающую воду горячей воды.

Пределы изменения основных параметров конденсации составили $q = (3-150) \cdot 10^3$ Вт/м², $\Delta t = 1-30^\circ\text{C}$, $t'' = 60-90^\circ\text{C}$. Точность определения коэффициента теплоотдачи $\alpha = q/\Delta t$ при $\Delta t \geq 2^\circ\text{C}$ оценивается в 10%.

В опытах по конденсации движущегося пара экспериментальные участки располагались в канале, геометрию которого можно было изменять. Реализуемые в эксперименте схемы расположения экспериментальных участков показаны на фиг. 1, а-в. В случае, изображенном на фиг. 1, а, экспериментальный участок 2 располагался на расстоянии 170 мм от входа пара в канал. Расстояние между стенками канала 1 в различных сериях опытов составляло $b = 26, 46$ и 66 мм. Был сделан плавный вход пара в канал, а также установлены три успокоительные решетки 4. При расположении экспериментальных участков по схеме, изображенной на фиг. 1, б, расстояние между стенками канала составляло 66 мм, а опыты проводились последовательно на 1, 4 и 9-й трубках десятирядного коридорного пучка. В случае, представленном на фиг. 1, в, расстояние между стенками составляло 26 мм и в канале дополнительно были установлены вставки 3, моделирующие шахматный пучок с $s_1/D = 1,87$, $s_2/D = 0,81$. Опыты проводились на каждой трубке пучка без подачи охлаждающей воды на вышерасположенные.

Эксперимент показал, что, несмотря на столь разнообразные условия, в которых были проведены опыты, величина коэффициента теплоотда-

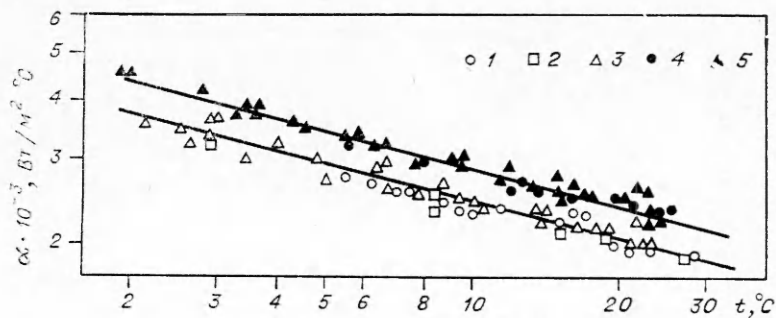


Ф и г. 1

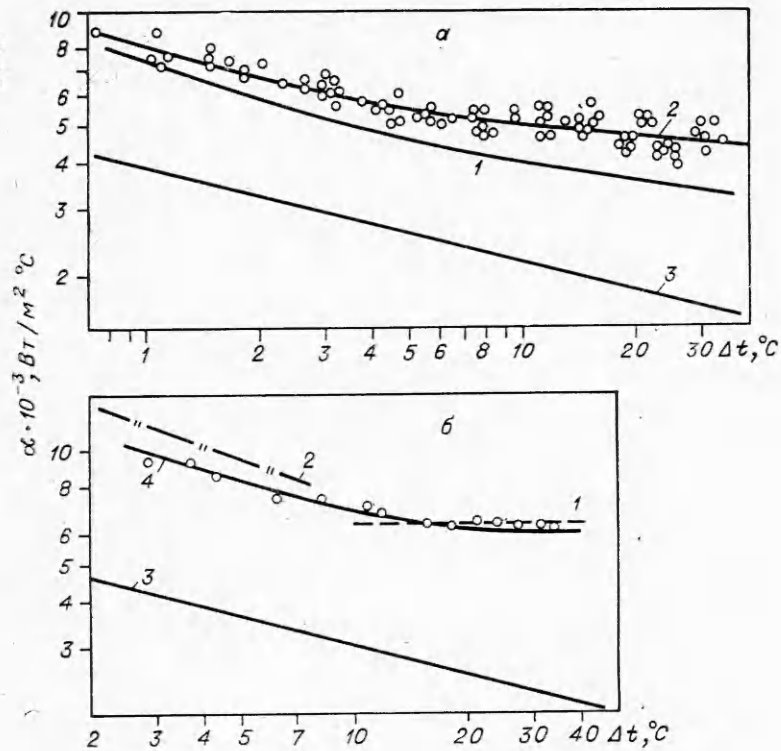
чи при отнесении скорости пара к проходному сечению канала имела одно и то же значение. На фиг. 2 представлена часть опытных данных при скоростях движения пара $w = 0,57$ м/с (точки 1—3) и $w = 1,1$ м/с (точки 4, 5) при $t'' = 60^\circ\text{C}$. Точки 1, 4 соответствуют схеме расположения участка, изображенной на фиг. 1, а, 2 — фиг. 1, б, 3, 5 — фиг. 1, в. Опыты, проведенные на различных трубах пучка по его высоте при одинаковой скорости пара и температуре насыщения, показали, что коэффициент теплоотдачи имеет (в пределах погрешности эксперимента) одно и то же значение.

