

*А.С. Гавриш, С.А. Гавриш*Национальный технический университет Украины  
Киевский политехнический институт, Украина

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ И МЕХАНИЗМА ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ

### АННОТАЦИЯ

Проведен анализ различных данных для одной из важнейших характеристик механизма капельной конденсации — краевого угла смачивания. Рассмотрено также явление гистерезиса краевого угла и диапазон изменения углов натекания и оттекания для различных типов теплоносителей и теплообменных поверхностей. Получены эмпирические формулы для расчета диапазонов изменения углов натекания и оттекания в зависимости от значения краевого угла смачивания.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На процесс капельной конденсации оказывает влияние большое число различных факторов. К их числу относят выбор теплоносителя, материала конденсационной поверхности, способа лиофобизации и др. [1]. Существенным фактором также может служить форма, размеры и ориентация в пространстве поверхности теплообмена.

Имеющихся данных о процессе капельной конденсации различных веществ пока еще недостаточно для технических приложений. Исключением может служить конденсация водяного пара, для которой в первом приближении известны основные закономерности осуществления капельной конденсации [2—5]. Определенные успехи достигнуты и в расширении диапазонов исследования капельной конденсации для других теплоносителей [6—9].

Анализ накопленного теоретического и экспериментального материала целесообразно проводить по двум взаимосвязанным направлениям. Одним из них является изучение механизма процесса, определяющего его микроуровень. Другим направлением служит изучение макроуровня процесса, определяющего, в конечном счете его интенсивность.

### 2. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ КАПЕЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ

Лиофобные свойства конденсационных поверхностей находят свое отражение в балансе сил, действующих на паровой поток и конденсатные образования. В свою очередь, баланс энергий (поверхностных натяжений) на границах раздела между твердой, газообразной и жидкой фазами характеризуется краевым углом смачивания. Поэтому значение краевого угла смачивания рассматривается как одна из важных характеристик механизма процесса.

Принято считать [1—3], что первичные капли равновелики и их распределение по поверхности конденсации соответствует равномерной треугольной решетке. При визуальном наблюдении рост капель вплоть до микронного размера происходит почти мгновенно [10, 11]. Скоростная видеосъемка при многократном как оптическом, так и цифровом увеличении позволяет установить, что стадия развития капель до десятков микрон длится от единиц до десятков микросекунд, при этом на конденсацию существенно влияет состояние поверхности теплообмена.

Дальнейшее развитие процесса вплоть до сто-микронных размеров сопровождается постепенным относительным уменьшением скорости роста. Стадия роста капель до отрывного (десорбционного) размера является наиболее продолжительной по сравнению с предыдущими. При этом размеры капель могут достигать нескольких миллиметров. Удаление капель с теплообменной поверхности происходит за доли секунды. На освободившейся поверхности процесс повторяется снова.

### 3. МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА И КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ

Анализируя фракционный состав капель, можно утверждать, что диапазон дисперсности размеров зависит от теплофизических свойств жидкости, состояния поверхности и ряда других факторов [10, 11]. Поверхностные свойства, определяемые во многом способом гидро- или лиофобизации, проявляются посредством краевого угла смачивания.

На форму конденсатных образований влияет их масса, условия контакта с поверхностью (контактный угол) и ее состояние.

Начальная стадия капельной конденсации характеризуется ярко выраженной сферичностью капель. Чем выше сферичность, тем меньше площадь контакта капель с поверхностью и тем интенсивнее происходит их движение по поверхности.

Для крупных капель форма в большей степени зависит от действия гравитационной силы, силы межфазного трения, динамической и прочих внешних сил. Достаточно крупные капли редко сливаются между собой. Их развитие идет в основном за счет поглощения капель, значительно уступающих им в размерах, или вновь возникающих на теплообменной поверхности.

Форма отрывных капель может отличаться от сферической вследствие изменения баланса сил поверхностного натяжения между жидкостью, паром и конденсационной поверхностью.

Для быстротечных начальных стадий процесса вне зависимости от формы и ориентации поверхности в пространстве значения контактного угла капель стремятся к величине краевого угла смачивания для условий равновесия.

#### 4. ГИСТЕРЕЗИС КРАЕВОГО УГЛА

Для капель, размерами от 100 мкм вплоть до отрывных, равновесие на поверхности теплообмена достигается при отклонении реальных контактных углов от равновесного значения  $\Theta_K$ . Явление гистерезиса краевого угла  $\Theta_K$  приводит к существенному отличию угла натекания  $\Theta_H$  от угла оттекания  $\Theta_O$  капли. Вдоль линии контакта трех фаз краевой угол может принимать любые значения между  $\Theta_H$  и  $\Theta_O$ .

