

ТЕРМОКАПИЛЛЯРНИЙ РАЗРЫВ ПЛЕНКИ ВОДЫ ПРИ ПАРООБРАЗОВАНИИ НА ВРАЩАЮЩЕМСЯ ДИСКЕ

I. I. PUKHOVYI

CAPILLARY BLOWOUT OF WATER FILM AT VAPORIZATION ON ROTATING DISK

Анотация. Виконані експериментальні дослідження впливу температури, недогріву води до температури кипіння, густини теплового потоку, утворення бульбашок пари в плівці, відцентрового прискорення та радіуса оберткових дисків з міді та нержавіючої сталі радіусом 0,15 м. на початок розривання плівки води під дією термокапілярних сил. Мідь змочується гірше, ніж нержавіюча сталь. З збільшенням швидкості обертання диска та зменшенням густини теплового потоку мінімальна щільність зрошення зменшується. Результати дослідження порівняні з відомим теоретичним рішенням. Є хороший якісний збіг впливу різних параметрів, крім радіуса. Збіг чисельних результатів є лише при розрахункових кутах змочування менше 5 градусів. В експериментах отримано, що мінімальна щільність зрошення змінювалась від 0,2 до 20 г/(м·с).

Ключові слова: термокапілярні сили, щільність зрошення, оберткові диски.

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования влияния температуры, недогрева воды до температуры кипения, плотности теплового потока, центробежного ускорения и радиуса вращающихся дисков из меди и нержавеющей стали радиусом 0,15 м на начало разрыва пленки воды под действием термокапиллярных сил. Медь смачивается хуже, чем нержавеющая сталь. С увеличением скорости вращения диска и уменьшения плотности теплового потока минимальная плотность орошения уменьшается. Результаты исследования сопоставлены с известным теоретическим решением. Имеется хорошее качественное совпадение влияния различных параметров, кроме радиуса. Совпадение численных результатов наблюдается только при расчетных углах смачивания менее 5 градусов. В экспериментах получено, что минимальная плотность орошения изменялась от 0,2 до 20 г/(м·с).

Ключевые слова: термокапиллярные силы, плотность орошения, вращающийся диск.

Annotation. Experimental study of the influence of temperature, the subcooling of water to boiling temperature, the heat flux, the centrifugal acceleration and the radius of the rotating copper and stainless steel discs with radius 0,15 m on the starting of the water film blowout on under the action of thermocapillary forces. Copper wets worse than stainless steel. With increasing of the speed of rotation of the disc and reducing of the heat flux density the minimal irrigation is reduced. Results of the study are compared with known theoretical solution. There is good a qualitative agreement between the influence of various parameters, except for the radius. The match of numerical results is observed only when the calculated wetting angles are less than 5 degrees. In the experiments it was found that the minimum density of irrigation is ranged from 0.2 to 20 g/(m·s).

Key words: thermocapillary forces, density the irrigation, rotating disk.

Введение

Пленочные теплообменные аппараты широко используются для выпаривания и нагрева жидкостей. Различают гравитационные, роторные и центробежные аппараты. В центробежных аппаратах благодаря вращению теплообменной поверхности интенсивность тепло- и массообмена возрастает на порядок по сравнению с гравитационными установками благодаря уменьшению толщины пленки [1]. При этом коэффициенты теплоотдачи на воде достигают рекордных для рекуперативных аппаратов значений до 30...35 кВт/(м² К). При испарении пленок следует остерегаться их разрыва, сопровождающегося оголением и перегревом поверхности. Закономерности разрыва пленок при парообразовании жидкости отличаются от наблюдаемых при изотермическом движении [2].

Состояние вопроса и постановка задачи исследования.

