

О ВЫРОЖДЕНИИ РЕЖИМА ПУЗЫРЬКОВОГО КИПЕНИЯ
В УСЛОВИЯХ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

*Б. П. Авксентюк, Г. И. Бобрович, С. С. Кутателадзе
В. Н. Москвичева*

(Новосибирск)

Экспериментально исследовано явление вырождения пузырькового режима кипения в условиях естественной конвекции для щелочных металлов (калия, цезия) на рабочих участках диаметрами 14 и 11 мм в диапазоне давлений 0,04 ÷ 1,7 бар и для неметаллических жидкостей (этанол, бензол и четыреххлористый углерод) на рабочих участках диаметрами от 0,1 до 10 мм в диапазоне давлений 0,05 ÷ 2,5 бар. Определены области для тепловых потоков, при которых возникновение паровой фазы после однофазной естественной конвекции приводит к образованию устойчивой паровой пленки. Приведены также результаты скоростной киносъемки этого явления.

При исследовании теплоотдачи и критических тепловых потоков в неметаллических жидкостях, кипящих под вакуумом, рядом исследователей [1-4] наблюдалось вырождение режима пузырькового кипения, когда первое же возникновение паровой фазы после режима естественной конвекции без кипения приводило к формированию устойчивой паровой пленки, минуя режим пузырькового кипения. Обычно это происходило на рабочих участках малых диаметров (меньше 3 мм) и при низких давлениях (ниже 0,3 бар). Качественное объяснение этого явления связывают с увеличением размеров критических зародышей парообразования и большими отрывными диаметрами пузырей при пониженных давлениях [1-3]. Однако специальных исследований этого явления не проводилось.

При исследовании кипения цезия в условиях свободной конвекции было обнаружено явление вырождения режима пузырькового кипения для щелочных металлов [5, 6]. Переход от режима естественной конвекции к пленочному кипению, минуя режим пузырькового кипения, наблюдался до давлений ~ 1,7 бар.

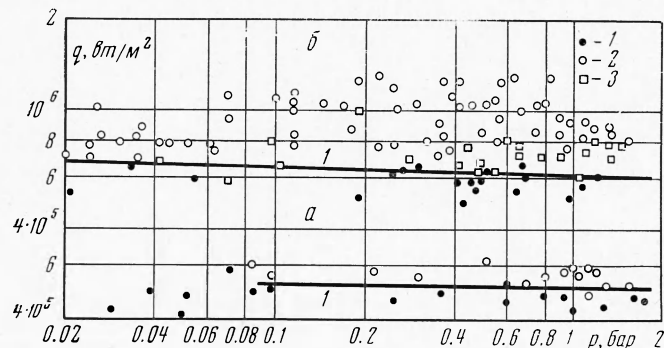
Ниже излагаются результаты экспериментального исследования этого явления с целью определения областей тепловых потоков, при которых возникновение паровой фазы после однофазной естественной конвекции приводит к образованию устойчивой паровой пленки на теплоотдающей поверхности.

Эксперименты с жидкими металлами проводились на установке, принципиальная схема которой и подробное описание приведены в работе [7]. Опыты с цезием проводились на рабочем участке из нержавеющей стали диаметром 11 мм, с калием — на рабочем участке диаметром 14 мм из молибдена. Чистота поверхности рабочих участков соответствовала примерно шестому классу. Объем, в котором осуществлялось кипение металла, просвечивался рентгеновскими лучами, а рентгеновское изображение переносилось на экран электронно-оптического преобразователя, с которого велись визуальные наблюдения исследуемых процессов. Опыты с неметаллическими жидкостями (бензолом, этанолом, четыреххлористым углеродом) проводились на установке, подробно описанной в [8], с тем лишь изменением, что рабочий объем помещался в термостат. Эксперименты проводились на горизонтально расположенных участках диаметром от 0,1 до 10 мм, теплоотдающая поверхность которых шлифовалась до чистоты, соответствующей десятому классу. Перед заполнением установки жидкостью рабочий объем и рабочий участок тщательно промывались. После заполнения установки рабочей жидкостью производилась ее дегазация. Обычной приработки рабочего участка не проводилось во избежание образования на поверхности устойчивых центров парообразования. Все измерения проводились при температуре насыщения. Питание рабочих участков осуществлялось постоянным током. Нагрузка на рабочий участок подавалась плавно. Образование паровой пленки фиксировалось по резкому увеличению температуры поверхности рабочего участка и визуально.

На фиг. 1 представлены результаты опытов с цезием (а) и с калием (б); 1 — переход от режима однофазной конвекции к неустойчивому кипению, 2 — переход от режима однофазной конвекции к пленочному кипению.

нию, 3 — переход к пленочному кипению после прекращения неустойчивого кипения.