Чисто капельный режим конденсации характерен для теплоносителей со значениями краевых углов свыше  $90^\circ$ . При углах контакта меньших, но стремящихся к  $90^\circ$ , речь можно вести о псевдокапельной конденсации. При углах, значительно меньших  $90^\circ$ , говорят о капельно-ручьевой конденсации. А при углах контакта, стремящихся к  $0^\circ$ , идет речь о пленочно-ручьевой конденсации. Значения краевых углов смачивания  $\Theta_K$  для различных сочетаний лиофобизатор-поверхность приведены в таблице 1 в порядке их убывания.

Если учесть, что для каждого конкретного процесса каплеобразования может иметь место явление гистерезиса, то о чисто капельной конденсации можно вести речь только в том случае, если весь спектр контактных углов (равновесный статический  $\Theta_K$ , натекания  $\Theta_H$  и оттекания  $\Theta_O$ ) превышает  $90^\circ$ . Если равновесный контактный угол  $\Theta_K$  близок к  $90^\circ$ ,  $\Theta_O$  отличается от  $\Theta_K$  в сторону уменьшения, а  $\Theta_H$  — в сторону увеличения, то речь скорее идет о каплеподобных формированиях.

Такие данные по гистерезису контактного угла представлены на рис. 1. Причем, чем выше значение  $\Theta_K$ , и чем качественнее лиофобизатор, тем меньше различие между углами натекания  $\Theta_H$  и оттекания  $\Theta_O$ , например, см. поз. 3. А при краевых углах  $\Theta_K > 150^\circ$  гистерезис может стремиться к нулю — см. поз. 1,2. Для капельных формирований (поз. 3, 4, 6, 8, 9, 13, 14) весь спектр контактных углов превышает  $90^\circ$ . Для каплеподобных формирований при  $\Theta_K > 90^\circ$  угол оттекания  $\Theta_O$  может отличаться в сторону уменьшения от  $90^\circ$ , как слабо (поз. 15, 19), так и весьма значительно (поз. 5, 7, 10—12, 16—18).

Если же углы натекания и оттекания меньше  $90^\circ$ , то будут рассматриваться псевдокапельные конденсатные образования. В этом случае график, иллюстрирующий особенности гистерезиса краевого угла, представлен на рис. 2.

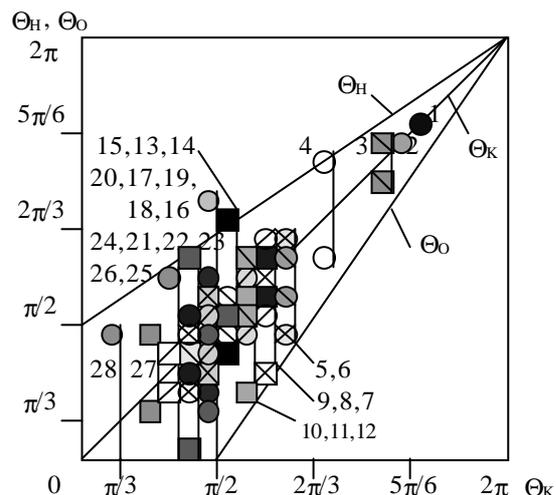


Рис. 1. Изменение углов натекания и оттекания для различных значений равновесного краевого угла смачивания  $\Theta$  для капель и каплеподобных конденсатных формирований: 1—28 — соответствуют табл. 1 поз. 1—28

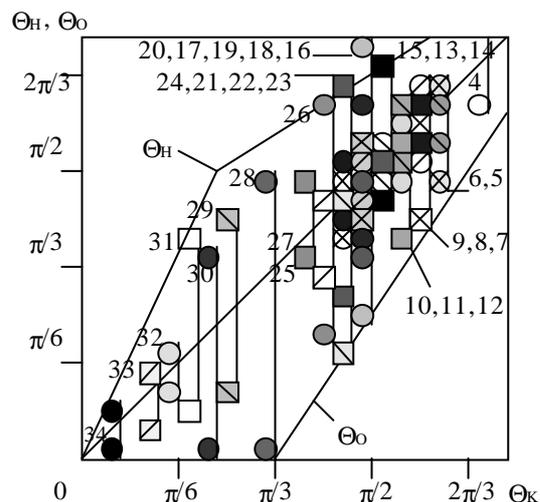


Рис. 2. Изменение углов натекания и оттекания для различных значений равновесного краевого угла смачивания  $\Theta$  для псевдокапельных и каплеподобных конденсатных образований: 4—34 — соответствуют табл. 1 поз. 4—34

Псевдокапельные образования при  $\Theta_K$ , стремящемся к  $90^\circ$ , могут иметь угол натекания  $\Theta_H$ , превышающий  $90^\circ$  — поз. 20, 24, 26—28 рис. 2. Для капельно-ручьевых формирований (поз. 21—23, 25, 29—31) весь спектр контактных углов будет меньше  $90^\circ$ . Пленочно-ручьевые формирования будут иметь место (поз. 32—34) при углах контакта, все значения которых стремятся к  $0^\circ$ .

