

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КАПЕЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

Г. И. ФУКС, В. В. ИВАНОВ

В статье излагаются результаты теоретических и экспериментальных исследований теплоотдачи при капельной конденсации пара. Получена система критериев подобия для обобщения опытных данных.

Капельная конденсация, возникая на охлаждаемых несмачиваемых поверхностях, сопровождается очень высокими (до 200000 ккал/м<sup>2</sup>. час. °С) коэффициентами теплоотдачи. Это является причиной, почему эта форма конденсации привлекает все большее и большее внимание исследователей [1, 2, 3].

Интересные попытки теоретического исследования теплообмена при капельной конденсации сделаны Фатика и Катцем [4] и Сугавара и Мицуйоси [5]. Они рассматривают вертикальную полосу на поверхности охлаждения, соответствующую следу только что скатившейся капли. При этом делаются допущения: все капли на этой полоске начинают расти одновременно и одновременно достигают одинакового критического диаметра, в любой момент времени роста капли имеют одинаковый размер и форму шарового сегмента, пар неподвижен, а тепловые сопротивления на границе пар—поверхность капель и между паром и „обнаженными“ участками стенки отсутствуют. Тогда средний коэффициент теплоотдачи определится выражением [5]

$$\alpha = \frac{V_c}{\int_0^{V_c} \frac{A}{\psi K_d + K_0(1-A)} dV}, \quad (1)$$

где  $V$ —переменный объем конденсата на поверхности охлаждения во время роста капель;  $V_c$ —объем конденсата к концу периода роста капель;  $A$ —отношение площади, покрытой каплями, ко всей площади охлаждаемой поверхности;  $K_d$ —коэффициент теплопередачи через растущую каплю;  $K_0$ —коэффициент теплопередачи через стенку к охлаждающей воде;  $\psi$ —поправочный коэффициент.

Однако уравнение (1) не может быть использовано в практических расчетах, так как, во-первых, содержит в себе неопределенные константы  $V_c$  и  $\psi$ , во-вторых, неизвестна функциональная связь  $K_d$  и  $A$  от  $V$ .

В настоящей работе сделана попытка рассчитать перенос тепла в условиях устойчивой капельной конденсации чистого пара на основе теории подобия.

Основная система уравнений, описывающая теплообмен при капельной конденсации чистого пара, имеет следующий вид.

I. Уравнение для коэффициента теплоотдачи (1);

II. Уравнение для коэффициента теплопередачи через каплю

$$K_d(t_n - t_k) f = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right) f,$$

где  $(t_n - t_k)$  — разница температур между поверхностью капли и ее основанием,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности конденсата,  $\left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)$  — градиент температуры в жидкой фазе на границе со стенкой,  $f$  — площадь основания капли;

III. Уравнения теплопроводности, движения и сплошности жидкой фазы

$$a \nabla^2 t = \frac{Dt}{d\tau},$$

$$\vec{g}\rho - \text{grad } p + \mu \nabla^2 \vec{W} = \rho \frac{D\vec{W}}{d\tau},$$

$$\text{div } \vec{W} = 0;$$

IV. Условия взаимодействия фаз на границе конденсата и пара

$$t_n = t_{2p},$$

$$p_{2p} = p'' + 2 \frac{\sigma}{R}, \quad \text{IV-a}$$

$$r_{\gamma} W_k = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_{2p}, \quad \text{IV-b}$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение конденсата,  $W_k$  — скорость роста капли радиуса  $R$ .

В условия однозначности этой задачи входят физические константы, разность между температурой насыщения и температурой охлаждаемой стенки:  $\Delta t = t_n - t_{cm}$  (или плотность теплового потока  $q = \alpha \Delta t$ ), геометрические размеры системы. Поскольку рассматривается установившийся (в отношении больших интервалов времени) процесс, то начальные условия не задаются.

Обработывая уравнения I—IV методом теории подобия, получаем следующие критерии.

Из уравнений I—II найдем модифицированный критерий Нуссельта

$$Nu_k = \frac{\alpha - \frac{1-A}{A} K_0}{\lambda} l$$

Из уравнений III — критерии гомотронности, Фруда, Эйлера, Рейнольдса, Фурье, Пекле. Из уравнения IV-a критерий, характеризую-

щий соотношение давления насыщения и скачка давления на границе раздела фаз  $K_p = \frac{pl}{\sigma}$ .