Известны исследования термокапиллярного разрыва пленок в Киевском политехническом институте (каф. МАХНВ) при течении под действием сил гравитации и в роторно-пленочных аппаратах, где на пленку накладывается воздействие от вращающегося внутри вертикального корпуса ротор с жесткими или подвижными лопатками, например [3,4]. Отмечается улучшение смачивания при увеличении оборотов ротора. Нарушение сплошности пленочного течения может происходить как под действием поверхностных сил, влияние которых рассмотрено выше, так и в результате наличия градиента сил поверхностного натяжения, а также сил реактивного давления пара [6]. Термокапиллярный разрыв жидких пленок исследовался ранее в [5, 6]. Н.Зубер и Ф.Штауб [6] получили теоретическую зависимость, с помощью которой можно вычислить минимальную плотность орошения для условий течения жидкости под действием сил тяжести.

Нам неизвестны исследования по изучению термокапиллярного разрыва жидких пленок в условиях парообразования на вращающихся поверхностях, поэтому задачей работы есть теоретический анализ и экспериментальное исследование упомянутых процессов при парообразовании воды на вращающихся дисках.

Теоретический анализ с использованием зависимости [5] для гравитационного течения. Заменяя в полученной формуле [6] гравитационное ускорение g на центробежное $J = \omega^2 R$, эту зависимость можно записать:

$$\frac{\rho}{15} \cdot \left[\frac{J \cdot \Delta\rho}{\rho \cdot \nu} \right]^2 \cdot \left[\frac{3 \cdot \Gamma \cdot \nu}{J \cdot \Delta\rho} \right]^{4/3} = \frac{\sigma \cdot (1 - \cos \theta)}{(3 \cdot \Gamma \cdot \nu / J \cdot \Delta\rho)^{1/3}} + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot \cos \theta + \rho_n \cdot \left[\frac{q}{r \cdot \rho_n} \right]^2 \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \cos^2 \theta, \quad (1)$$

где ν , σ , ρ , θ , λ , Γ – соответственно вязкость, поверхностное натяжение, плотность, угол смачивания, теплопроводность и теплота испарения жидкости, T – температура, q – плотность теплового потока, ρ_1 плотность пара. $\tilde{A} = \Gamma_{\min}$ – минимальная плотность орошения.

На ЭВМ нами проведены расчеты величины сил, входящих в уравнение (табл. 1), а также минимальной плотности орошения для воды в зависимости от центробежного ускорения J , плотности теплового потока q , угла смачивания θ и температуры насыщения t . В этих же таблицах для относительного сравнения представлены значения сил 1,2,3 и 4 (нумерация членов уравнения начинается со стоящего левее знака =), выраженные в процентах от гидродинамических сил 1 в Н/м, способствующих смачиванию поверхности.

Анализируя данные табл. 1 и 2, приходим к выводу, что при парообразовании пленок воды на вращающейся поверхности роль сил реактивного давления пара (член 4) несоизмеримо мала по сравнению с силами поверхностного смачивания – 2 и термокапиллярными силами – 3. Соотношение между последними двумя силами, как видно из расчетных результатов, находится в зависимости от величины θ , q и J . При небольших значениях θ и J с увеличением q роль термокапиллярных сил в разрыве пленки возрастает и они становятся определяющими. Наибольшее влияние q имеет место при небольших углах смачивания. Увеличение центробежного ускорения J , как показывают расчеты, способствует значительному снижению величины Γ_{\min} .

Таблица 1

$J = 1681 \text{ м/с}^2 - \dot{\omega} = 104.6 \text{ 1/с}; R = 0,15 \text{ м.}$

$q \times 10^{-3}, \text{ Вт/м}^2$	Члены уравнения (1)	100°C		50°C			
		$\theta = 5^\circ$		$\theta = 5^\circ$		$\theta = 60^\circ$	
		Н/м	%	Н/м	%	Н/м	%
50	1 (слева)	33,22	100	31,08	100	950,8	100
	2	20,2	60,5	17,3	55,9	943,9	99,3
	3	13,12	39,5	13,83	46,1	6,94	0,7
	4	$0,8 \cdot 10^{-3}$	0,1	–	0,1	–	–
200	1 (слева)	69,32	100	69,55	100	967,63	100
	2	16,78	24,3	14,15	20,3	39,74	97,2
	3	52,5	75,7	55,34	79,6	27,77	2,8
	4	0,013	0,1	0,09	0,1	–	–

