

УДК 536.24

Об особенностях процесса конденсации на поверхностях теплообмена с различными краевыми углами смачивания

А. С. Гавриш

*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”, Киев, 03056, Украина
e-mail: andrew_gavrish@ukr.net*

Поступила в редакцию 9.12.2018

После доработки 23.12.2018

Принята к публикации 23.12.2018

Проведен анализ различных данных для одной из важнейших характеристик механизма конденсации – краевого угла смачивания. Рассмотрено явление гистерезиса краевого угла и диапазон изменения углов натекания и оттекания для различных типов теплоносителей и теплообменных поверхностей. Рассмотрена возможность получения супергидрофобных, гидрофобных и супергидрофильных теплообменных поверхностей наряду с существующими гидрофильными поверхностями. Сосуществование при этом различных типов конденсатных образований может быть охарактеризовано при помощи условного цикла процесса. Гистерезис краевых углов (статического равновесного, натекания и оттекания) для известных типов теплоносителей и теплообменных поверхностей нивелируется при переходе к супергидрофобным поверхностям. Описание многообразия конденсационных процессов, проводимое с использованием понятия условного цикла, получает ряд особенностей для супергидрофобных поверхностей. Рассмотрены эмпирические формулы для расчета диапазонов изменения углов натекания и оттекания в зависимости от значения краевого угла смачивания.

Ключевые слова: краевой угол смачивания, условный цикл конденсации, гидрофобность, гидрофильность.

Введение

На процесс конденсации оказывает влияние большое число различных факторов. К их числу относят выбор теплоносителя, материала конденсационной поверхности, способа лиофобизации и др. [1–4]. Существенным фактором также может служить форма, размеры и ориентация в пространстве поверхности теплообмена.

Существующие современные и будущие покрытия конденсационных поверхностей должны быть стабильными, иметь широкий спектр возможностей и позволять управлять процессом [5, 6]. Специфическая комбинированная поверхность позволяет комплексно и эффективно использовать действие сил поверхностного натяжения [7–9]. Это находит свое проявление в условном цикле конденсации [10–13].

Имеющихся данных о процессе капельной конденсации различных веществ пока еще недостаточно для технических приложений. Исключением может служить конденсация водяного пара (рис. 1), для которой в первом приближении известны основные закономерности осуществления капельной конденсации [2–5, 14]. Определенные успехи достигнуты и в расширении диапазонов исследования капельной конденсации для других теплоносителей [5–7, 15, 16].

Открытие Вильгельма Бартлотта (в 1975 г.) относительно специфической поверхности листа лотоса в виде микроскопических бугорков, несущих на себе нановолосинки, позволяет получить супергидрофобные поверхности совместно с эффектом самоочищения и возможностью отскока капель [5, 6, 8].

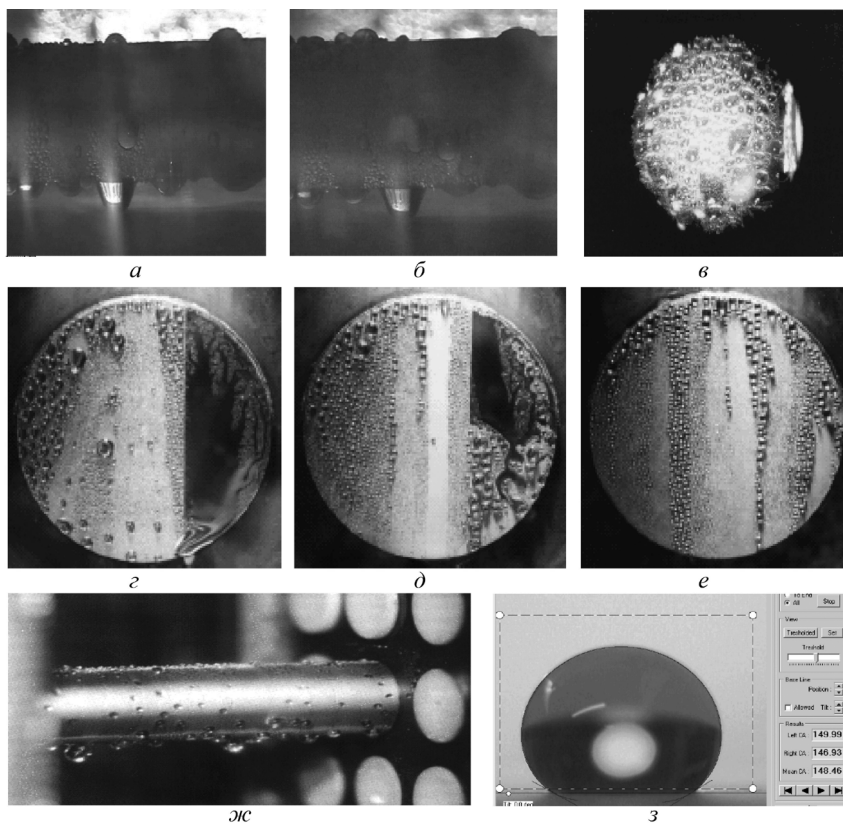


Рис. 1. Виды конденсационных поверхностей [2–7, 14–16]: *а, б* – медная труба с гидрофобным покрытием на основе стеариновой кислоты; *в* – золоченая плоская поверхность; *г, д, е* – металлы, обработанные плазмой; *ж* – полимерная пленка из органо-силикона; *з* – N-октадецил меркаптан

Супергидрофобными считаются поверхности с краевыми углами смачивания от 148° – 150° до предельных 180° . При этом гистерезис краевых углов смачивания – статического, натекания и отекания – должен быть низким, а в предельном случае – нулевым. В случае 180° разница между всеми вариантами угла смачивания должна отсутствовать.