Из уравнения IV-б—критерии

$$\frac{r \gamma W_{\kappa} l}{\lambda \Delta t} = \frac{W_{\kappa} l}{a} \cdot \frac{r}{C_p \Delta t} = Pe \cdot K$$

При изучении величин, осредненных во времени, отбрасываются критерии гомохронности и Фурье, содержащие время. Выпадает также критерий Эйлера  $\left( Eu = \frac{\Delta p}{\rho W^2} \right)$ , так как величина  $\Delta p$  не входит в условия однозначности данной задачи.

Введем вместо критерия Фруда идентичный ему критерий Галилея  $Ga = Fr \cdot Re^2 = \frac{gl^3}{\nu^2}$ . Имея в виду, что  $Pe$ ,  $Pr$  и  $Re$  связаны соотношением  $Pe = Re \cdot Pr$ , опускаем  $Re$ , вводя критерий  $Pr$ .

Таким образом, критериальное уравнение для теплообмена при капельной конденсации чистого пара будет иметь вид

$$Nu_{\kappa} = \frac{\alpha - \frac{1-A}{A} K_0}{\lambda} l = \Phi(Ga, Pe, Pr, K, K_p) \quad (2)$$

Для определения относительной площади, покрытой каплями, была проделана количественная обработка большого числа фотографий процесса капельной конденсации (некоторые из фотографий даны на рис. 1). Как оказалось, величина  $A$  лежит в пределах от 0,35 до 0,55. Аналогичные значения  $A$  получены в опытах Хэмпсона [3], Фатика и Катца [4], Сугавара и Мицуйоси [5].

Для простоты расчетов можно положить, что площадь, занятая каплями, составляет в среднем 45 % от всей поверхности охлаждения. Тогда критерий Нуссельта в уравнении (2) примет вид:

$$Nu_{\kappa} = \frac{\alpha - 1,22 K_0}{\lambda} l$$

Визуальные наблюдения и фотоснимки процесса капельной конденсации показывают, что центры конденсации распределены по поверхности беспорядочно и, следовательно, равномерно. В этих условиях интенсивность теплообмена не должна зависеть от линейного размера поверхности. Здесь в качестве характерного размера целесообразно взять критический диаметр капли  $D_{\kappa}$ , который может быть определен зависимостью [6]

$$D_{\kappa} = 0,018 \beta \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}},$$

где  $\beta$ —угол смачивания,  $\sigma$ —поверхностное натяжение конденсата,  $\gamma' - \gamma''$ —разность удельных весов конденсата и пара. Опыты, проведенные с керосином, машинным маслом СУ, олеиновой и стеариновой, растворенной в эфире, кислотами, показали, что в условиях устойчивой капельной конденсации угол  $\beta$  колеблется в пределах

примерно от  $90$  до  $100^\circ$  и практически не зависит от гидрофобизатора. Поэтому в уравнении (2) вместо  $D_k$  вводим определяющий размер  $l = \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}}$ , пропорциональный  $D_k$ , но не содержащий  $\beta$ .

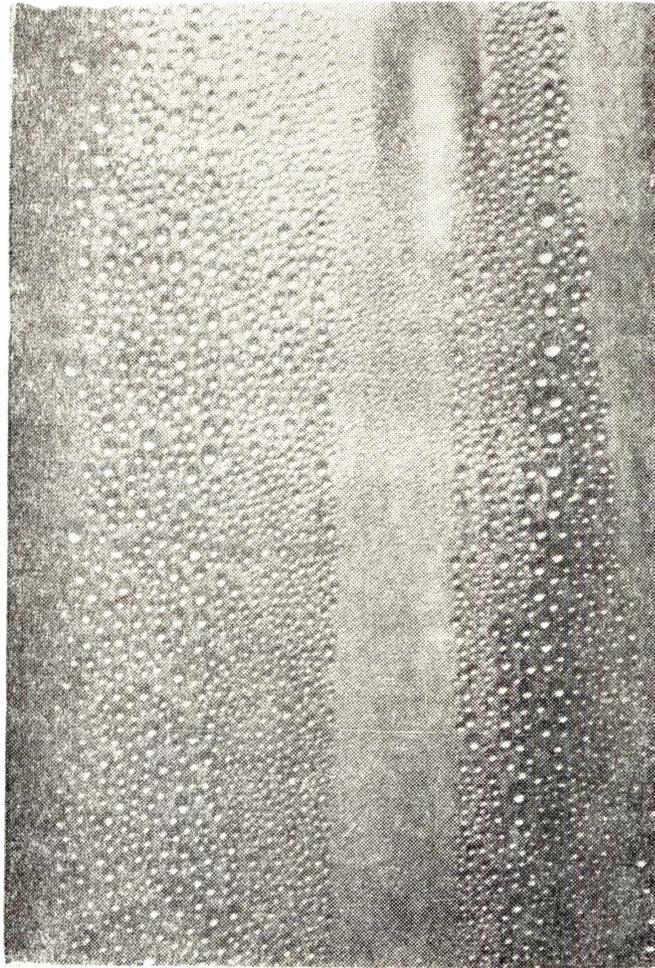


Рис. 1. Фотоснимки процесса капельной конденсации на охлаждаемой плоской стенке.