Таблица 2

$\theta = 5^\circ; 100^\circ\text{C}$

$q \times 10^{-3}, \text{ Вт/м}^2$	Члены Уравнения (1)	$J = 262 \text{ м/с}^2$		$J = 1641$		$J = 3224$	
		Н/м	%	Н/м	%	Н/м	%
50	1 (слева)	22,07	100	33,22	100	10,25	100
	2	8,92	40,4	20,17	60,8	6,93	54,5
	3	13,13	59,8	13,13	39,2	3,13	35,5
200	1 (слева)	59,62	100	69,32	100	75,6	100
	2	6,96	12	16,78	24,2	23,0	30,5
	3	52,5	88	52,5	75,8	52,5	69,5

Понижение температуры насыщения приводит к относительному повышению величины термокапиллярных сил. Сравнение расчетных величин Γ_{\min} с опытными показано на рис. 3.

Экспериментальное изучение минимальной плотности орошения при парообразовании воды. Опыты проводились на дисках из меди с рабочими радиусами R_k , равными 0,075; 0,125; 0,15; 0,175 м; и стали Х18Н10Т с $R = 0,15 \text{ м}$. Скорость вращения изменялась в пределах 41,8...146 1/с, плотность теплового потока 30...450 кВт/м² при парообразовании дистиллированной воды. (атмосферное давление – 100°C и вакуум – 70°C).

Момент разрыва пленки фиксировали визуально при стробоскопическом освещении через окно в корпусе испарителя [1]. Эксперименты проводились следующим образом. После достижения стационарного режима при заданных значениях скорости вращения ω и плотности теплового потока q производилось снижение расхода жидкости до тех пор, пока на расстоянии 5...15 мм от края исследуемых дисков не начинали появляться первые сухие участки. Полученные таким образом значения расхода жидкости принимались за минимальные. Следовательно, в этом случае мы исследовали величину $\Gamma_{\min 2}$. Она наблюдается при снижении расхода жидкости. Последующее незначительное повышение расхода вновь вызывало полное покрытие поверхности дисков жидкостью. В дальнейшем величину $\Gamma_{\min 2}$ мы будем обозначать как Γ_{\min} , опуская индекс "2". Вычисление величины минимальной плотности орошения проводилось по зависимости

$$\Gamma_{\min} = G / (2\pi R) \quad (2)$$

где R – конечный радиус обогреваемых поверхностей дисков.

При вычислении G от замеренного ротаметром расхода отнималась величина равная массе испарившейся жидкости, найденная через известную подводимую тепловую мощность, поверхность диска и теплоту парообразования. Количество тепла, подведенного к поверхности нагрева находилось с учетом оттарированных потерь нижней части обогреваемого ротора. Количество переданного тепла мы находили также по расходу конденсата вторичного пара с учетом тепловых потерь Q_{n2} корпуса испарителя и трубопровода вторичного пара. Максимальное расхождение теплового баланса было не выше 6%.

В опытах величина недогрева жидкости до температуры насыщения Δt составляла 1...5°C. Учитывая, что при гравитационном течении Δt оказывает влияние на величину Γ_{\min} , мы провели исследование влияния недогрева жидкости на Γ_{\min} в центробежном испарителе. В исследованных пределах Δt опытами не обнаружено зависимости минимальной плотности орошения от Δt . Это объясняется тем, что разрыв пленки происходит на периферии дисков, где жидкость всегда приобретает температуру насыщения.