В последнее время достигнуты успехи в получении супергидрофобных покрытий поверхностей не только для меди, медьсодержащих сплавов, но и для алюминия, алюминиевых сплавов и стали [5, 6]. Однако стойкость покрытия, в том числе и при воздействии теплового излучения, может повлиять на угол смачивания, значительно варьируя его в процессе эксплуатации поверхности. При этом не исключается возможность перехода от супергидрофобных свойств поверхности к просто гидрофобным свойствам, затем гидрофильным, вплоть до супергидрофильных и наоборот. Все это сказывается на механизме процесса конденсации, находя свое проявление в условном цикле конденсации.

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.

Общие закономерности процесса конденсации

Свойства конденсационных поверхностей находят свое отражение в балансе сил, воздействующих 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 [1–7], что первичные конденсатные образования имеют форму капли, они равновелики и их распределение по поверхности конденсации соответствует равномерной треугольной решетке. При визуальном наблюдении рост конденсатных образований вплоть до микронного размера происходит почти мгновенно [10–13].

Скоростная видеосъемка при многократном как оптическом, так и цифровом увеличении позволяет установить, что стадия развития конденсатных образований до десятков микрон длится от единиц до десятков микросекунд. При этом на конденсацию существенно влияет состояние поверхности теплообмена.

Дальнейшее развитие процесса вплоть до размеров порядка ста микрон сопровождается постепенным относительным уменьшением скорости роста. Стадия роста конденсатных образований до отрывного (десорбционного) размера является наиболее продолжительной по сравнению с предыдущими. При этом их размеры могут достигать

нескольких миллиметров. Удаление конденсатных образований с теплообменной поверхности происходит за доли секунды. На освободившейся поверхности процесс повторяется снова.

Анализируя фракционный состав конденсатных образований, можно утверждать, что диапазон дисперсности размеров зависит от теплофизических свойств жидкости, состояния поверхности и ряда других факторов [10–13]. 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 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. Этот факт является следствием изменения баланса сил поверхностного натяжения между жидкостью, паром и конденсационной поверхностью (см. рис. 1).

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.

Особенности современных поверхностей теплообмена

Атомный силовой, сканирующий зондовый, сканирующий электронный и просвечивающий электронный микроскопы позволяют отследить особенности получаемых современных поверхностей теплообмена. В случае электронной микроскопии радиус закругления вершины зонда требуется порядка 10–50 нм. Однако не всегда представляется возможным отслеживать состояние поверхностей теплообмена непосредственно

в процессе эксплуатации при воздействии разных типов конденсатных образований (см. рис. 1). В этой связи оптические микроскопы являются незаменимыми.

Получение всех современных теплообменных поверхностей можно классифицировать по двум основным направлениям [5, 6]: «сверху–вниз» и «снизу–вверх». Технология дробления веществ (механически или химически) до наноуровня с последующим нанесением на поверхность получила название «сверху–вниз». В свою очередь молекулярный синтез из отдельных атомов и молекул называется технологией «снизу–вверх». Второе направление несколько превалирует над первым.

Молекулярная сборка покрытий может быть реализована в виде двух- или трехмерных цепочек. В этой связи перспективным считается использование нанотрубок, таких как свернутые в трубку гексагональные графитовые плоскости с полусферической головкой – графены. Другим важным элементом служат молекулярные соединения типа выпуклых многогранников из четного числа трех координированных атомов углерода – фуллерены. Основу фуллеренового покрытия составляют наночастицы диаметром $0.7 \text{ нм} = 7 \text{ \AA}$. Такие покрытия в сотни раз прочнее и, одновременно с этим, в шесть раз легче стали. Кроме того, водные растворы фуллеренов являются мощными антиоксидантами.

Современные многофункциональные вещества способны дать эффект идеальной масляной пленки и выдерживают значительные температуры. Их используют в различных смазках. При умеренных температурах наночастицы таких веществ способны присоединяться к поврежденным участкам покрытия на теплообменной поверхности. Новые возможности раскрывают аллотропные формы углерода (например, карбин), аэрогели – «замороженный дым» и аэрографит – пена из трубчатых волокон углерода.

О гистерезисе краевого угла

Относительно крупными конденсатными образованиями считаются капли и локальные пленки размерами от 100 мкм вплоть до миллиметровых отрывных. Для них равновесие на поверхности теплообмена достигается при отклонении реальных контактных углов от статического равновесного значения угла смачивания Θ_K (рис. 2).