Что касается переменной  $W$ , входящей в критерий Пекле, то принимается, что эта эмпирическая величина, имеющая размерность скорости, равна  $\frac{D_k}{\tau_c}$ , где  $\tau_c$  — время существования капли на поверхности охлаждения. Применение такой величины обусловлено следующим. Процесс капельной конденсации во многом аналогичен процессу пузырькового кипения, для которого значение  $\frac{D_0}{\tau_c}$ , где  $D_0$  — отрывной диаметр парового пузыря, не зависит от тепловой нагрузки поверхности нагрева и гидродинамических условий процесса [7]. Опыты Гельмана [6] по капельной конденсации ртутного пара показали, что с ростом теплового потока частота образования капель  $\frac{1}{\tau_c}$  практически постоянна, хотя отмечалось некоторое увеличение  $D_k$ . В наших опытах по капельной конденсации водного пара, проведенных в том же интервале изменения тепловой нагрузки, увеличения  $D_k$  не наблюдалось.

Можно положить, что и для капельной конденсации величина  $\frac{D_k}{\tau_c}$  не зависит от тепловой нагрузки и гидродинамических условий процесса, хотя, по-видимому, как и в случае пузырькового кипения, меняется с давлением. Это может служить основанием для включения  $\frac{D_k}{\tau_c}$ , как своеобразной физической константы, в условия однозначности и в определяющий критерий Пекле.

Из уравнения (2), как частный случай, получается критериальное уравнение теплообмена при пленочной конденсации чистого пара

$$\frac{\alpha l}{\lambda} = \Phi_1 \left( \frac{g l^3}{\nu^2}, \frac{\nu}{a}, \frac{r}{C_p \Delta t} \right).$$

Действительно, при пленочной конденсации  $A=1$ , поэтому модифицированный критерий Нуссельта превращается в обычный  $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ .

Входящие в уравнение (2) критерии  $Pe$  и  $K_p$  выпадают, так как первый включает в себя величину  $W$ , не входящую в условия однозначности процесса пленочной конденсации, а второй получен из соотношения  $IV-a$ , справедливого лишь для сферических капель. Так как критический диаметр капли в процессе пленочной конденсации роли не играет, то здесь в качестве характерного размера берутся высота (для вертикальных) или диаметр (для горизонтальных) труб.

На основе уравнения (2) должна производиться обработка экспериментальных данных по теплоотдаче при капельной конденсации чистого пара.

Анализ полученных опытных данных по капельной конденсации водяного пара при давлении  $p=1$  атм позволил получить следующую закономерность

$$Nu_k = C Pe \cdot K \quad (3)$$

Так как эксперименты проводились при одном давлении и с одной жидкостью, то влияние критериев  $Ga$ ,  $Pr$ ,  $K_p$  на рассматриваемый процесс установить не удалось. Поскольку в опытах величина  $\frac{D_k}{\tau_c}$  отдельно не определялась, то сопоставление экспериментальных данных, проведенных при атмосферном давлении, позволило определить лишь произведение  $C \frac{D_k}{\tau_c}$ . Эта величина численно равна 0,5 м/час.

#### Экспериментальная установка и проведение опытов

Исследование теплообмена при капельной конденсации проводилось на приборе, схема которого показана на рис. 2. Корпус 1 конденсатора изготовлен из трубы диаметром 182/174 мм и высотой 262 мм. Внутри корпуса, образуя паровую рубашку, был вставлен цилиндр 2 диаметром 144/140 мм. Капельная конденсация происходила на латунной трубке 3 квадратного сечения 27×27 мм с толщиной стенки 1 мм. При этом рабочая поверхность составляла 0,0226 м<sup>2</sup>. Плоская грань опытной трубки, обращенная к смотровому стеклу 4, была снабжена линейным масштабом (видимое на снимках 1 деление соответствует 5 мм). Это позволяло путем количественной обработ-