На фиг. 2 нанесены экспериментальные данные для этанола на рабочем участке диаметром 10 мм (1 — переход к пузырьковому кипению, 2 — образование устойчивой паровой пленки, 3 — q^*) и диаметром 0.5 мм

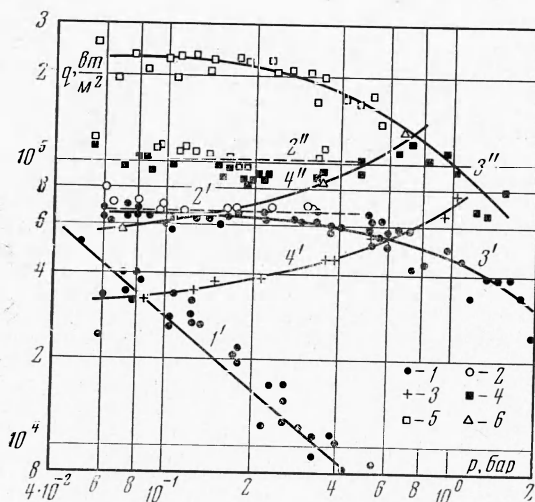


Фиг. 1

(4 — переход к пузырьковому кипению, 5 — переход к пленочному кипению, 6 — q^*). На «свежем» участке температурные перегревы жидкости, предшествующие образованию паровой фазы после однофазной естественной конвекции, были довольно низкими, и получался режим пузырькового кипения. Так, на фиг. 2 кривая 1' осредняет данные, полученные на свежем участке диаметром 10 мм.

Однако по мере проведения опытов перегревы, необходимые для вскипания, увеличивались (по-видимому, вследствие удаления остаточного газа из микроуглублений греющей поверхности), пока при достижении определенных тепловых потоков не стала образовываться за режимом однофазной естественной конвекции устойчивая паровая пленка.

Были получены значения для минимальных тепловых потоков, при которых возникновение паровой фазы после однофазной естественной конвекции приводило к образованию устойчивой паровой пленки (q^* (кривая 1 на фиг.



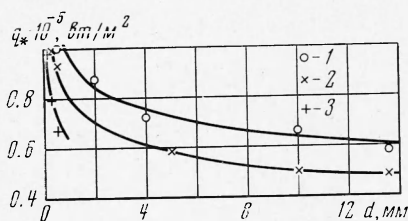
Фиг. 2

1, а, б, кривые 2', 2" на фиг. 2). Видно, что для этих кривых не обнаруживается существенной зависимости от давления как для щелочных металлов, так и для неметаллических жидкостей. Таким образом, при тепловых нагрузках $q < q^*$ возникновение паровой фазы переводило систему в режим пузырькового кипения и при $q > q^*$ — в режим пленочного кипения. С приработкой участка температуры стенки и, соответственно, тепловые потоки увеличивались, и расширялся диапазон давлений,

при которых происходил переход от однофазной естественной конвекции к пленочному кипению. Кривые 3' и 3'' на фиг. 2 осредняют экспериментальные данные, которые получены, когда дальнейшее время работы практически не сказывалось на измеряемых величинах.

В ходе экспериментов проводились также измерения тепловых потоков, при которых происходит разрушение паровой пленки q^* (кривые 4' и 4'' на фиг. 2). Из графиков видно, что при пониженных давлениях имеет место гистерезис — образование устойчивой паровой пленки после однофазной естественной конвекции происходит при больших тепловых потоках, чем ее разрушение. Для калия была замерена одна точка, соответствующая второй критической плотности теплового потока q^* ($2.4 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2$ при $p = 0.023 \text{ бар}$), которая также оказалась значительно ниже q_* . Таким образом, для каждого рабочего участка выявилась область,

ограниченная снизу значениями q_* (кривые 2' и 2'' на фиг. 2) и справа значениями q^* (кривые 4' и 4'' на фиг. 2), для тепловых потоков, при которых возникновение паровой фазы после однофазной естественной конвекции будет приводить к образованию устойчивой паровой пленки. Верхняя же граница определяется предельными перегревами жидкости у греющей поверхности. Образование паровой пленки за режимом однофазной естественной конвекции может происходить и при более высоких давлениях, но они гидродинамически неустойчивы ($q < q^*$) и по мере удаления от области устойчивых паровых пленок время их существования уменьшается.