Наблюдения процессов разрыва пленки в условиях парообразования показали, что обычно нарушение сплошности пленочного течения происходило симметрично оси вращения дисков, однако в некоторых случаях симметрия нарушалась. Как выяснилось, это происходило тогда, когда вблизи места разрыва откладывался налет продуктов коррозии труб экспериментальной установки. В этом случае возникала тенденция к образованию разрывов в одном и том же месте. При появлении указанной тенденции мы производили очистку поверхности нагрева с последующей промывкой содовым раствором и дистиллированной водой. Коррозионный налет откладывается на поверхности лишь в той области, где имели место разрывы пленки (фото. рис.2).

Было изучено влияние условий подачи жидкости на теплообменную поверхность. Оказалось, что сильно разогретый медный диск $R=0,15$ м, температура поверхности которого была близкой к 140°C, можно было смочить тотчас же после подачи жидкости только максимально возможным в наших условиях расходом 45 г/с – $\Gamma=95$ г/(м.с). Попадая на горячую поверхность, жидкость дробилась на отдельные ручейки и капли, отдельные от поверхности диска паром; при этом имели место явления, аналогичные эффекту Лайденфроста. По истечению некоторого времени поверхность диска охлаждалась и проходило постепенное покрытие ее жидкой пленкой при значительно меньших величинах G_{ex} . Эти опыты показывают, что при выводе центробежного испарителя на рабочий режим следует первоначально обеспечить полное смачивание «холодной» поверхности при подаче жидкости в количествах, превышающих величину Γ_{\min} для изотермического течения жидкости [9].

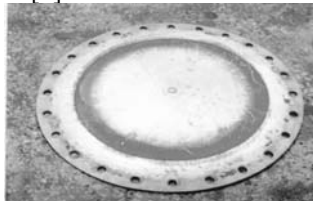


Рис. 1. Отложения солей на поверхности диска из нержавеющей стали в местах разрыва пленки

Установлено отсутствие существенного влияния на смачивание начального радиуса орошения диска при смещении сопла до 50 мм от центра вращения. Величина q при этом рассчитывалась по

смоченной поверхности. Учитывая полученные результаты, в дальнейшем все опыты проводились при подаче питательной жидкости в центр исследуемых дисков.

Результаты исследования. Характер разрыва жидкой пленки на вращающихся дисках определялся механизмом парообразования. При отсутствии пузырькового кипения сухие участки начинали появляться только на периферии дисков. С наступлением пузырькового кипения в периферийной зоне дисков наблюдались периодические исчезающие и появляющиеся разрывы пленки на значительно больших, чем при испарении, расстояниях от края дисков. Сухие участки имели вид длинных узких полос и занимали незначительную долю поверхности дисков. Установлено, что разрушение пленки в этом случае связано с процессом образования и роста паровых пузырьков. Начало пузырькового кипения приводило (рис.3) к некоторому повышению Γ_{min} , как и в работах Губенко И.П, Леончика Б.И. и Доманского И.В. при гравитационном течении. При дальнейшем увеличении тепловой нагрузки, когда наблюдалось образование большого количества пузырьков, степень влияния теплового потока на Γ_{min} снижается (рис. 3). Отмеченное явление объясняется перемешивающим воздействием паровых пузырьков, возникающих в более толстых пленках, что приводит к выравниванию температуры по сечению пленки и к соответственному снижению величины термокапиллярных сил как и при гравитационном течении у многочисленных авторов (Bresler, Hsu, Norman). На диске размером 0,075 м при $q=300$ кВт/м² и скорости вращения 73,2 1/с величина Γ_{min} была около 10 г/(м.с) – кипение с пузырьками, а при $q=460$ кВт/м² и скорости вращения 146 1/с – около 4 г/(м.с) – испарение с поверхности.

В опытах установлено, что увеличение скорости вращения в изученном диапазоне ω приводило к улучшению смачивания поверхностей дисков. Результаты автора отличаются от наблюдений [7], где имело место ухудшение смачивания с возрастанием ω , что объясняется тем что, автор имел электрический обогрев ротора центробежным термосифоном, а в [9] был паровой обогрев, при котором снижение ω приводило к снижению q .

