

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИАМЕТРОВ ДЕСОРБЦИОННЫХ КАПЕЛЬ  
НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ****АННОТАЦИЯ**

Теплоотдача процесса конденсации связана с распределением капель по размерам, начальным морфогенезом, критическим диаметром развития конденсатных образований, свойствами и концентрацией центров конденсации, неравномерностью температуры поверхности и динамикой десорбции капель. Механизм процесса капельной конденсации и изменение значений характерных размеров капель зависят от скорости парового потока, состояния поверхности конденсации, её высоты и наклона к горизонту.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Развитие процесса капельной конденсации в пространстве и времени определяется частичными процессами и факторами, к которым относятся: начальный морфогенез, свойства центров конденсации и их концентрация, критический диаметр развития, неравномерность температуры поверхности, механизм и динамика десорбции и др. [1—4]. Теплоотдача процесса конденсации связана с распределением капель по размерам [5—8]. В свою очередь, распределение капель по размерам зависит от доли теплообменной поверхности, которую занимают десорбционные капли, и от значения максимального диаметра капель. Влияние скорости парового потока, состояние поверхности конденсации, её высота и наклон к горизонту проявляются через механизм процесса и через изменение значений характерных размеров капель. Таким образом, возникает необходимость установить связь между интенсивностью теплообмена и диаметром капель, которые удаляются с теплообменной поверхности.

**2. О РАСПРЕДЕЛЕНИИ КАПЕЛЬ  
ПО РАЗМЕРАМ**

Если для конкретного процесса капельной конденсации известно распределение капель по размерам, то можно создать модель расчета средней теплоотдачи, которая базируется на теории термического сопротивления отдельных капель радиусом  $R$  [6]. Вплоть до настоящего времени нет единой универсальной формулы для расчета распределения капель по размерам. Наиболее удобно такая функция определяется для интервала радиусов капель от  $R-(\Delta R/2)$  до  $R+(\Delta R/2)$  как общее количество капель  $\Delta N(R)$ , находящееся на единице площади поверхности теплообмена.

Такая функция позволяет определить количество капель на единице площади в заданном интервале их радиусов. Экспериментальная оценка первичных капель имеет ограничение из-за их быстротечного развития вплоть до микронного размера. Исследования условного цикла капельной конденсации [9] позволяют утверждать, что в этом случае распределение капель не зависит от параметров поверхности и будет практически универсальным.

Критический радиус  $R_{кр}$  каплеобразования может быть определен расчетным путем с использованием методики [6].

Плотность образования первичных центров конденсации  $\mu$  можно оценить исходя из расстояния между соседними узлами в треугольной решетке размещения и локального количества капель в нечетных рядах этой решетки  $n$  [10]. Для зародышевых капель при конденсации водяного пара атмосферного давления расчет  $\mu$  составляет от  $0,25 \times 10^{12} \text{ 1/м}^2$  до  $6,1 \times 10^{14} \text{ 1/м}^2$ . Для микронных капель  $\mu$  будет больше  $1,6 \times 10^{10} \text{ 1/м}^2$ , что коррелируется с исследованиями [11].

Другой важной геометрической характеристикой условного цикла капельной конденсации является размер  $R_0$  капель, которые десорбируются с теплообменной поверхности. Капли отрывного размера существуют на поверхности конденсации достаточно длительный промежуток времени по сравнению с зародышевыми каплями и имеют существенное термическое сопротивление. Во время удаления они на своем пути сметают большое количество более мелких капель и, тем самым, позитивно влияют на интенсивность теплообмена.

Используя методику [6], можно рассчитать  $R_0$  как среднестатистическую величину, зависящую от баланса действующих на каплю сил. Расчетные значения десорбционных капель хорошо согласуются с экспериментальными для конденсации водяного пара атмосферного давления и составляют до  $5,5 \times 10^{-3} \text{ м}$  [1—11].

Проведенный анализ разнообразных процессов капельной конденсации [1—11] указывает на то, что величина  $R_0$  зависит от режимных параметров парового потока и состояния теплообменной поверхности. Таким образом, целесообразно выбрать десорбционный размер капель в качестве определяющего линейного размера для расчета интенсивности теплообмена при капельной конденсации.