Таким образом, величина среднего коэффициента теплоотдачи при конденсации движущегося пара в исследованном диапазоне скоростей определяется только средней скоростью парового потока и не зависит от его аэродинамики ($\Delta t = \text{idem}$).

В представленных опытах по конденсации движущегося пара особое внимание было обращено на возможно более точное определение характера зависимости коэффициента теплоотдачи α от температурного напора Δt . Для этой цели по сравнению с ранее опубликованными данными [8]



Ф и г. 2



Фиг. 3.

была повышена точность определения α в диапазоне небольших ($\Delta t \leq 5^\circ\text{C}$) температурных напоров.

На фиг. 3, *a* приведены данные по зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора при $t'' = 60^\circ\text{C}$ и $w = 4,3$ м/с при конденсации движущегося пара на трубке диаметром 16 мм (линия 1 — расчет по формуле (3), 2 — линия, осредняющая опытные данные, 3 — расчет по [11]), а на фиг. 3, *б* — на трубке диаметром 2,5 мм $w = 3,81$ м/с (линия 1 — расчет по (5), 2 — расчет по (6), 3 — расчет по [11], 4 — линия, осредняющая опытные данные). Аналогичный вид $\alpha - \Delta t$ -зависимости получен на трубке $D = 2,5$ мм, $w = 5,0$ м/с при $t'' = 40^\circ\text{C}$. Из фиг. 3, *a*, *б* видно, что при больших температурных напорах α практически не зависит от Δt .

Причиной, обуславливающей изменение характера $\alpha - \Delta t$ -зависимости в условиях ламинарного стекания пленки конденсата, следует считать изменение закона взаимодействия на границе раздела фаз пар — пленка конденсата, определяемого коэффициентом трения c_f . Следует отметить, в частности, большое влияние на величину c_f поперечного потока вещества.

Так, если c_f полностью определяется импульсом, переносимым поперечным потоком пара [9], то

$$(1) \quad \text{Nu}/\sqrt{\text{Re}} = \text{const.}$$

Из (1) следует, что коэффициент теплоотдачи не зависит от температурного напора, а также от физических свойств пара.

Если скорость пара достаточно велика, так что можно пренебречь влиянием поперечного потока пара на величину c_f , то соответствующий закон теплообмена имеет вид

$$(2) \quad Nu/\sqrt{Re} \sim (Pr K/R)^{1/3},$$

где $Nu = \alpha D/\lambda$, $Re = wD/\nu$, $Pr = \nu/a$, $K = r/c\Delta t$ — критерии Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля и Кутателадзе; $R = (\rho\mu/\rho''\mu'')^{1/2}$; ρ , ρ'' , μ , μ'' — плотность и динамическая вязкость жидкости и пара; λ , ν , a , c — теплопроводность, кинематическая вязкость, температуропроводность, теплоемкость жидкости. Из (2) следует $\alpha \sim \Delta t^{-1/3}$. Зависимость коэффициента теплоотдачи от давления учитывается комплексом R . Формулы (1), (2) были получены в [9] в результате решения уравнений движения и энергии для пленки конденсата на горизонтальной пластине и уравнения движения паровой фазы при отсутствии силы тяжести. В полной постановке задача о конденсации движущегося пара впервые рассмотрена в [10]. Численное решение задачи о конденсации движущегося пара на цилиндре и его аналитическая аппроксимация выполнены в [3]. Предложенное авторами аппроксимационное выражение имеет вид

$$(3) \quad Nu/\sqrt{Re} = \chi(1 + 0,276 Pr K/\chi^4 Fr)^{1/4},$$

где

$$\chi = 0,9(1 + Pr K/R)^{1/3}.$$

Или в другой форме

$$(4) \quad \alpha/\alpha_0 = (1 + 3,62\chi^4 Fr/Pr K)^{1/4},$$

где α_0 — коэффициент теплоотдачи при конденсации неподвижного пара [11]; $Fr = w^2/gD$ — критерий Фруда. По формуле (4) относительное изменение теплоотдачи зависит от одного комплексного критерия $\chi^4 Fr/Pr K$. Зависимость (3) удовлетворяет предельным соотношениям, полученным в [9]. Так, при больших Δt (малых K) $\chi \rightarrow \text{const}$ и (3) переходит в