Данные рис. 1 и 2 позволяют получить формулы для расчета диапазонов изменения углов натекания и оттекания в зависимости от значения равновесного краевого угла смачивания:

Таблица 1. Значения краевых углов смачивания для различных сочетаний лиофобизатор-поверхность

№	Способ лиофобизации	$\Theta_K^0$	Теплоноситель, поверхность теплообмена	Автор, работа
1.	Стеариновая кислота	155	Конденсация воды на медной трубе	Kim K.. и др.[8]
2.	N-октадецил меркаптан	148	Конденсация воды на медной трубе	Kim K.. и др.[8]
3.	Стекло	140	Квазиравновесный процесс для ртути	Попов В.Г.[6]
4.	Стекло	124	Ртуть на стекле	Попов В.Г.[6]
5.	Политетрафлуорэтилен PTFE1010•	114	Конденсация воды на твердой поверхности	Xuehu M. и др. [7]
6.	Комплексная обработка поверхности	110	Конденсация воды на металлических по- верхностях	Данные автора [11]
7.	PTFE1013•	109	Конденсация воды на твердой поверхности	Xuehu M. и др. [7]
8.	Дисульфид (958 а.е.м.)	108	Конденсация воды на медноникелевой трубе	Croix J.M. и др. [5]
9.	Дисульфид (582 а.е.м.)	108	Конденсация воды на металлических по- верхностях	Данные автора [10]
10.	Октадециламин (269 а.е.м.)	105	Конденсация воды на медной поверхности и на поверхности малоуглеродистой стали	Филиппов Г.А. и др. [4]
11.	Полигексафлуоропропе- нPHFP140W••	104	Конденсация воды на твердой поверхности	Xuehu M. и др. [7]
12.	PTFE1015•	100	Конденсация воды на твердой поверхности	Xuehu M. и др. [7]
13.	Фторсодержащая кислота (492 а.е.м.)	98	Конденсация воды на поверхности медно- никелевой трубы	Croix J.M. и др. [5]
14.	Фторсодержащая кислота (246 а.е.м.)	98	Конденсация воды на металлических по- верхностях	Данные автора [10]
15.	Олеат кальция (602 а.е.м.)	95	Конденсация воды на поверхности малоуг- леродистой стали	Филиппов Г.А. и др. [4]
16.	Парафиновая пленка	93	Вода на стекле	Попов В.Г.[6]
17.	PHFP80W••	93	Конденсация воды на твердой поверхности	Xuehu M. и др. [7]
18.	Олеат магния (586 а.е.м.)	92	Конденсация воды на поверхности стали	Филиппов Г.А.. [4]
19.	PHFP60W••	92	Конденсация воды на твердой поверхности	Xuehu M. и др. [7]
20.	Офсетная бумага	88	Глицерин в среде вазелинового масла	Попов В.Г. [6]
21.	Олеиновая кислота (282 а.е.м.)	86	Конденсация воды на поверхности малоуг- леродистой стали	Филиппов Г.А. и др. [4]
22.	Олеат олова (681 а.е.м.)	85	Конденсация воды на стали	Филиппов Г.А. [4]
23.	Олеат триэтенламина (432 а.е.м.)	82	Конденсация воды на поверхности малоуг- леродистой стали	Филиппов Г.А. и др. [4]
24.	Иллюстрационная бумага	82	Глицерин в среде вазелинового масла	Попов В.Г.[6]
25.	Олеат натрия (304 а.е.м.)	80	Конденсация воды на поверхности стали	Филиппов Г.А. [4]
26.	Мелованная бумага	76	Глицерин в среде вазелинового масла	Попов В.Г.[6]
27.	Минеральная поверхность	73	Вода на поверхности твердого тела	Попов В.Г.[6]
28.	Стекло	60	Углекислый газ в среде воды на твердой по- верхности	Попов В.Г.[6]
29.	16% Na <sub>2</sub> O+64% SiO <sub>2</sub> +20% MnO	50	Расплав в среде аргона на железе	Попов В.Г.[6]
30.	Кальцит	44	Вода на поверхности твердого тела	Попов В.Г.[6]
31.	Минеральная поверхность	39	Вода на поверхности твердого тела	Попов В.Г.[6]
32.	Поверхность без обработки	33	Конденсация воды на поверхности медной трубы	Kim K.. и др.[8]
33.	Полиэтилен	22	Вода в среде декана	Попов В.Г.[6]
34.	Кварц	13	Конденсация этанола на стекле	Zheng L. и др. [9]

Примечания:

• Метод DIMI — метод смешанной динамической ионно-лучевой имплантации для создания политетрафлуорэтиленовых поверхностей PTFE1015, PTFE1013, PTFE1010.