Краевые углы смачивания для различных сочетаний лиофобизатор–поверхность

№	Способ лиофобизации	Θ_K	Теплоноситель, поверхность теплообмена	Автор, работа
1.	Химическое осаждение PTFE процессом HFCVD	178°	Вода на углеродных нано трубках с покрытием PTFE и поверхностной энергией 18 мН/м	Kenneth K. S. Lau [8] Бойнович Л. Б. [5, 6]
2.	Фторид перфторбутановой-1-сульфонил и PTFE	170°	Вода на нержавеющей стали при термическом разложении гексафторпропиленоксида HFPO	Бойнович Л. Б. [5, 6]
3.	Объемный выращенный PTFE	161°	Вода на металлических поверхностях с объемно выращенным состоянием покрытия	Бойнович Л. Б. [5, 6]
4.	Стеариновая кислота	155°	Конденсация воды на медной трубе	Kim K. и др. [16]
5.	Гладкий PTFE 150 с использованием HFCVD	150°	Вода на поверхности технически гладкой кремниевой пластины с грубой текстурой	Kenneth K. S. Lau [8] Бойнович Л. Б. [5, 6]
6.	N-октадецил меркаптан	148°	Конденсация воды на медной трубе	Kim K. и др. [16]
7.	Стекло	140°	Квазиравновесный процесс для ртути	Попов В. Г. [9]
8.	Стекло	124°	Ртуть на стекле	Попов В. Г. [9]
9.	Политетрафторэтилен PTFE1010 *	114°	Конденсация воды на твердой поверхности	Xuehu M. и др. [15]
10.	Комплексная обработка поверхности	110°	Конденсация воды на металлических поверхностях	Данные автора [11–13]
11.	PTFE1013 *	109°	Конденсация воды на твердой поверхности	Xuehu M. и др. [15]
12.	Гладкий PTFE	108°	Конденсация воды на технической поверхности	Бойнович Л. Б. [5, 6]
13.	Дисульфид (958 а. е. м.)	108°	Конденсация воды на медно-никелевой трубе	Croix J. M. [14]
14.	Дисульфид (582 а. е. м.)	108°	Конденсация воды на металлических поверхностях	Данные автора [10]
15.	Октадециламин (269 а. е. м.)	105°	Конденсация воды на медной поверхности и на поверхности малоуглеродистой стали	Филиппов Г. А. и др. [4]
16.	Полигексафторпропен PHFP140W **	104°	Конденсация воды на твердой поверхности	Xuehu M. и др. [15]
17.	PTFE1015 *	100°	Конденсация воды на твердой поверхности	Xuehu M. и др. [15]
18.	Фторсодержащая кислота (492 а. е. м.)	98°	Конденсация воды на поверхности медно-никелевой трубы	Croix J. M. и др. [14]
19.	Фторсодержащая кислота (246 а. е. м.)	98°	Конденсация воды на металлических поверхностях	Данные автора [10]
20.	Олеат кальция (602 а. е. м.)	95°	Конденсация воды малоуглеродистой стали	Филиппов Г. А. [4]
21.	Парафиновая пленка	93°	Вода на стекле	Попов В. Г. [9]
22.	PHFP80W **	93°	Конденсация воды на твердой поверхности	Xuehu M. и др. [15]
23.	Олеат магния (586 а. е. м.)	92°	Конденсация воды на поверхности стали	Филиппов Г. А. [4]
24.	PHFP60W **	92°	Конденсация воды на твердой поверхности	Xuehu M. и др. [15]
25.	Спектр сыпучих PTFE	90°	Вода на металлических поверхностях	Бойнович Л. Б. [5, 6]
26.	Офсетная бумага	88°	Глицерин в среде вазелинового масла	Попов В. Г. [9]
27.	Олеиновая кислота	86°	Конденсация воды малоуглеродистой стали	Филиппов Г. А. [4]
28.	Олеат олова (681 а. е. м.)	85°	Конденсация воды на стальных поверхностях	Филиппов Г. А. [4]
29.	Углеродные нанотрубки	84°	Вода на металлических поверхностях	Kenneth K. S. Lau [8]
30.	Олеат триэтенламина	82°	Конденсация воды на малоуглеродистой стали	Филиппов Г. А. [4]
31.	Иллюстрационная бумага	82°	Глицерин в среде вазелинового масла	Попов В. Г. [9]
32.	Олеат натрия (304 а. е. м.)	80°	Конденсация воды на поверхности стали	Филиппов Г. А. [4]
33.	Мелованная бумага	76°	Глицерин в среде вазелинового масла	Попов В. Г. [9]
34.	Минеральная поверхность	73°	Вода на поверхности твердого тела	Попов В. Г. [9]
35.	Стекло	60°	Углеводород в воде на твердой поверхности	Попов В. Г. [9]
36.	16%Na ₂ O+64%SiO ₂ +20%MnO	50°	Расплав в среде аргона на железе	Попов В. Г. [9]
37.	Кальцит	44°	Вода на поверхности твердого тела,	Попов В. Г. [9]
38.	Минеральная поверхность	39°	Вода на поверхности твердого тела	Попов В. Г. [9]
39.	Чистая поверхность	33°	Вода на поверхности медной трубы	Kim K. и др. [16]
40.	Полиэтилен	22°	Вода в среде декана	Попов В. Г. [9]
41.	Кварц	13°	Конденсация этанола на стекле	Zheng L. и др. [7]

Примечания. * Метод DIMI – метод смешанной динамической ионно-лучевой имплантации для создания политетрафторэтиленовых поверхностей PTFE1015, PTFE1013, PTFE1010.

** Метод PP – метод плазменной поляризации для создания полигексафторпропеновых поверхностей PHFP60W, PHFP80W, PHFP140W.

PTFE – политетрафторэтилен; HFCVD – процесс получения покрытия поверхности на основе горячего химического осаждения веществ из паровой фазы.