### 3. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАЗМЕР ДЕСОРБЦИОННЫХ КАПЕЛЬ

При исследовании десорбционного размера капель [1—4] было установлено, что он зависит от равнодействующей внешних и адгезионных сил, в том числе и от поверхностного натяжения между конденсационной поверхностью и каплями. Варьирование десорбционным размером достигается изменением угла контакта между каплями и поверхностью за счет действия внешних сил, таких, как гравитационная сила, центробежная сила, сила динамического воздействия парового потока.

Изменение ориентации конденсационной поверхности в пространстве приводит к тому, что для вертикальной поверхности отрывной диаметр капель будет меньше, чем для наклонной. На динамику десорбции будут влиять состояние самой гидрофобной поверхности (ее шероховатость) и целостность покрытия стимулятором. На полированных поверхностях с равномерным оптимальным лиофобным покрытием отрывные размеры капель будут минимизированы по сравнению с неравномерными гидрофобными и шероховатыми поверхностями.

Наиболее важными факторами, изменяющими геометрические характеристики капельной конденсации, являются динамическое воздействие парового потока и центробежная сила [1—4]. Влияние скорости парового потока становится определяющим, если действие центробежной силы незначительно. Это наблюдается в соответствии с данными [4] для ускорений до 3.3 g. Кроме изменения десорбционного диаметра капель этот фактор позволяет даже при скоростях до 4 м/с устранить негативное воздействие неконденсирующихся газов. Паровой поток на вращающиеся поверхности подается с весьма значительной скоростью — 5 м/с и выше. Известные работы по исследованию влияния центробежной силы [1—4] на капельную конденсацию рассматривали изменение ускорения вплоть до 39.9g. Однако однозначное обобщение данных так и не было получено. Объяснениями данного факта могут служить различия в выборе режимных параметров, а также трудности, возникшие при проведении экспериментов [1—4].

Таким образом, проведенный анализ позволяет считать скорость парового потока определяющим фактором влияния на десорбционные размеры капель для конденсации в условиях, близких к нормальным. Подтверждением такого вывода служит достаточно большое количество экспериментальных данных [1—11] для капельной конденсации, которые были получены для скоростей парового потока до 30 м/с.

### 4. СКОРОСТЬ ПАРОВОГО ПОТОКА И МЕХАНИЗМ КАПЕЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ

Капли конденсата на теплообменной поверхности образуют сложную картину, которая постоянно

видоизменяется. Интенсивность теплообмена определяется механизмом процесса и зависит от количества жидкости, которая мгновенно находится на поверхности конденсации.

При небольших скоростях парового потока его динамическое воздействие будет несущественным. При увеличении скорости теплоотдача может значительно возрасти. При этом изменяется время пребывания капель всех типоразмеров на поверхности и диаметр десорбционных капель. Рост скорости потока приводит к уменьшению отрывного размера, характерного для ансамбля капель на поверхности конденсации. Во время удаления на своем пути капля сметает более мелкие конденсатные формирования и несколько затормаживается в движении. Чем меньше десорбционный диаметр, тем сильнее будет такое взаимодействие. При этом также может меняться траектория удаления капель.

С точки зрения теплообменных характеристик большие капли имеют значительное термическое сопротивление. Они относительно длительный промежуток времени пребывают на поверхности конденсации. С другой стороны, большое количество конденсата создает условия для залива поверхности, или для размазывания по ней десорбционных капель.

Рост скорости парового потока способствует интенсивному объединению капель разнообразных типоразмеров и быстрому удалению десорбционных капель. В результате термическое сопротивление конденсата уменьшается, и возрастает интенсивность теплообмена.

Таким сложным механизмом процесса капельной конденсации объясняется тот факт, что, начиная с неподвижного пара  $W = 0$  и вплоть до некоторого значения скорости парового потока  $W_{кр}$ , десорбционный размер капель почти не изменяется. При этом интенсивность теплообмена может несущественно возрастать. По данным разных авторов [1—4, 6—8, 11, 12] значения критической скорости может изменяться от 4 до 12 м/с.

