

## О ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ПРИ КАПЕЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА

В. В. ИВАНОВ

(Представлена проф. докт. техн. наук Г. И. Фуксом)

Теплопередача в конденсаторах, испарителях, бойлерах и в целом ряде других теплообменных аппаратов значительно увеличивается, если на поверхностях охлаждения происходит капельная конденсация. В этом случае большая часть поверхности стенки доступна для непосредственного соприкосновения с паром. Повышенные коэффициенты теплоотдачи от пара к „обнаженным“ участкам стенки между каплями способствуют увеличению общего коэффициента теплопередачи от пара к охлаждающей воде.

Изучению теплопередачи при капельной конденсации посвящен ряд работ [1, 2, 3]. Эти работы носят экспериментальный характер и содержат качественный анализ опытных данных. Выполненные эксперименты позволили установить порядок величины коэффициента теплопередачи и некоторые закономерности его изменения в зависимости от скорости охлаждающей воды, тепловой нагрузки и т. д. Эти эксперименты проводились в небольшом диапазоне изменения температурного напора между паром и охлаждаемой стенкой и с малым числом гидрофобизаторов. Капельная конденсация происходила на медных или хромированных трубках, которые мало применяются в промышленных теплообменных аппаратах.

Ниже приводятся результаты исследования коэффициента теплопередачи при капельной конденсации, полученные на экспериментальной установке, подробное описание которой приведено в [4]. Капельная конденсация происходила на латунной ( $\lambda = 105 \text{ вт/м}^\circ\text{К}$ ) трубке с толщиной стенки 0,001 м. Опыты проводились при атмосферном давлении, пар имел незначительный перегрев ( $5\text{--}20^\circ\text{К}$ ). Расход охлаждающей воды в опытах изменялся от 70 до 850 кг/час, что соответствовало изменению скорости охлаждающей воды: от 0,01 до 1,3 м/сек.

В качестве гидрофобизаторов применялись керосин, машинное масло, олеиновая и стеариновая, растворенная в эфире, кислоты. Температурный напор между паром и поверхностью охлаждения в опытах менялся в широких пределах: от 1 до  $20^\circ\text{К}$ .

При проведении экспериментов величина коэффициента теплопередачи находилась по соотношению

$$K = \frac{G_k (i_p - i_k)}{3600 F (t_n - t_v)} \left[ \frac{\text{вт}}{\text{М}^2 \cdot ^\circ\text{К}} \right],$$

в котором  $G_k$ —часовой расход конденсата;  $F$ —поверхность конденсации, равная  $0,0226 \text{ м}^2$ ;  $(i_n - i_k)$ —средняя разница теплосодержаний пара и конденсата на входе и выходе из конденсатора;  $(t_n - t_b)$ —разность температур между конденсирующимся паром и охлаждающей водой.

Одновременно, для контроля производилось вычисление коэффициента теплопередачи  $K$  по соотношению

$$K = \frac{G_b (t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}})}{3600 F (t_n - t_b)} \left[ \frac{\text{вт}}{\text{М}^2 \cdot \text{°К}} \right],$$

где  $G_b$ —часовой расход охлаждающей воды,  $(t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}})$ —средняя разница температур охлаждающей воды на выходе и входе в конденсатор.

Как показали опыты, разница в значениях  $K$ , определенных по этим способам, не превышала 8 %.

На рис. 1 в логарифмических координатах представлена опытная зависимость коэффициента теплопередачи  $K$  от скорости охлаж-

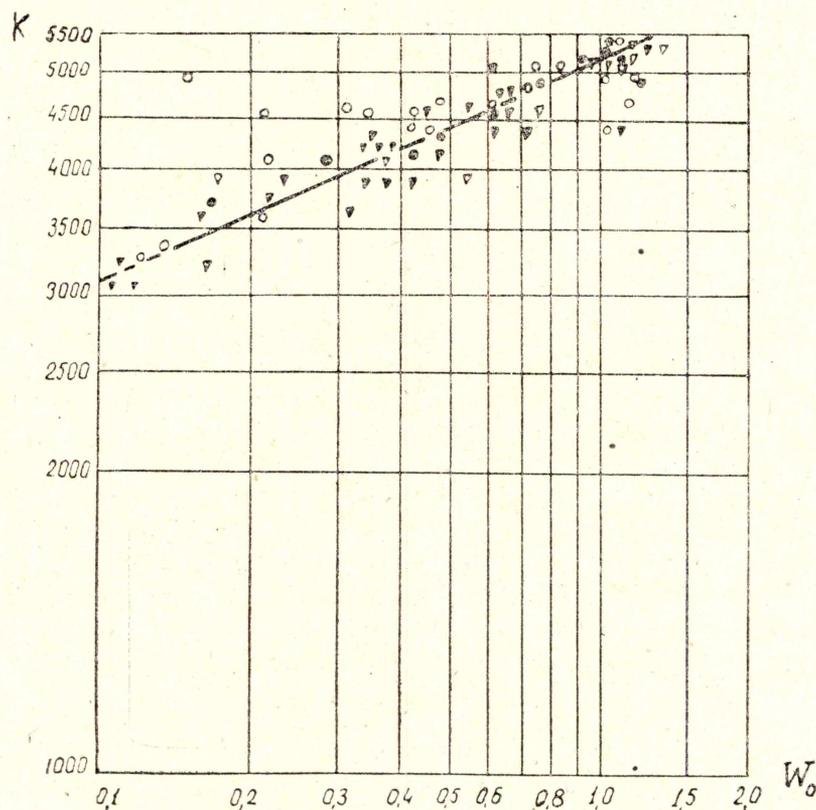


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопередачи  $K$  [вт/м<sup>2</sup>К] от скорости охлаждения воды  $W_0$  [м/сек].