$$(5) \quad Nu/\sqrt{Re} = 0,9.$$

При малых Δt из (3) следует

$$(6) \quad Nu/\sqrt{Re} = 0,9(1 + PrK/R)^{1/3}.$$

Заметим также, что при больших температурных напорах из (4) можно получить

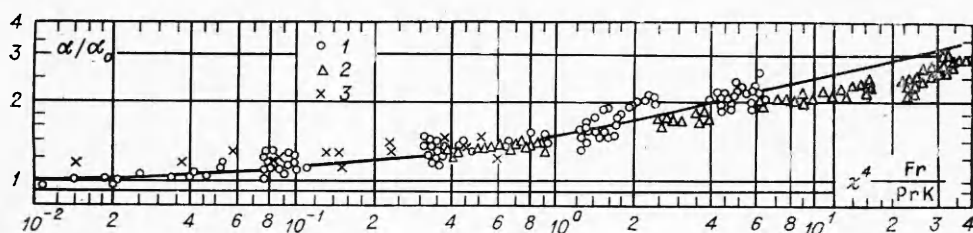
$$(7) \quad \alpha/\alpha_0 = f(Fr/PrK).$$

Соотношение (7) было использовано при обобщении опытных данных в [8]. Однако такое представление является неоднозначным и возможно только в ограниченном диапазоне изменения температурных напоров, когда $\chi \rightarrow \text{const}$.

На фиг. 3, а, б приведены экспериментальные данные по конденсации движущегося пара при максимальных скоростях. Здесь же нанесены расчетные зависимости (3), (5), (6) и расчет по формуле Нуссельта для неподвижного пара.

Экспериментальные данные по конденсации фреона-21 при $t'' = 40; 60; 90^\circ\text{C}$ и скоростях пара 0,2—5 м/с на цилиндрах диаметром 16 мм (точки 1) и 2,5 мм (точки 2) [8], а также данные по конденсации водяного пара (точки 3) [6] на фиг. 4 обработаны в координатах (4) (сплошная линия). Скорость пара отнесена к проходному сечению канала.

Как видно из фиг. 3, а, б и 4, имеется удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей.



Ф и г. 4

На фиг. 5 представлены результаты экспериментов при скоростях пара $w = 0,57; 1,1; 2,3; 4,3$ м/с (точки 2—5, $D = 16$ мм, $t'' = 60^\circ$ С), обработанные в координатах

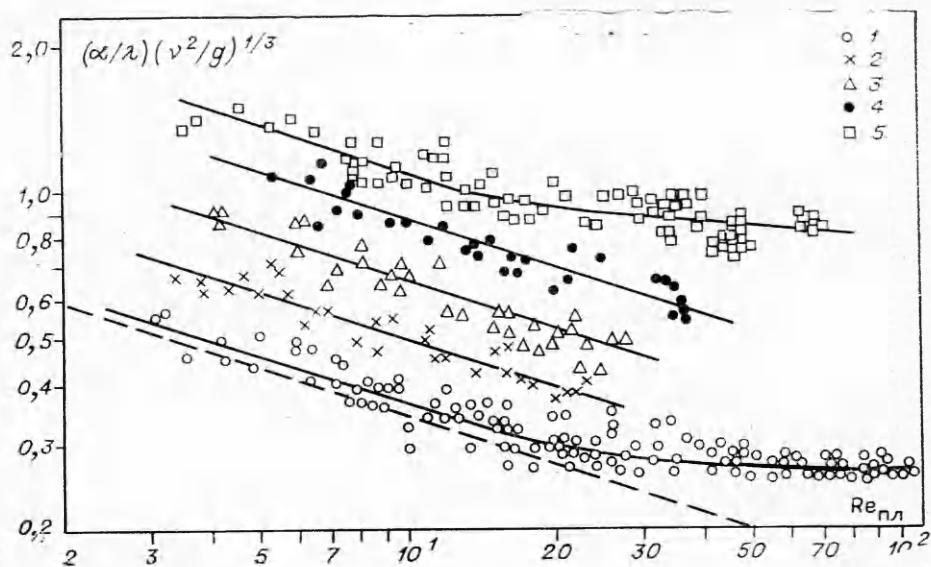
$$(8) \quad Nu^* = f(Re_{пл}),$$

где

$$Nu^* = (\alpha/\lambda)(v^2/g)^{1/3}; \quad Re_{пл} = (\pi D/2) \cdot q/\mu w.$$