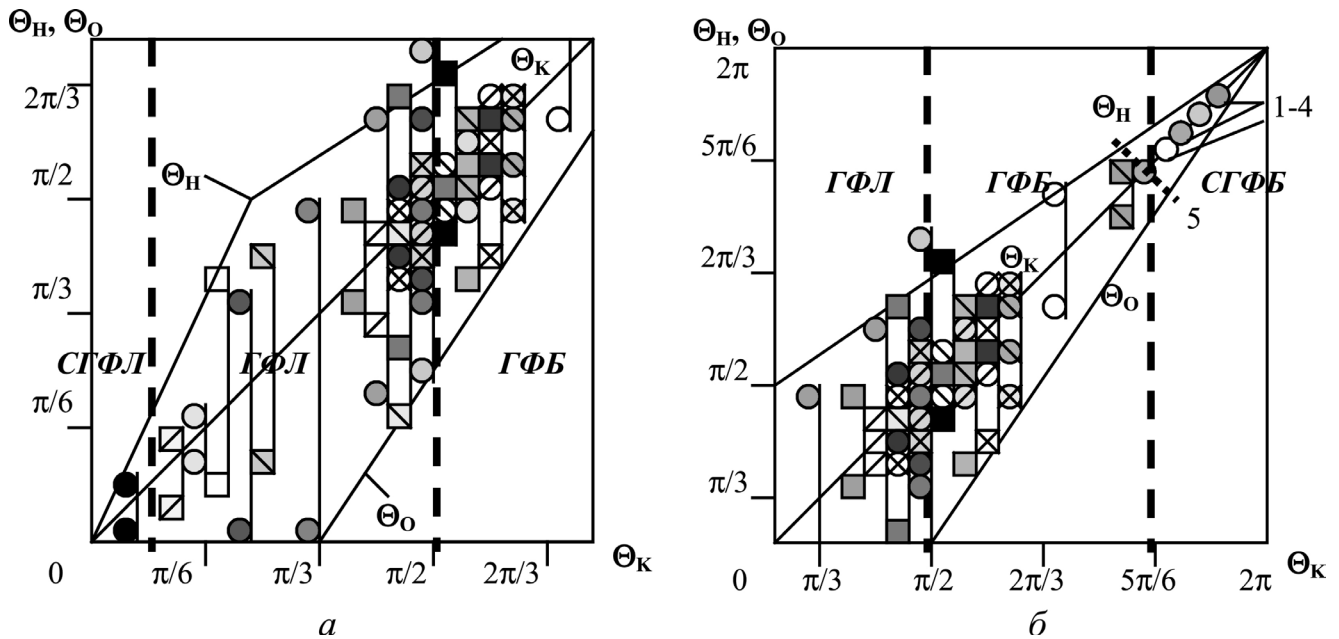


Рис. 2. Изменение углов натекания Θ_H и оттекания Θ_O для различных значений равновесного краевого угла смачивания Θ_K для капель и каплеподобных конденсатных формирований на супергидрофильных *СГФЛ*, гидрофильных *ГФЛ*, гидрофобных *ГФБ* и супергидрофобных *СГФБ* поверхностях в соответствии с данными, рассмотренными в [11]: *a* – переход между *СГФЛ* и *ГФБ*; *б* – переход между *ГФЛ* и *СГФБ*; 1–4 – данные по супергидрофобным поверхностям [5, 6, 8, 16] соответствуют поз. 1–4 в таблице; штриховая линия 5 указывает на фактическую границу супергидрофобного состояния [5, 6, 8] – поз.5 в таблице

Явление гистерезиса краевого угла Θ_K приводит к существенному отличию угла натекания Θ_H от угла оттекания Θ_O конденсационного образования. Вдоль линии контакта трех фаз краевой угол может принимать любые значения между Θ_H и Θ_O .

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

Если учесть, что для каждого конкретного процесса образования конденсата может иметь место явление гистерезиса, то о чисто капельной конденсации можно вести речь только в том случае, если весь спектр контактных углов (равновесный статический Θ_K , натекания Θ_H и оттекания Θ_O) превышает 90° . Если равновесный контактный угол Θ_K близок к 90° , Θ_O отличается от Θ_K в сторону уменьшения, а Θ_H – в сторо-

ну увеличения, то речь скорее идет о каплеподобных формированиях.

Такие данные по гистерезису контактного угла представлены на рис. 2. Причем, чем выше значение Θ_K и чем качественнее лиофобизатор, тем меньше различие между углами натекания Θ_H и оттекания Θ_O . При краевых углах $\Theta_K > 148\text{--}150^\circ$ гистерезис может стремиться к нулю и речь ведут о супергидрофобном состоянии (см. таблицу, поз. 1–6). Для капельных формирований (поз. 7, 8, 10, 13, 14, 18, 19) весь спектр контактных углов превышает 90° . Для каплеподобных формирований при $\Theta_K > 90^\circ$ угол оттекания Θ_O может отличаться в сторону уменьшения от 90° как слабо (поз. 20, 24), так и весьма значительно (поз. 9, 11, 15–17, 21–23). Если же углы натекания и оттекания меньше 90° , то будут рассматриваться псевдо-капельные конденсатные образования.

Псевдо-капельные образования при Θ_K , стремящемся к 90° , могут иметь угол натекания Θ_H , превышающий 90° (см. таблицу, поз. 26, 31, 33–35). Для капельно-ручьевых формирований (поз. 27, 28, 30, 32, 36–38) весь спектр контактных углов будет меньше 90° . Пленочно-ручьевые формирования будут иметь место (поз. 39–41) при углах контакта, все значения которых стремятся к 0° .

Краевые углы смачивания и условный цикл конденсации

Нельзя исключать из рассмотрения то, что самоорганизованные монослои покрытия могут иметь структурные дефекты, которые снижают гидрофобность (см. рис. 1). Правильность упаковки монослоя влияет на краевой угол смачивания. Механически организованные монослои позволяют получить краевые углы порядка 130° . Связанная с этим шероховатость поверхности также влияет на углы натекания и оттекания. Гистерезис краевых углов может достигать 85° – 100° в области, граничащей между гидрофильным и гидрофобным состояниями (см. рис. 2, *а*, *б*). При краевых углах порядка 170° – 175° гистерезис минимизируется и достигает 1° – 2° .