Если скорость парового потока превышает критическое значение  $W_{кр}$ , то интенсивность теплообмена резко возрастает, а диаметр отрывающихся капель — уменьшается. Такой характер процесса отвечает известным исследованиям капельной конденсации [1—4, 6—8, 11, 12] при скоростях парового потока до 30 м/с.

### 5. СВЯЗЬ ТЕПЛОТДАЧИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ДЕСОРБЦИОННЫХ КАПЕЛЬ

Физические представления о механизме процесса, экспериментальные и теоретические исследования конденсации с учетом распределения капель по размерам [1—8, 11, 12] дают возможность обобщить капельную конденсацию эмпирическими зависимостями вида:

$$\alpha = \text{const} D_0^m, \quad (1)$$

где показатель степени  $m$  и константа пропорциональности зависят от условий проведения экспериментов.

Имеющиеся отличия в условиях конденсации различных теплоносителей [1—8, 11, 12], а также отсутствие однозначности в выборе линейного определяющего размера  $D_0$  и систем единиц измерения, не позволяют унифицировать расчеты. Кроме того, под такое обобщение не попадает часть данных для области малых скоростей парового потока  $W \leq 5$  м/с.

Преимущества в обобщении данных по капельной конденсации дает возможность приведения к безразмерному виду зависимости (1). Текущие значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  целесообразно сравнить с максимальными  $\alpha_{\max}$  для капельной конденсации неподвижного пара  $W \rightarrow 0$ . Линейным определяющим размером следует выбрать десорбционный радиус капли  $R_0$  и сравнить его со значением  $R_0^{\max}$  при конденсации неподвижного пара  $W \rightarrow 0$ .

В целях сравнения результатов и для продолжения предыдущих исследований [9, 10] была проведена серия экспериментов для капельной конденсации на металлических поверхностях. Для стимулирования капельной конденсации была применена комплексная обработка латунных, медно-никелевых, стальных, медных, мельхиоровых, титановых, алюминиевых поверхностей. Глубина обработки отвечала диапазону микронеровностей профиля поверхности.

В результате была выявлена зависимость теплоотдачи от геометрических размеров десорбционных капель, которая сравнивалась с данными других авторов и с предыдущими исследованиями. Графическое изображение полученных результатов приведено на рис. 1.

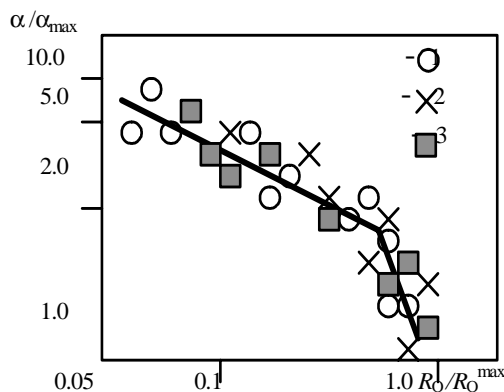


Рис. 1. Изменение интенсивности процесса капельной конденсации в зависимости от размеров десорбционных капель: 1 — данные исследований [1—4]; 2 — данные работы [12], 3 — данные настоящей работы

Обобщение данных этих исследований выполнено в безразмерном виде:

$$W \leq W_{\text{кр}}, \quad \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} = 1.02 \left( \frac{R_0}{R_0^{\max}} \right)^{-1.1}; \quad (2)$$

$$W \geq W_{\text{кр}}, \quad \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} = 1.154 \left( \frac{R_0}{R_0^{\max}} \right)^{-0.54}. \quad (3)$$

Таким образом, достигнуто согласование различных опытных данных по влиянию геометрических размеров десорбционных капель на интенсивность теплообмена. Возможно некоторое расхождение таких расчетов для других процессов капельной конденсации, например, при действии центробежной силы, что обусловлено различием способов гидрофобизации, геометрических характеристик теплообменных поверхностей, режимных параметров и др.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что влияние на процесс режимных параметров парового потока и состояния поверхности теплообмена проявляется через изменение геометрических размеров капель.

В качестве определяющего линейного размера для расчета интенсивности теплообмена при капельной конденсации целесообразно выбрать десорбционный радиус или диаметр капель.

Варьирование десорбционными диаметрами капль достигается за счет действия внешних сил, например, силы гравитации, центробежной силы или динамического воздействия парового потока.

