УДК 536.2:532/533

КРИЗИС КИПЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДНОГО РАСТВОРА СОЛИ

Накоряков В.Е., Мисюра С.Я., Овчинников В.В.

Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта Российского научного фонда № 15-19-10025

АННОТАЦИЯ

В работе проведено экспериментальное исследование поведения капель водного раствора LiBr на высокотемпературной горизонтальной поверхности в широком диапазоне температур поверхности стенки и начальной концентрации соли в растворе. Выявлены характерные особенности испарения и кипения одиночных капель раствора бромистого лития. При температуре выше 150 °C происходит процесс взрывного разрушения навески сразу же при нанесении капли на поверхность - наблюдается кризис кипения. Часть жидкости удаляется, а капля вновь возвращает себе блинообразную форму с последующим диффузионным испарением. Для капель солевого раствора устойчивая паровая прослойка не образуется, капля непрерывно с высокой частотой касается стенки. Особенности роста кристаллогидратной плёнки зависят от скорости кристаллизации. При медленной кристаллизации плёнка растёт только на верхней межфазной поверхности. При высоких же скоростях нагрева твёрдая корка образуется как на верхней, так и на нижней межфазной поверхности капли. Тепловые измерения проведены с помощью многократного увеличения тепловизора. Видео и тепловизионная съёмка позволили выделить при высоких скоростях кристаллизации самоорганизующиеся кристаллогидратные структуры: стержневые, дендритные, сетчатые, куполообразные. Сложная морфология структур способствует росту скорости десорбции воды с поверхности кристаллогидратной плёнки.

ВВЕДЕНИЕ

На практике в теплообменных устройствах энергетических аппаратов широко применяется испарение капель. Испарения капель однокомпонентных жидкостей без пузырькового кипения исследовалось в [1-7]. Для указанных условий удаётся точно рассчитать изменение по времени геометрии капли и её скорости испарения. При высоких тепловых потоках и образовании пузырьков пара картина испарения существенно усложняется. Граничные условия изменяются по времени [8, 9] и приходится иметь дело со скользящей контактной линией. Поведение солевых растворов принципиально отличается от летучих жидкостей. При выпаривании водных растворов солей десорбирует только вода, соль же остаётся в растворе. Для водных растворов соли скорость испарения непрерывно падает с ростом времени из-за непрерывного роста концентрации соли в капле [10-11]. При этом фазовое равновесие на границе раздела «жидкость-пар» определяется помимо давления и температуры также и концентрацией растворенных веществ. Десорбция водного раствора Li–Br используется в десорберах бромистолитиевых термотрансформаторов. Один из способов увеличения эффективности теплового насоса – повышение перегрева стенки, что в свою очередь также позволяет сократить время десорбции и увеличить коэффициент теплоотдачи α. При переходе однофазного испарения в жидкости к двухфазному кипению (пар – жидкость) резко возрастает α. При пузырьковом кипении водно-солевого раствора скорость роста пузырька пара падает в десятки раз по сравнению с кипением в чистой воде [11]. На сегодняшний день крайне мало работ по исследованию механизмов кипения в небольших навесках солевых растворов. Настоящая работа исследует динамику кризисного кипения в крупных каплях водного раствора LiBr при высоких перегревах стенки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Все эксперименты проведены на горизонтальной нагреваемой поверхности металлического цилиндра. В качестве рабочего материала использовался титан, что позволило провести опыты с коррозионно-активным водным раствором соли LiBr. Начальная температура стенки поддерживалась в автоматиче-

© Накоряков В.Е., Мисюра С.Я., Овчинников В.В.

ском режиме с погрешностью в пределах 1 °С. Эксперименты проведены при атмосферном давлении и температуре внешней среды 23 °С. Значения начальных массовых концентрации соли в растворах C_0 определялись с помощью денсиметров. Ввод на поверхность нагрева дозированных объемов V_0 производился с помощью пипеточных микродозаторов с высоты 3-5 мм, что исключало распад капли (низкие числа *We*). Тепловизионные измерения произведены с помощью высокоточной измерительной ячейки NEC-San Instruments и шестикратного увеличения изображений. Отличие в температурах поверхности капли, измеренных термопарой и тепловизором, не превышало 2 %.

На Рис. 1 приведено изменение полного времени десорбции капли соли при изменении температуры стенки. Каждая отдельная точка на графиках соответствует отдельному эксперименту. Как видно из рисунка, при начальной температуре стенки выше 160 °С, влияние температуры T_w на время t_1 становится незначительным для любой исследованной начальной массовой концентрации соли.