Для ряда современных покрытий характерным является обратимый конформационный переход с образованием вытянутых и спиралевидных цепочек при нагреве и охлаждении. Речь идет [5–8] о температурной зависимости краевого угла смачивания (см. точки, 1–4 на рис. 2, *б*). Можно добиться перехода от супергидрофобности до супергидрофильности с изменением гистерезиса угла смачивания. При этом также можно достичь многократного переключения режимов смачивания без деградации покрытия.

Такая комплексная и сложная ситуация с поверхностями теплообмена, их покрытиями и углами смачивания для конденсатных образований находит свое отражение в визуальной картине процесса (рис. 3). Кроме возможности сосуществования в динамике капель и локальных пленок появляется эффект отскока конденсата от супергидрофобных поверхностей. Все это можно описать при помощи условного цикла конденсации, как это показано на рис. 4. Обработка большого числа фото- и видеоматериала позволяет говорить с определенной долей условности о среднестатистической, периодически повторяющейся картине процесса.

Развитие конденсатных образований происходит от минимального зародышевого размера до максимального отрывного. Разбиение на типоразмеры в цикле может быть произвольным. Осреднение целесообразно проводить как в пределах отдельного типоразмера, так и цикла развития в целом. По мере приближения к супергидрофобному состоянию время условного цикла будет резко сокращаться. Свойством отскока обладают лишь капли отдельных типоразмеров (см. рис. 4, *б*), что позволяет говорить об альтернативных способах отвода конденсата и необходимости учета этого при определении интенсивности теплообмена.

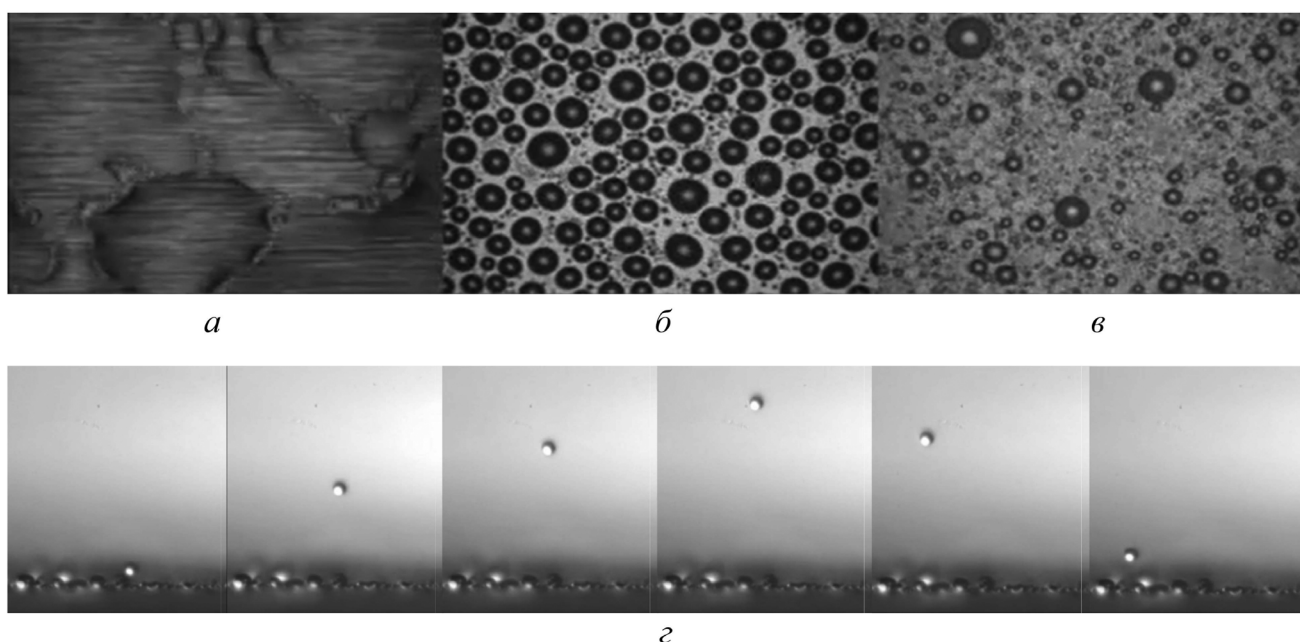


Рис. 3. Визуальная картина процесса конденсации: *а* – пленочный режим на гидрофильной поверхности; *б* – капельный режим на гидрофобной поверхности; *в* – капельный режим с отскоком капель (*з*) на супергидрофобной поверхности; *з* – динамика отскока капель на супергидрофобной поверхности

Методика расчета теплоотдачи по визуальной картине процесса

Понятие условного цикла конденсации позволяет произвести расчет теплоотдачи с использованием безразмерного комплекса пространственно-временного развития процесса конденсации A . Этот комплекс описывает как ярко выраженные капли A_{di} (формула (1)), так и локальные пленки A_{fj} (формула (2)). Расчет ведется для конденсатных образований определенного типоразмера: капель и локальных пленок. Он учитывает их пространственное развитие ($S \cdot \Delta N$), где S – это занимаемая площадь поверхности, m^2 ; ΔN – количество образований в соответствии с функцией распределения по размерам, $1/m^2$. Временной фактор существования Δt каждого из n классов капель и m классов локальных пленок относится ко времени цикла τ_0 (рис. 4). Разбиение на классы может быть произвольным: $i = 1 \dots n$ для капель и $j = 1 \dots m$ для пленок. Фактор интенсивности теплообмена определяется относительно Нуссельтовского решения α_{Nu} . Причем для каждого типоразмера конденсатных образований рассматривается модель теплопроводности, предложенная в свое время Роузом при определении α . Суммарный фактор A_S для сосуществующих капель и локальных пленок рассчитывается по формуле (3). Калькуляция средних коэффициентов теплоотдачи α_{calc} выполняется в соответствии с формулой (4).