○ — керосин, ● — олеиновая кислота, —▲— машинное масло СУ, ▽ — стеариновая кислота, растворенная в эфире.

дающей воды  $W_0$  [м/сек], показывающая характер увеличения  $K$  с ростом  $W_0$ . Сопоставление приведенных данных показывает, что тип побудителя, вызывающий устойчивую капельную конденсацию, практически не влияет на теплопередачу. Поэтому в последующей обработке результатов опытов не делается различия между данными, полученными при керосине, машинном масле, олеиновой и стеариновой кислотах.

На рис. 2 приведены опытные данные, показывающие зависимость коэффициента теплопередачи  $K$  от тепловой нагрузки поверхности охлаждения.

Была сделана попытка установить зависимость коэффициента теплопередачи от температурного напора между паром и охлаждаемой стенкой, величиной, обычно задаваемой при расчете те-

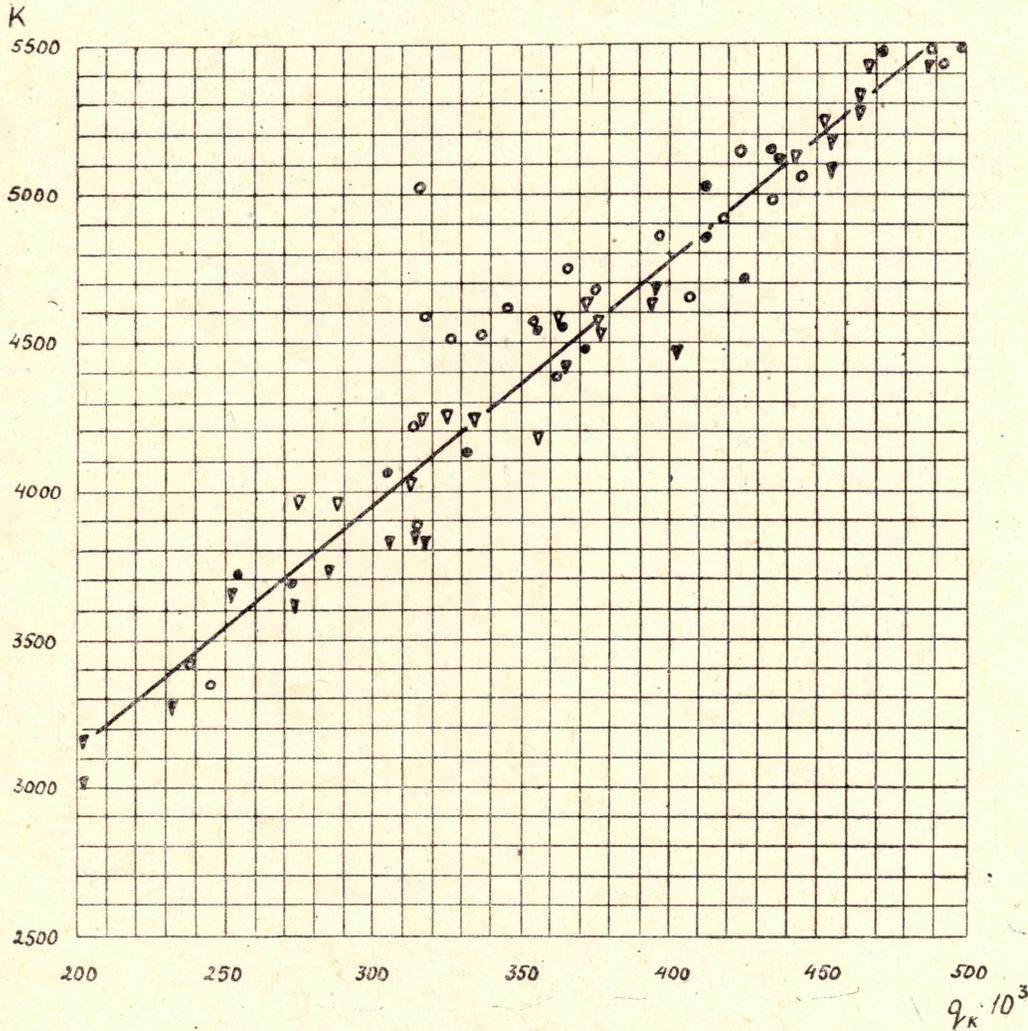


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопередачи  $K$  [ $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$ ] от тепловой нагрузки поверхности охлаждения  $q_k$  [ $\text{Вт}/\text{м}^2$ ].