В экспериментах на теплообменной поверхности из нержавеющей стали X18H10T имели место более низкое, чем на медной, значения Γ_{min} (рис. 3), что свидетельствует о значительной роли угла смачивания (измеренный нами в статических условиях угол смачивания капли холодной воды был для меди 66...88 (средний 74), а для нержавеющей стали 52...67 градусов (средний 59). В динамических условиях углы смачивания уменьшаются. В опытах получено, что характер влияния как скорости вращения, так и плотности теплового потока на Γ_{min} зависит от материала поверхности. Для меди при небольших q степень влияния ω была значительно меньшей, чем у стали X18H10T, а с увеличением q эта разница уменьшалась (рис.3).

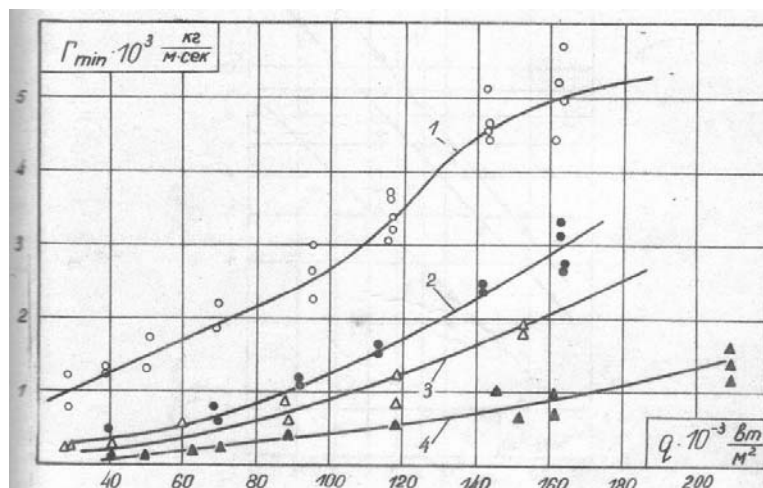


Рис. 2. Зависимость минимальной плотности орошения от тепловой нагрузки (Диск R =0,15м из стали X18H10T – вода, 100°C).
1 – $\omega = 41,8$; 2 – 73,2; 3 – 104,6; 4 – 146 1/с.

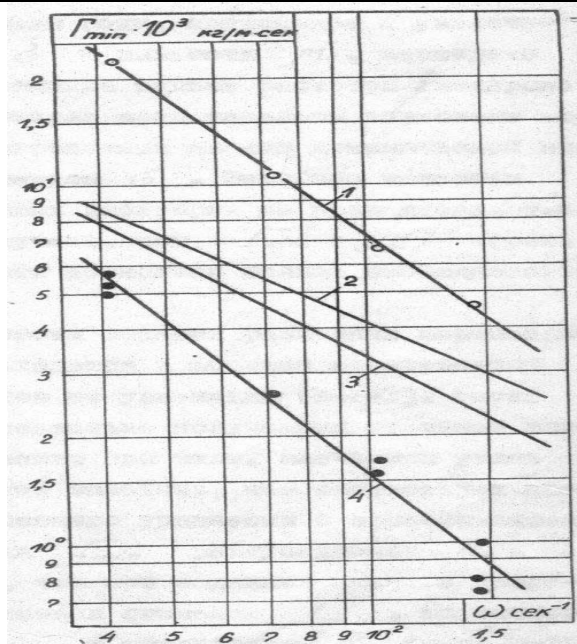


Рис. 3. Зависимость минимальной плотности орошения от скорости вращения и материала поверхности (Диск – $R=0,15$ м, вода; $t=100^{\circ}\text{C}$)
 $q = 150$ кВт/м²: Эксперимент: 1– медь; 4– сталь XI8NIOT.
 Расчет по (1): 2– $\theta = 5^{\circ}$; 3– $\theta = 2^{\circ}$.