$$A_{di} = \frac{(S \cdot \Delta N)_{di} \cdot \Delta \tau_{di} \cdot \alpha_{di}}{\tau_0 \cdot \alpha_{Nu}}; \quad (1)$$

$$A_{fj} = \frac{(S \cdot \Delta N)_{fj} \cdot \Delta \tau_{fj} \cdot \alpha_{fj}}{\tau_0 \cdot \alpha_{Nu}}; \quad (2)$$

$$A_S = \sum_{i=1}^n A_{di} + \sum_{j=1}^m A_{fj}; \quad (3)$$

$$\bar{\alpha}_{calc} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{A_{di}}{A_S} \alpha_{di} + \sum_{j=1}^m \frac{A_{fj}}{A_S} \alpha_{fj}}{n + m}. \quad (4)$$

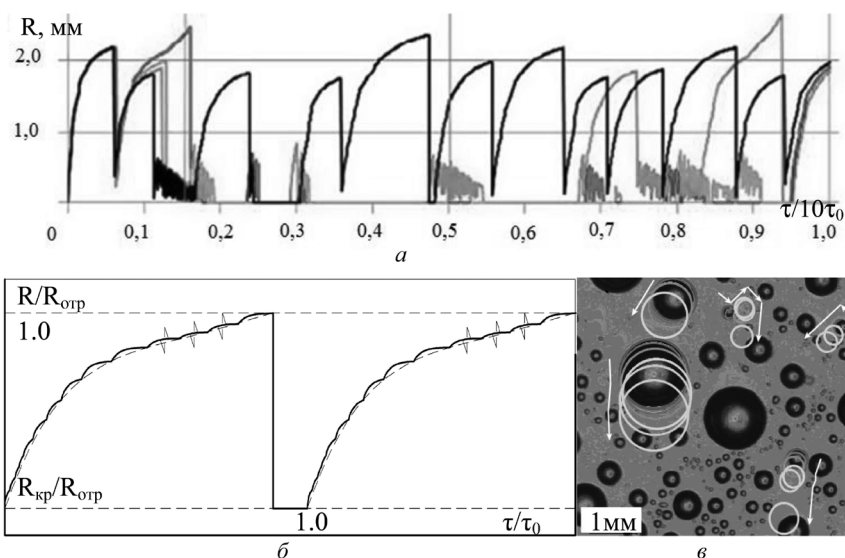


Рис. 4. Условный цикл процесса конденсации: a – реальная картина процесса для капель различных типоразмеров (кривые) в сравнении со среднестатистической осью координат; b – осредненная картина процесса с учетом эффектов отскока капель определенных типоразмеров (зигзаги); v – схема движение капель по теплообменной поверхности

Наличие отскока капель от поверхности конденсации учитываться в расчете следующим образом. Для этого в соответствии с визуальной картиной (см. рис. 2, z) необходимо учесть, что отскочившая капля освобождает поверхность для конденсатного образования меньшего типоразмера. А при возможном возвращении отскочившей капли на поверхность образуется конденсатное образование большего типоразмера (см. зигзаги на рис. 4, b).

Подобный подход для определения теплоотдачи дает сходимость с расчетом по балансовым соотношениям с погрешностью, не превышающей экспериментальную [17–20]. Следует отметить, что такой подход имеет определенное ограничение для супергидрофильных поверхностей, когда рассматривается одна сплошная пленка конденсата.

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

$$0 \leq \Theta_K \leq 0.222\pi, \Theta_H = 2.25\Theta_K, \quad (5)$$

$$0.222\pi \leq \Theta_K \leq \pi, \Theta_H = 0.643\Theta_K + 0.357\pi, \quad (6)$$

$$0 \leq \Theta_K \leq \pi, \Theta_O = 1.5\Theta_K - 0.5\pi. \quad (7)$$

Под такое обобщение (5–7) попадает 95% известных результатов исследований [1–20].

Заключение

Установлено, что исследование 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 конденсатных образований до отрывного размера является наиболее продолжительным по сравнению со стадиями зарождения первичных и развития микронных конденсатных образований.

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

Рассмотрено явление гистерезиса краевого угла для капель, каплеподобных, псевдокапельных, капельно-ручьевых и пленочно-ручьевых образований. 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 в случае супергидрофобных поверхностей теплообмена.

Получаемые современные наноструктурированные поверхности с усилением прочностных характеристик покрытия являются эффективными антикоррозионными системами для металлических подложек. Предвидение времени функционирования инкапсулированных компонентов связано с определением геометрических размеров дефектов покрытия, которые необходимо оперативно устранять. Этот подход является неотъемлемой частью для исследования срока действия лиофобных поверхностей теплообмена.

Для самовосстанавливающихся покрытий рассматривается возможность включения кластеров с функциональными компонентами с целью восстановления поврежденных участков на макро- и микроуровне. Функциональные компонен-

ты должны быть стабильными, эффективными и не проявляться ранее намеченного времени. К таким веществам относят, например, pH-чувствительные компоненты. Кроме того, рассматриваются модификаторы покрытий на основе нанотрубок и нановолокон. Сопутствующим фактором ко всем вышеперечисленным особенностям современных покрытий теплообменных поверхностей является эффект лотоса. Данный эффект, в свою очередь, находит свое отражение в краевых углах смачивания, их гистерезисе и, как следствие, оказывает влияние на цикличность конденсационных процессов.