плообмена (рис. 3). Несмотря на сильный разброс опытных точек, можно подметить, что в условиях устойчивой капельной конденсации величина  $K$  (в противоположность коэффициенту теплоотдачи) возрастает с ростом  $(t_n - t_{ст})$ . Этот эффект находится в согласии с уравнениями, полученными в [4]. Действительно, коэффициент теплопередачи  $K$  можно определить как

$$K = \frac{\bar{\alpha} \cdot K_0}{\bar{\alpha} + K_0},$$

где  $\bar{\alpha}$  — коэффициент теплоотдачи со стороны пара;  $K_0$  — коэффициент теплопередачи через стенку к охлаждающей воде, величину коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  можно подсчитать по уравнению [4]

$$\bar{\alpha} = \frac{C(p) \gamma r}{2(t_n - t_{ct})} + 1,22 K_0,$$

в котором  $C(p)$ —константа ( $м/сек$ ), зависящая от давления;  $\gamma$ —удельный вес конденсата, а  $r$ —скрытая теплота парообразования.

Объединяя две последние формулы, получаем уравнение для подсчета  $K$

$$K = K_0 \left[ \frac{0,5 C(p) \gamma \cdot r + 1,22 K_0 (t_n - t_{ct})}{0,5 C(p) \gamma \cdot r + 2,22 K_0 (t_n - t_{ct})} \right].$$

При постоянном давлении пара и неизменной температуре  $t_{вх}$  рост температурного напора ( $t_n - t_{ct}$ ) определяется в основном увеличением скорости охлаждающей воды  $W_0$ . Вместе со скоростью  $W_0$  возрастает и коэффициент теплопередачи через стенку к охлаждаю-

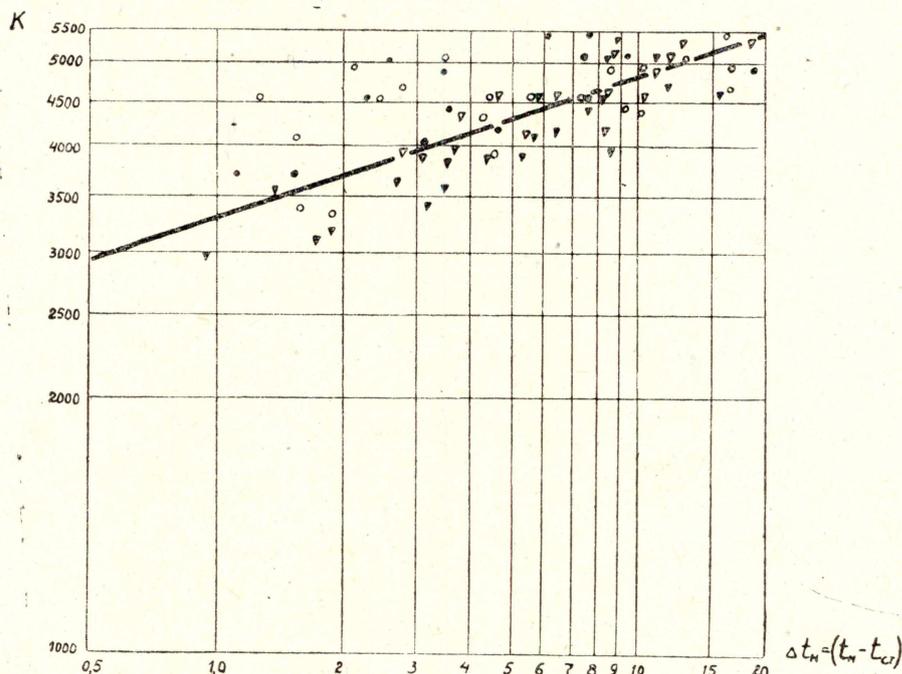


Рис. 3. Связь коэффициента теплопередачи  $K$  [ $вт/м^2 \text{ } ^\circ K$ ] с температурным напором между паром и охлаждаемой стенкой ( $t_n - t_{ct}$ )  $^\circ K$ .  
 $\circ$  — керосин,  $\bullet$  — олеиловая кислота,  $\nabla$  — машинное масло СУ,  $\triangle$  — стеариновая кислота, растворенная в эфире.

щей воде  $K_0$ . Как показывает обработка опытных данных, с увеличением  $W_0$  и, следовательно ( $t_n - t_{ct}$ ), величина  $K_0$  увеличивается сильнее, чем уменьшается выражение, стоящее в квадратных скобках. Это в конечном итоге приводит к росту  $K$ .

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для непосредственной оценки коэффициента теплопередачи  $K$ , если известны  $W_0$ ,  $q_k$  или ( $t_n - t_{ct}$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hampson H. Jnst. Mch. Eng., 7, 1952.
2. Jeffrey J., Moynihan J. Mech. Eng., 55, 1933.
3. Fitzpatrick J., Baum S. W. Mc Adams., Trans. Am. Jnst. Chem. Engrs., 35, 1939.
4. Иванов В. В. Исследование теплообмена при капельной конденсации пара. Известия ТПИ, т. 110, 1962.