Найденные в опытах закономерности влияния различных параметров (q, ω, θ, μ) на Γ_{\min} находятся в хорошем качественном согласовании с результатами расчетов по уравнению (1). Имеет место неплохое совпадение экспериментально полученных степеней влияния q и ω на Γ_{\min} с расчетными при малых значениях углов смачивания (рис.3), а степень влияния ω несколько больше чем у расчетных кривых. Степень влияния q фактически совпадает с рассчитанной по уравнению (1) при различных скоростях вращения. Следует заметить, что отсутствует даже качественное согласование теоретического уравнения с экспериментальными данными в характере влияния на Γ_{\min} радиуса дисков. Если из уравнения (1) следует, что при заданных ω с возрастанием R ($\omega^2 R$) будет наблюдаться снижение Γ_{\min} , то экспериментально получено повышение Γ_{\min} с увеличением R . Учитывая, что у вертикальной поверхности при течении пленки периметр есть неизменный, а у диска он растет пропорционально радиусу, следует вводить дополнительную зависимость от радиуса при определенном значении J . Нельзя моделировать процесс только по величине $J = \omega^2 \cdot R_k$, как принято нами в уравнении (1). Следовательно, для описания процессов разрыва жидкой пленки на вращающихся поверхностях необходимо дальнейшее уточнение теоретического соотношения и получение большего количества экспериментальных данных для обобщения с учетом более широкого изменения теплофизических свойств жидкостей.

Выводы

1. Теоретическое решение для гравитационных пленок верно отражает качественный характер влияния ускорения при замене его центробежным ускорением, а также влияние теплового потока и угла смачивания.
2. Абсолютные значения Γ_{\min} близки к расчетным только при расчетных углах смачивания ниже 5 градусов.
3. Экспериментально найдено дополнительное влияние радиуса диска помимо его наличия в центробежном ускорении: если при увеличении ускорения при постоянном радиусе Γ_{\min} снижается, то с возрастанием радиуса при постоянной скорости вращения минимальная плотность орошения возрастает.
4. Для получения расчетных зависимостей необходимы исследования на других жидкостях для учета влияния теплофизических свойств.

Література

1. Пуховой И.И. Исследование минимальной плотности орошения и теплоотдачи при парообразовании в пленке жидкости на вращающемся диске. Автореф. канд. дис. –Киев.– 1973.–26 с.
2. Butuzov A.I., Pukhovoy I.I. and Rifert V.G., Experimental Determination of the Minimum Irrigation Density in a Thin-Film Rotating Disk Apparatus// Fluid Mechanics—Soviet Research, vol. 5.– No. 1, Jan.–Feb.– 1976.– P. 41–46.
3. Руденок О.А. Зубрій О.Г. Дослідження гідродинаміки та теплообміну в роторно –плівковому апараті// Тези доп. семінару мол. учених каф. МАХНВ, НТУУ КПІ, 2008.–С.15–16.
4. Герасимчук О.В., Данілевський В.А., Ракицький В.А. Гідродинаміка тонкої плівки рідини в скляному роторно-плівковому апараті з шарнірним кріпленням фторопластових лопатей // Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – Київ : [б. и.], 2002. – 18 с. – Деп. 15.04.2002, №38–Ук2002. – Укр. – Б. ц.
5. Bryan C. Hoke Jr., John C. Chen Thermocapillary breakdown of subcooled falling liquid films// Ind. Eng. Chem. Res. –1992, V.31 (3), P. 688–694.
6. Zuber, N.; Staub, F. W. Stability of Dry Patches Forming in Liquid. Films Flowing Over Heated Surfaces. Int. J. Heat Mass Transfer. 1966, V.9 P.897–905.
7. Хикман К.Д. и др. – В сб.Опреснение соленых вод / / Под общ. ред. О.И.Мартыновой.– М.: Иностранная литература, 1963.– 344 с.