ки фотоснимков процесса определять площадь, занятую каплями, и размеры капель. Система охлаждения была выполнена по схеме „труба в трубе“. Температура охлаждающей воды на входе и выходе из конденсатора замерялась лабораторными термометрами с ценой деления  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Расход воды определялся объемным методом. Водяной пар, слегка перегретый с помощью электрического нагревателя, пройдя сухопарник 5, по двум трубкам подавался в рабочий объем конденсатора и паровую рубашку. Температура пара измерялась медь-константовой термопарой, установленной после сухопарника. Выпадающий на охлаждаемой стенке конденсат стекал в воронку 6

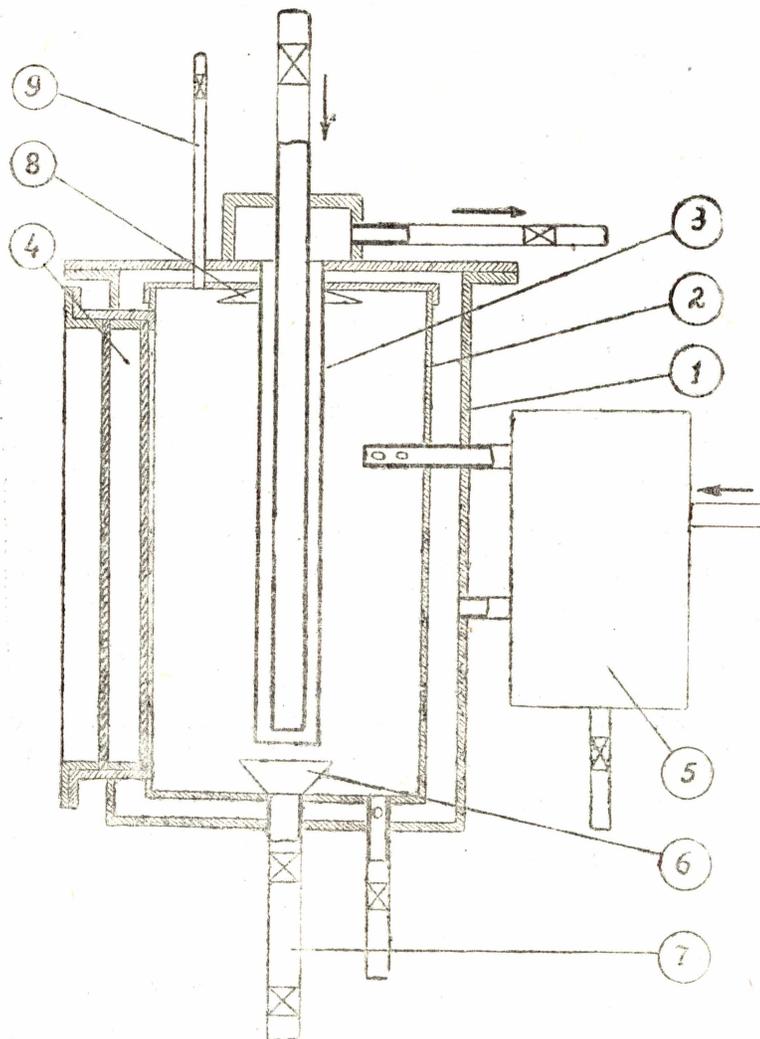


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

и затем отводился по стеклянной трубке 7 в мерный сосуд. Трубка 7 имела на своих концах два вентиля, отрегулированных так, чтобы пар вместе с конденсатом не прорывался наружу. Расход конденсата определялся весовым методом. Для предотвращения попадания на опытную трубку конденсата, образовавшегося на крышке прибора, имелся конденсатоотводный колпачок 8. Температура рабочей поверхности измерялась в семи точках при помощи медь-константовых термопар. Для каждого опыта определялась средняя температура

стенки как средневзвешенная по поверхности. Электродвижущая сила термопар измерялась потенциометром типа ПП, колебаний температуры, связанных с периодичностью образования и отрыва капель, не наблюдалось. Средний температурный напор между паром и стенкой изменялся в опытах от 1 до 20°C. Этому соответствовало изменение расхода охлаждающей воды от 70 до 830 кг/час и скорости от 0,1055 до 1,25 м/сек. Чтобы устранить попадание воздуха в паровое пространство, все опыты проводились при давлении в конденсаторе на 15–20 см вод. ст. выше атмосферного и при открытом парящем воздушке 9.