На фиг. 5 представлены данные по конденсации неподвижного пара в широком диапазоне чисел Рейнольдса пленки конденсата [12] (точки 1). В случае конденсации неподвижного пара при больших температурных напорах также имеет место изменение характера $\alpha - \Delta t$ -зависимости. В этом случае причиной, обуславливающей это изменение, является волнообразование в пленке конденсата. О том, что перегиб $\alpha - \Delta t$ -зависимости при конденсации движущегося пара обусловлен изменением закона взаимодействия фаз, а не режима течения пленки конденсата, свидетельствуют опыты по конденсации движущегося пара на цилиндре диаметром 2,5 мм (см. фиг. 3, б). В этом случае число Рейнольдса пленки не превышало $Re_{пл} = 15$.

Таким образом, на характер экспериментально определяемых $\alpha - \Delta t$ -зависимостей оказывает влияние как режим течения пленки конденса-



Ф и г. 5

та, так и изменение закона трения на границе раздела фаз пар—пленка конденсата. Оба эти фактора необходимо учитывать при анализе и обобщении опытных данных по конденсации движущегося пара.

Поступила 17 III 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Берман Л. Д. О теплоотдаче при пленочной конденсации движущегося пара.— «Теплоэнергетика», 1966, № 7, с. 56—62.
2. Шекриладзе И. Г. Пленочная конденсация движущегося пара.— «Сообщения АН ГССР», 1964, т. 35, № 3, с. 619—625.
3. Fujii T., Uehara H., Kurata Ch. Laminar filmwise condensation of flowing vapour on a horizontal cylinder.— «Int. J. Heat Mass Transfer», 1972, vol. 15, N 2, p. 235—246.
4. Кутателадзе С. С. Влияние движения пара на коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации.— «Советское котлотурбостроение», 1941, № 1—2.
5. Фуке С. Н. Теплоотдача при конденсации движущегося пара в горизонтальном трубном пучке.— «Теплоэнергетика», 1957, № 1, с. 35—38.
6. Берман Л. Д., Туманов Ю. А. Исследование теплоотдачи при конденсации движущегося пара на горизонтальной трубе.— «Теплоэнергетика», 1962, № 10, с. 77—83.
7. Иванов О. П., Бутырская С. Т., Мамченко В. О. Теплообмен при конденсации движущегося пара фреона-12 на пучках гладких и оребренных труб.— «Холодильная техника», 1971, № 9, с. 24—27.
8. Гогонин И. И., Дорохов А. Р. Экспериментальное исследование теплообмена при конденсации движущегося пара фреона-21 на горизонтальных цилиндрах.— ПМТФ, 1976, № 2, с. 133—139.
9. Cess R. D. Laminar-film condensation on a flat plate in the absence of a body force.— «Zeitschr. für Angew. Math. und Phys.», 1960, Bd 11, N 28, S. 426—433.
10. Черный Г. Г. Ламинарные движения газа и жидкости в пограничном слое с поверхностью разрыва.— «Изв. АН СССР. ОН», 1954, № 12, с. 38—67.
11. Nusselt W. Die Oberflächen Kondensation des Wasserdampfes.— «Zeitschrift der VDI», 1916, Bd 60, N. 27—28, S. 541—549.
12. Гогонин И. И., Дорохов А. Р., Сосунов В. И. Теплоотдача при конденсации неподвижного пара на пучке гладких горизонтальных труб.— «Теплоэнергетика», 1977, № 4, с. 33—36.

УДК 532.542 : 660.095.26

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ В ПРОТОЧНОМ РЕАКТОРЕ

*С. А. Бостанджиян, В. И. Боярченко, П. В. Жирков,
Ж. А. Зиненко*

(Черноголовка)

В литературе последних лет часто встречаются исследования, посвященные процессу полимеризации в непрерывном проточном реакторе. Однако работ в которых учитывается зависимость вязкости реагирующей смеси от степени полимеризации вещества, чрезвычайно мало, хотя эта зависимость существенным образом влияет на профили температуры и степени полимеризации вещества, перепад давления и другие характеристики процесса. Отметим работу [1], в которой рассматривался адиабатический режим протекания полимеризации и была принята слабая зависимость вязкости от степени полимеризации, работу [2], в которой с целым рядом упрощающих допущений аналитически исследовалась изотермическая полимеризация, и работу [3], в которой проводилось