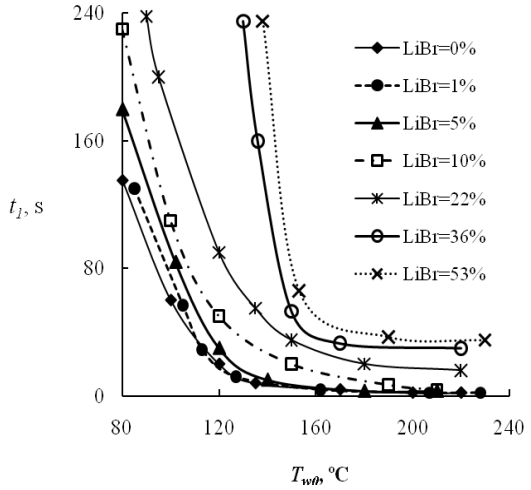

Рис. 1 Изменение полного времени десорбции капли водного раствора LiBr от температуры стенки.

Постоянство времени t_1 для больших перегревов связанно с характером десорбции. При температурах ниже 130 °С десорбция реализуется с межфазной поверхности капли, от микрослоя основания пузыря и с поверхности паровых пузырей внутри капли. При высоких же перегревах стенки (T_w выше 160 °С) кризис кипения приводит к периодическому отрыву капли от стенки. Режим паровой прослойки (отрыв) чередуется касанием капли твёрдой стенки (присоединение). В момент касания стенки часть жидкости выбрасывается из-под капли. Большая капля расподается на более мелкие, те в свою очередь также расподаются. Реализуется каскадный процесс распада, в результате которого суммарная поверхность образованных капель возрастает во много раз. Учитывая, что скорость распада и скорость возрастания площади значительно превосходит скорость десорбции (диффузия очень инерционный процесс), то регулирующим параметром будет скорость распада, т.е. параметр неустойчивости формы капли, неустойчивость контактной линии капли на твёрдой стенке. На сегодняшний день модели расчёта рассматривают кипение или сидящей капли, или висящей в режиме Лейденфроста. В действительности, реальная физическая модель десорбции капли при наличие кризиса кипения существенно сложнее.

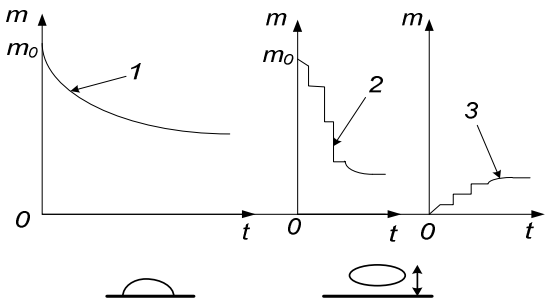

Рис. 2 Изменение массы капли раствора соли от времени: Кривая 1 для сидящей капли; Кривая 2 для кризиса кипения (периодический отрыв капли); Кривая 3 для изменения массы корки кристаллогидратов.

На Рис. 2 схематически показано изменение массы капли от времени. Для низких перегревов (Кривая 1, случай сидящей на стенке капли) масса капли монотонно убывает. Причём, скорость уменьшения массы падает со временем из-за роста концентрации соли и благодаря стремлению системы к состоянию термодинамического равновесия (разница между равновесной концентрацией на межфазной поверхности капли и средней объёмной концентрацией в капле падает со временем). При кризисе же кипения, периодический выброс жидкости приводит к дискретному падению массы капли (Кривая 2). Для данного случая крайне сложно экспериментально определить скорость десорбции. Для случая сидящей капли (Кривая 1), масса капли изменяется только за счёт десорбции воды. Масса же соли в капле постоянна. Для Кривой 2 из капли выбрасывается не только вода, но и соль. Таким образом, масса соли в капле не постоянна. Выброшенная соль образует на твёрдой стенке соленые пятна (твёрдая корка кристаллогидратов соли). Изменение массы данной соляной корки представлено Кривой 3. Важно отметить ещё одно отличие кипения капли раствора соли от кризисного кипения растворов с летучими компонентами. Для солевого раствора режим Лейденфроста не реализуется при любых высоких перегревах, а имеется толь-

ко переходной режим кризиса – переодическое высокочастотное касание капли стенки. В висящей капли раствора соли имеется градиент концентрации в поперечном направлении. Максимальная концентрация соли соответствует нижней поверхности капли, где имеется максимальная температура в паровом слое. При приближении концентрации соли на межфазной поверхности к точке кристаллизации, подвижность молекул на межфазной поверхности стремится к нулю, многократно уменьшается эластичность поверхности капли. В результате паровая прослойка исчезает и капля касается стенки. При выбросе высококонцентрированного раствора соли из донной области капли, концентрация соли в капле уменьшается и капля снова отрывается от стенки. Отрывы происходят до тех пор, пока объёмная концентрация соли в капле не приблизится к точке кристаллизации, что исключит десорбцию и существование паровой прослойки (режим висящей капли).