Скорость парового потока является определяющим фактором влияния на десорбционные размеры капль для конденсации в условиях, приближенных к нормальным.

При небольших скоростях парового потока его динамическое воздействие будет несущественным. При увеличении скорости потока до значений, превышающих некоторую критическую величину, теплоотдача будет существенно возрастать.

Получена безразмерная зависимость для расчета теплоотдачи как функция геометрических размеров десорбционных капель. Проведено сравнение с данными других авторов и предыдущими результатами. Достигнуто согласование различных опытных данных по влиянию геометрических размеров отрывных капель на интенсивность теплообмена.

Возможно дальнейшее развитие и усовершенствование полученных результатов для других процессов капельной конденсации, которые могут отличаться способами гидрофобизации, геометрическими характеристиками теплообменных поверхностей, режимными параметрами парового потока.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$D_0$  — характерный определяющий диаметр капль, м;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$n$  — количество центров конденсации в нечетных рядах треугольной решетки размещения, 1/м<sup>2</sup>;

$N(R)$  — функция распределения капль по размерам, 1/м<sup>2</sup>;

$m$  — показатель степени;  
 $R$  — радиус капель, м;  
 $R_{кр}$  — критический (зародышевый) радиус капель, м;  
 $R_0$  — отрывной (десорбционный) радиус капель, м;  
 $R_0^{max}$  — максимальный отрывной (десорбционный) радиус капель при конденсации неподвижного пара, м;  
 $\Delta R$  — диапазон изменения радиусов капель, м;  
 $W$  — скорость парового потока, м/с;  
 $W_{кр}$  — скорость парового потока, соответствующая изменению в характере зависимости интенсивности теплообмена от диаметра десорбционных капель при конденсации, м/с;  
 $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $\alpha_{max}$  — максимальный коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации неподвижного пара, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $\Theta$  — краевой угол смачивания, угловой градус;  
 $\mu$  — количество центров конденсации на единице площади, 1/м<sup>2</sup>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tanasawa I.** Advances in condensation heat transfer // *Advances in Heat Transfer*, 1991. Vol. 21. P. 55—139.
2. **Танасава И.** Капельная конденсация и пути ее практического применения // *Теплообмен. Достижения. Проблемы. Перспективы: Тр. 6-й Международной конференции по теплообмену*. М.: Мир, 1981. С. 74—105.
3. **Tanasawa I., Utaka Y.** Measurement of condensation curve for dropwise condensation heat transfer // *Say sun canque*. 1978. Vol. 30. P.262—265.
4. **Танасава И.** Состояние и перспективные направления в исследованиях капельной конденсации // *Нихон кикай гаккай ромбунсю*. 1982. Т.48. № 429. С. 835—843.
5. **Hanneman R.J., Mikic B.B.** An analysis of effect of surface thermal conductivity on the rote of heat transfer in dropwise condensation // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1976. Vol. 19. P.1299-1307.
6. **Исаченко В.П.** Теплообмен при конденсации. М.: Энергия, 1981. 240 с.
7. **Rose J.W.** Dropwise condensation theory // *Intern. J. Heat and Mass Transfer*. 1981. Vol. 24. № 2. P. 191—194.
8. **Rose J.W.** Further aspects of dropwise condensation theory // *Intern. J. Heat and Mass Transfer*. 1976. Vol. 19. P. 1363—1370.
9. **Гавриш А.С.** Об особенностях механизма, кривых и цикла капельной конденсации // *Промышленная теплотехника*. 2004. Т.26. №3. С.20-24.
10. **Гавриш А.С.** О некоторых особенностях процесса капельной конденсации водяного пара на металлических поверхностях // *Труды 3-й Российской национальной конференции по теплообмену*. М.: Издательство МЭИ, 2002. Т.4. С. 249—252.
11. **Tanaka H. and Tsuruta T.** A microscopic study of dropwise condensation // *Intern. J. Heat and Mass Transfer*. 1984. Vol. 27, № 3. P. 327—335.
12. **Гавриш А.С., Риферт В.Г., Сардак А.И.** Анализ влияния диаметров капель на интенсивность теплообмена при капельной конденсации // *Инженерно-физический журнал*. 1994. Т. 66. № 6. С. 668—672.