Расчет теплоотдачи для сосуществования разных типоразмеров конденсатных образований и возможного отскока капель целесообразно проводить с использованием условного цикла и безразмерного комплекса пространственно-временного развития. Получены зависимости для расчета возможных диапазонов изменения углов натекания и оттекания в зависимости от значения равновесного краевого угла смачивания, обобщающие большинство известных результатов.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

R – радиус капель, м;
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 Θ – угол смачивания, угловой градус;
 τ – время, с.

ИНДЕКСЫ

k – равновесный краевой угол смачивания;
 $k_{кр}$ – критический зародышевый радиус;
 n – угол натекания;
 o – угол оттекания;
 $отр$ – отрывной десорбционный радиус;
 d – относящийся к каплям;
 f – относящийся к локальным пленкам.

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. V. 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. **Бойнович Л. Б., Емельяненко А. М.** Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение // Успехи химии. 2008. 77 (7). С. 619–638.
6. **Бойнович Л. Б., Домантовский А. Г., Емельяненко А. М. и др.** Противообледенительные свойства су-

- пергидрофобных покрытий из алюминия и нержавеющей стали // Известия Академии наук. Серия химическая. 2013. № 2. С. 383–391.
7. **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. N 18. P. 5170–5177.
 8. **Kenneth K.S. Lau, Jose Bico, Kenneth B.K. Teo, Manish Chhowalla, Gehan A.J. Amaratunga, William I. Milne, Gareth H. McKinley, Karen K. Gleason.** Superhydrophobic carbon nanotube forests // *Nano Letters*. 2003. V. 3. N 12. P. 1701–1705.
 9. **Попов В. Г.** О гистерезисе краевого угла смачивания каплей (пузырей) // *Теплофизика высоких температур*. 1991. Т. 29. № 3. С. 530–539.
 10. **Гавриш А. С., Риферт В. Г., Сардак А. И.** Анализ влияния диаметров каплей на интенсивность теплообмена при капельной конденсации // *Инженерно-физический журнал*. 1994. Т. 66. № 6. С. 668–672.
 11. **Гавриш А. С., Гавриш С. А.** Об особенностях краевого угла смачивания и механизма процесса конденсации // *Труды РНКТ-4*. 2006. Т. 5. С. 77–80.
 12. **Гавриш А. С.** О супергидрофобных поверхностях и механизме процесса конденсации // *Материалы Международной конференции СПТЭ*. 2017. Т. 1. С. 277–278.
 13. **Гавриш А. С.** О современных поверхностях теплообмена, краевых углах и условном цикле конденсации // *Труды РНКТ-7*. 2018. Т. 2. С. 35–38.
 14. **Croix J.M., Casset R., Camus R.** Etude de condensation en gouttes par promoteurs organiques. Lyon: SETRE, 1978. 32 p.
 15. **Xuehu M., Dunqi X., Jifand L.** A study of dropwise condensation on the ultra-thin polymer surfaces // *International Heat Transfer Conference*. Brighton, UK. 1994. V.3. P. 359–364.
 16. **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. N DE-FG26–02NT41543. P. 1–42.
 17. **Гавриш А. С.** О некоторых аспектах получения защитных покрытий несмачиваемых конденсационных поверхностей // *Труды РНКТ-7*. 2018. Т. 2. С. 31–34.
 18. **Гавриш А. С., Шевченко А. Н., Мисюра Т. А.** О перспективах применения супергидрофобных поверхностей // *Тепловые процессы в технике*. 2018. Т. 10. № 1–2. С. 84–89.
 19. **Гавриш А. С., Гавриш С. А., Христюк И. Н.** О применения поверхностно-активных веществ в теплообменниках-конденсаторах типа РТА // *Тепловые процессы в технике*. 2016. Т. 8. № 10. С. 461–465.
 20. **Гавриш А. С., Затирка Н. О., Гальченко И. В.** О применении веществ Гидроэффект-Нанопротек в теплообменных аппаратах // *Тепловые процессы в технике*. 2015. Т. 7. № 10. С. 449–453.

On specifics of condensation on the heat exchange surfaces with various contact angles of wetting

A. S. Gavrish

*National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky”,
Kiev, 03056, Ukraine
e-mail: andrew_gavrish@ukr.net*

A great number of various factors affects the condensation process. They include selection of the coolant, condensation surface material, lyophobicization method, etc. The shape, size and orientation in space may also be an essential factor.

Various data analysis for one of the condensation mechanism primary characteristics, namely the contact angle of wetting was performed. The wetting angle hysteresis phenomenon and variation range of inflow wetting angles and outflow wetting angles were considered for various coolants and heat exchange surfaces types. The possibility of obtaining super hydrophobic, hydrophobic, and super-hydrophilic heat transfer surfaces along with the existing hydrophilic surfaces was considered as well. The coexistence of various types of condensate compositions herewith can be characterized by the conditional process cycle. The contact angles hysteresis (static equilibrium, inflow and outflow) for the well-known types of coolants and heat exchange surfaces is leveled while transition to the super hydrophobic surfaces. The description of variety of condensation processes, performed applying the conditional cycle concept, acquires a number of specifics for the super hydrophobic surfaces. The empirical formulas for computing the ranges of inflow and outflow angles depending on the contact angle of wetting value were considered.

Recently, the progress has been made in obtaining super hydrophobic surface coatings not only for copper and copper alloys, but also for aluminum, aluminum alloys and steel. However, the coating persistence, including its running under the heat radiation impact, may affect the wetting angle, varying it significantly while this surface operating. This does not exclude herewith the possibility of transition from the super hydrophobic surface properties to simply hydrophobic

properties, and then to the hydrophilic down to super hydrophilic and vice versa. All this affects the condensation process mechanism, finding its manifestation in the conditional condensation cycle.