На Рис. 3 приведены фотографии тепловизора в различные моменты времени. Через 6 s чётко видно образование стержневых структур (rods), которые быстро переходят в ветвящиеся структуры и далее в сетчатые и куполообразные (dome-like). Средний продольный градиент температуры по длине стержней составляет 0.9 °C/mm. Средний поперечный температурный градиент стержней около 50 °C/mm. Таким образом, поперечный градиент превосходит продольный примерно в 50 раз. Средняя скорость кристаллизации в продольном направлении стержней соответствовала 1,5–3 mm/s. При температуре стенки 80 °C происходит медленная кристаллизация со скоростью 0.05–0.1 mm/s и кристаллогидраты имеют точечную структуру для плёнки водного раствора LiBr [12]. Таким образом, переход от медленной к быстрой кристаллизации сопровождается изменением морфологии структур. Появление новых упорядоченных кристаллических структур выгодно с энергетической точки зрения, так как позволяет повысить поток десорбции пара и значительно уменьшить полное время десорбции.

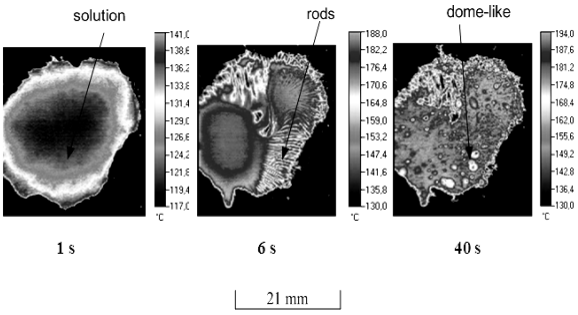

Рис. 3 Тепловизионные изображения процесса кристаллизации (C_0=36 %; T_{w0}=180 °C, V_0=46 μl)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- При температуре стенки выше 150 °C происходит процесс взрывного разрушения капли сразу же при нанесении капли на поверхность. Часть жидкости выбрасывается из под капли, а капля вновь возвращает себе блинообразную форму.
- Постоянство полного времени десорбции t1 для больших перегревов связанно с характером десорбции. Для режима сидящей капли реализуется только десорбция без распада капли. При кризисе кипения возникает каскадный распад капли с многократным ростом площади капли. Кинетика десорбции для данного случая определяется гидродинамической неустойчивостью капли.
- Переход от медленной к быстрой кристаллизации сопровождается изменением морфологии структур. Появление новых упорядоченных кристаллогидратных структур выгодно с энергетической точки зрения, так как позволяет повысить поток десорбции пара и значительно уменьшить полное время десорбции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brutin D., Sobac B., Rigollet F., C.Le-Niliot. Infrared visualization of thermal motion inside a sessile drop deposited onto a heated surface // Experimental Thermal and Fluid Science. -2011. – V. 35. -P. 521-530.
2. Bartashevich M.V., Marchuk I.V., Kabov O.A. Numerical simulation of natural convection in a sessile liquid droplet // Thermophysics and Aeromechanics. – 2012. – V. 19. -P. 317-328.
3. Nazarov A.D., Serov A.F., Terekhov V.I., Sharov K.A. Experimental investigation of evaporative pulse-spray impingement cooling // J. of Engineering Physics and Thermophysics. – 2009. – V.82. -P. 1184-1190.
4. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Water droplet deformation in gas stream: Impact of temperature difference between liquid and gas // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – V. 85. -P.1–11.
5. Feoktistov D.V., Kuznetsov G.V., Orlova E.G. // EPJ Web of Conferences 76 012039 1-8 (2014).
6. Bin He, Fei Duan. Evaporation and convective flow pattern of a heated pendant silicone oil droplet // International Journal of Heat and Mass Transfer. –

2015. - Vol.85. -P. 910–915.

7. Jingchun Min, Yicun Tang. Theoretical analysis of water film evaporation characteristics on an adiabatic solid wall // International Journal of Refrigeration. -2015. (doi:10.1016/j.ijrefrig.2015.02.002).
8. Misyura S.Y., Nakoryakov V.E., Elistratov S.L. The behavior of water droplets on the heated surface // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2012. – V.55. -P. 6609-6617.
9. Misyura S.Ya. Nucleate boiling in bidistillate droplets // Int. Journal Heat Mass Transfer. – 2014. - V.71. -P. 197-205.
10. Misyura S.Y., Nakoryakov V.E., Elistratov S.L. Peculiarities of nonisothermal desorption of drops of lithium bromide water solution on a horizontal heated surface // Journal of Engineering Thermophysics. – 2011. – V.20. - P. 338–343.
11. Misyura S.Ya. High temperature nonisothermal desorption in a water salt droplet // International Journal of Thermal Sciences. – 2015. - V.9. - P. 34-43.
12. Misyura S.Y., Nakoryakov V.E., Elistratov S.L. Nonisothermal desorption of droplets of complex composition // Thermal Science.-2012. - V. 16. - № 4. -P. 997-1004.