•• Метод PP — метод плазменной поляризации для создания полигексафлуоропропеновых поверхностей PHFP60W, PHFP80W, PHFP140W.

$$0 \leq \Theta_K \leq 0.222\pi, \Theta_H = 2.25\Theta_K; \quad (1)$$

$$0.222\pi \leq \Theta_K \leq \pi, \Theta_H = 0.643\Theta_K + 0.357\pi; \quad (2)$$

$$0 \leq \Theta_K \leq \pi, \Theta_O = 1.5\Theta_K - 0.5\pi. \quad (3)$$

Под такое обобщение попадает 95 % известных результатов исследований [1—16].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что исследование капельной конденсации представляет собой двуединую задачу: изучение механизма процесса, определяющего его микроуровень, а также изучение макроуровня процесса, определяющего его интенсивность.

Для механизма процесса характерно, что рост крупных капель до отрывного размера является наиболее продолжительным по сравнению со стадиями зарождения первичных и развития микронных капель.

Для быстротечных начальных стадий процесса контактный угол капель стремится к величине краевого угла смачивания для условий равновесия, а форма капель — к сферической. Вследствие изменения баланса сил поверхностного натяжения между жидкостью, паром и конденсационной поверхностью форма десорбционных капель может отличаться от сферической.

Рассмотрено явление гистерезиса краевого угла для капель, каплеподобных, псевдокапельных, капельно-ручьевых и пленочно-ручьевых образований. Получены зависимости для расчета возможных диапазонов изменения углов натекания и оттеkania в зависимости от значения равновесного краевого угла смачивания, обобщающие большинство известных результатов.

Анализируя все вышеизложенное следует, что с точки зрения макроуровня процесса для создания качественной капельной конденсации необходимо применение надежных лиофобизаторов, обеспечивающих значения краевого угла смачивания более 90°. При этом гистерезис контактного угла должен быть как можно меньшим, а в пределе — стремиться к нулю.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$R$  — радиус капель, м;

$R_{кр}$  — критический (зародышевый) радиус капель, м;

$R_0$  — отрывной (десорбционный) радиус капель, м;

$\Theta_K$  — равновесный краевой угол смачивания, угловой градус;

$\Theta_H$  — угол натекания, угловой градус;

$\Theta_O$  — угол оттеkania, угловой градус.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Исаченко В.П.** Теплообмен при конденсации. М.: Энергия, 1981. 240 с.
2. **Tanasawa I.** Advances in condensation heat transfer // Advances in Heat Transfer, 1991. Vol.21. P. 55—139.
3. **Танасава И.** Состояние и перспективные направления в исследованиях капельной конденсации // Нихон кикай гаккай ромбунсю. 1982. Т.48. № 429. С. 835—843.
4. **Филлипов Г.А., Салтанов Г.А., Кукушкин А.Н.** Гидродинамика и тепломассообмен в присутствии поверхностно-активных веществ. М.: Энергоатомиздат, 1988. 184 с.
5. **Croix J.M., Casset R., Camus R.** Etude de condensation en gouttes par promoteurs organiques. Lyon: SETRE, 1978. 32 p.
6. **Попов В.Г.** О гистерезисе краевого угла смачивания капель (пузырей) // Теплофизика высоких температур. 1991. Т.29. № 3. С. 530—539.
7. **Xuehu M., Dunci X., Jifand L.** A study of dropwise condensation on the ultra-thin polymer surfaces // Heat Transfer, Brighton, UK, 1994. Vol.3. P. 359—364.
8. **Kim K., Vemuri S., Bell T., Govindaraju S.** Advanced heat exchangers using tunable nanoscale-molecular assembly (Innovative concept phase — 1) // Nanoscience program university of Nevada, Nevada ventures, Reno, 2004. No DE-FG26-02NT41543. P. 1—42.
9. **Zheng L., Wang Y-X., Plawsky J. L., Wayner P. C.** Effect of curvature, contact angle, and interfacial sub cooling on contact line spreading in a micro drop in dropwise condensation // Langmuir, 2002. No 18. P. 5170-5177.
10. **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.
11. **Гавриш А.С., Дейнеко А.И., Рейда А.В.** Конденсация водяного пара на гидрофобных поверхностях с различной теплопроводностью // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Труды XV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева, посвященных 175-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана. М.: Издательство МЭИ, 2005, Т.1. С. 173—176.