It is advantageous to perform the analysis of the accumulated theoretical and experimental material along the two interconnected lines. One of these lines is studying the process mechanism, which determines its micro level. The other line consists in studying the process macro level, and eventually its intensity.

Keywords: contact angle, conditional condensation cycle, hydrophobic behavior, hydrophilic behavior.

REFERENCES

1. **Isachenko V.P.** *Teploobmen pri kondensatsii* [Heat transfer during condensation]. Moscow: Energia, 1981. 240 p. In Russ.
2. **Tanasawa I.** Advances in condensation heat transfer. *Advances in Heat Transfer*, 1991, vol. 21, pp. 55–139.
3. **Tanasava I.** Status and future directions in the study of condensation drip. *Nihon Kikai Gakkai rombunshu*, 1982, vol.48, no. 429, pp. 835–843.
4. **Filippov G.A., Saltanov G.A., Kukushkin A.N.** *Gidrodinamika i teplomasoobmen v prisutstvii poverkhnostno-aktivnykh veshhestv* [Hydrodynamics and heat-mass transfer in the presence of surfactants]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 184 p. In Russ.
5. **Boinovich L.B., Emelyanenko A.M.** Hydrophobic materials and coatings: Principles of design, properties and applications. *Russian Chemical Reviews*, 2008, vol. 77, no. 7, pp. 583–600. DOI: 10.1070/RC2008v077n07ABEH003775
6. **Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Khodan A.N., Domantovskii A.G., Miller A.B., Potapov Y.F.** Antiicing performance of superhydrophobic coatings on aluminum and stainless steel. *Russian Chemical Bulletin*, 2013, vol. 62, no. 2, pp. 380–387 DOI: 10.1007/s11172-013-0049-6
7. **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, pp. 5170–5177.
8. **Lau K.K.S., Bico J., Teo K.B.K., Chhowalla M., Amaratunga G.A.J., Milne W.I., McKinley G.H., Gleason K.K.** Superhydrophobic carbon nanotube forests. *Nano Letters*, 2003, vol. 3, no. 12, pp. 1701–1705.
9. **Popov V.G.** On the hysteresis of the contact angle of droplets (bubbles). *High Temperature*, 1991, vol. 29, no. 3, pp. 420–429.
10. **Gavrish A.S., Rifert V.G., Sardak A.I.** Analysis of the influence of drop diameters on the intensity of heat transfer in dropwise condensation. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1994, vol. 66, no. 6, pp. 593–597. <https://doi.org/10.1007/BF00867956>
11. **Gavrish A.S., Gavrish S.A.** Ob osobennostyakh kraevogo ugla smachivaniya i mekhanizma protsessy kondensatsii [On the features of the wetting angle and the mechanism of the condensation process]. *Trudy RNKT-4 – Proceedings of the Fourth Russian National Conference on Heat Exchange (RNCT-4)*, 2006, vol. 5, pp. 77–80. In Russ.
12. **Gavrish A.S.** O supergidrofobnykh poverkhnostyakh i mekhanizme protsessy kondensatsii [About superhydrophobic surfaces and the mechanism of the condensation process]. *Materialy Mezhdunarodnoj konferentsii SPTEH – Proceedings of International Conference “Problems of Thermal Physics and Power Engineering”*, 2017, vol. 1, pp. 277–278. In Russ.
13. **Gavrish A.S.** O sovremennykh poverkhnostyakh teploobmena, kraevykh uglakh i uslovnom tsikle kondensatsii [About modern heat exchange surfaces, boundary corners and conventional condensation cycle]. *Trudy RNKT-7 – Proceedings of the Seventh Russian National Conference on Heat Exchange (RNCT-7)*, 2018, vol. 2, pp. 35–38. In Russ.
14. **Croix J.M., Casset R., Camus R.** *Etude de condensation en gouttes par promoteurs organiques*. Lyon: SETRE, 1978. 32 p.
15. **Xuehu M., Dunqi X., Jifand L.** A study of dropwise condensation on the ultra-thin polymer surfaces. *International Heat Transfer Conference, Brighton, UK*, 1994, vol. 3, P. 359–364.
16. **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. N DE-FG26–02NT41543. P. 1–42.
17. **Gavrish A.S.** O nekotorykh aspektakh polucheniya zashhitnykh pokrytij. nesmachivaemykh kondensatsionnykh poverkhnostej [On some aspects of obtaining protective coatings. non-wetted condensation surfaces]. *Trudy RNKT-7 – Proceedings of the Seventh Russian National Conference on Heat Exchange (RNCT-7)*, 2018, vol. 2, pp. 31–34. In Russ.
18. **Gavrish A.S., Shevchenko A.N., Misyura T.A.** O perspektivakh primeneniya supergidrofobnykh poverkhnostej [On superhydrophobic surfaces’ application perspectives]. *Teplovy protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2018, vol. 10 no. 1–2, pp. 84–89. In Russ.
19. **Gavrish A.S., Gavrish S.A., Khristyuk I.N.** O primeneni poverkhnostno-aktivnykh veshhestv v teploobmennikakh-kondensatorakh tipa RTA [On the application of surfactants in collapsible heat exchangers-condensers]. *Teplovy protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2016, vol. 8, no. 10, pp. 461–465. In Russ.
20. **Gavrish A.S., Zatirka N.O., Galchenko I.V.** O primeneni veshhestv Gidroeffect-Nanoprotek v teploobmennykh apparatakh [About application of Hydroeffect-Nanoprotec substances in heat exchangers]. *Teplovy protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2015, vol. 7, no. 10, pp. 449–453. In Russ.