В качестве противосмачивающего покрытия, обеспечивающего устойчивую капельную конденсацию, применялись керосин, машинное масло СУ, олеиновая и стеариновая, растворенная в эфире, кислоты. Анилин и ортоксилол давали неустойчивую капельную конденсацию, легко переходящую в смешанную с соответствующим уменьшением теплоотдачи. На охлаждаемую поверхность гидрофобизаторы наносились кистью через 3–4 опыта. Термическое сопротивление противосмачивающего покрытия из-за его малой толщины на теплоотдачу не сказывалось.

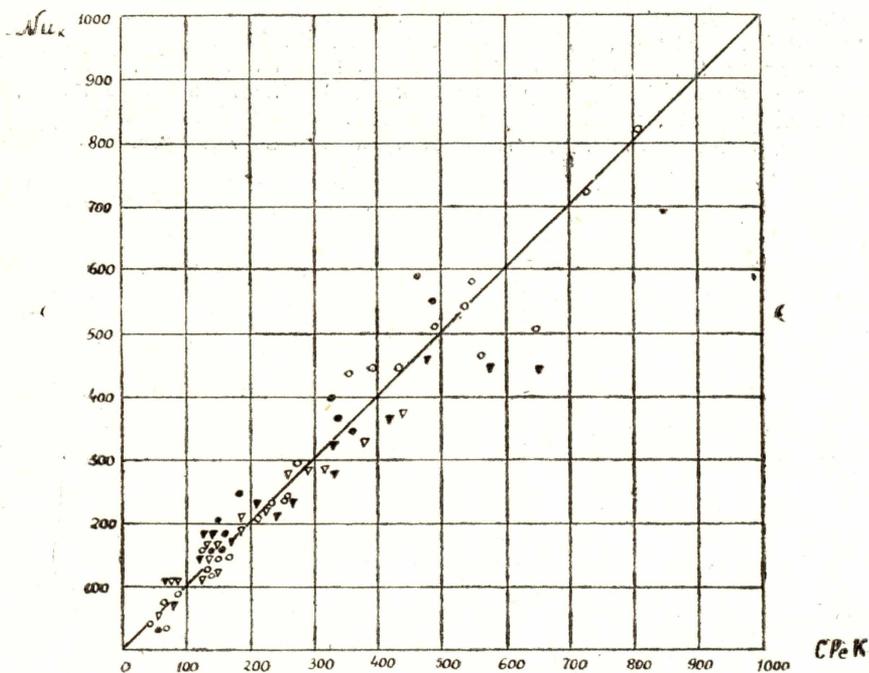


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных данных с уравнением (3).  
 ○—керосин; ●—олеиновая кислота;  
 ▽—стеариновая кислота, растворенная в эфире;  
 ▼—машинное масло СУ.

Коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации вычислялся по формуле

$$\alpha = \frac{G_k (i_n - i_k)}{F (t_n - t_{cm})},$$

где  $G_k$ —часовой расход конденсата,  $(i_n - i_k)$ —разница теплосодержаний пара и конденсата на входе и выходе из конденсатора,  $F$ —рабочая поверхность. Одновременно для контроля производился подсчет теплового потока и коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  по расходу и повы-

шению температуры охлаждающей воды. Разница между результатами измерений по этим двум методам не превышала 8%. Входящий в уравнение (2) коэффициент  $K_0$  находился из уравнения

$$K_0 = \frac{G_k (i_n - i_k)}{F (t_{cm} - t_0)}$$

в котором величина  $t_{cm} - t_0$  представляет собой среднюю разницу температур между поверхностью стенки и охлаждающей водой.

На рис. 3 представлена сводная обработка всех опытных данных в виде зависимости  $Nu_k$  от произведения  $СРeK$ . Полученный график показывает, что опытные точки (в количестве 69 опытов) располагаются достаточно удовлетворительно вокруг прямой линии, соответствующей уравнению (3). Поэтому формулу (3) можно рекомендовать для расчета теплоотдачи при капельной конденсации чистого пара ( $p=1 \text{ атм}$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kullberg G., Kendall H., Chem. Eng. Prog., 56, 1, 1960.
2. Fielden T., Chem. Proc. Eng., 38, 12, 1957.
3. Hampson H., Engineering, 179, 4655, 1955.
4. Fatica N., Katz D., Chem. Eng. Prog. 45, 11, 1949.
5. Sugawara S., Michiyoshi I., Mem. Fac. Eng. 18, 11, 1956.
6. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М., Новиков И. И., Федынский О. С., Жидкометаллические теплоносители. Атомиздат, 1958 г.
7. Толубинский В. И. Труды института теплоэнергетики АН УССР, № 5, 1952 г.