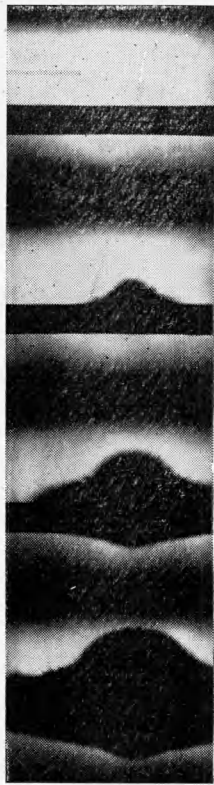


Фиг. 3

Аналогичные области для тепловых потоков, при которых возможно вырождение режима пузырькового кипения, определены на рабочих участках разных диаметров для бензола, четыреххлористого углерода, этанола. Во всех случаях кривые для q_* не обнаруживают существенной зависимости от давления. На фиг. 3 представлены значения q_* в зависимости от диаметра рабочего участка для этанола (1), бензола (2) и четыреххлористого углерода (3). Видно, что зависимости $q_* = f(d)$ оказываются идентичными для этих жидкостей: минимальный тепловой поток, при котором возможно вырождение режима пузырькового кипения, растет с уменьшением диаметра рабочего участка.

Образование паровой пленки после режима однофазной естественной конвекции при пониженных давлениях происходит взрывообразно, с характерным звуком, что, по-видимому, объясняется большими перегревами, предшествующими образованию паровой фазы. Так, для этанола на приработанном участке диаметром 4 мм температура в этом режиме составляла $\sim 160^\circ \text{ С}$, что соответствует давлению в равновесном зародыше пузыря перед его стремительным ростом $\sim 13 \text{ бар}$. Процесс образования паровой пленки после режима однофазной естественной конвекции происходит довольно быстро, и визуально уловить промежуточные этапы его развития невозможно. Так, для щелочных металлов в момент возникновения паровой пленки визуально регистрировали лишь мгновенное просветление всего просвечиваемого рентгеновскими лучами объема жидкого металла вокруг рабочего участка; это говорит об образовании большого количества паровой фазы, после чего температура стенки резко возрастала и отключалось питание рабочего участка. Визуальные наблюдения этого явления у неметаллических жидкостей регистрировали только наступление пленочного кипения.

Скоростные киносъемки позволили более детально проследить это явление. На фиг. 4 представлена серия последовательных фотографий, иллюстрирующих возникновение паровой фазы для бензола на поверхности рабочего участка диаметром 5 мм при $p = 0.15 \text{ бар}$ и $q = 0.9 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2$. На этих снимках светлое поле — жидкая фаза, темное поле — паровая фаза, темная полоса — рабочий участок. Интервал между кадрами $5 \cdot 10^{-4} \text{ сек.}$ Видно, как стремительный рост зародыша парообразования в каком-либо месте поверхности (место зарождения паровой фазы менялось в разных испытаниях) инициирует рост соседних зародышей в пристенном перегретом слое жидкости, вызывая цепной процесс кипения, распространяющийся на всю поверхность с большой скоростью. После быстрого роста парового облака и увеличения его до значительных размеров (за пределы кадра) происходит его уплотнение и некоторое уменьшение в объеме за счет слияния пузырьков пара и уменьшения жидких прослоек в паровом облаке. Остаточный слой жидкости на теплоотдающей поверхности вследствие изоляции от основной массы паровым облаком испаряется, и температура поверхности начинает быстро увеличиваться. Поэтому после отрыва сформировавшегося парового пузыря на поверхности устанавливается пленочное кипение. Длительность всего процесса от зарождения паровой фазы до установления пленочного кипения $\sim 0.1 \text{ сек.}$



Фиг. 4

Эксперименты показали, что явление вырождения режима пузырькового кипения может происходить при давлениях выше атмосферного. Например, для четыреххлористого углерода на рабочем участке диаметром 0.5 мм вырождение режима пузырькового кипения наблюдалось до давлений $\sim 2 \text{ бар}$, а для этанола на рабочем участке диаметром 4 мм образование гидродинамически неустойчивых пленок после однофазной конвекции происходило при давлениях $\sim 3 \text{ бар}$. Это, по-видимому, позволяет сделать вывод, что явление вырождения пузырькового режима кипения определяется не столько особенностями кипения, присущими глубокому вакууму, сколько особенностями образования паровой фазы в сильно перегретом пристенном слое жидкости (см. фиг. 4). Ранее такое явление для неметаллических жидкостей наблюдалось лишь при пониженных давлениях и на участках малых диаметров. Это объясняется тем, что при указанных условиях вследствие затруднения зародышеобразования легче достигнуть высоких перегревов ($\Delta T \geq \Delta T_*$), при которых возможно образование устойчивой паровой пленки, чем на участках больших диаметров и при более высоких давлениях. В последние годы рядом авторов

[9,10] при исследовании теплоотдачи при вынужденном течении щелочных металлов в трубах наблюдалось резкое ухудшение теплоотдачи, вызванное образованием паровой фазы после однофазной конвекции. Оба явления, по-видимому, имеют сходную физическую природу.

Поступила 30 VIII 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Van Stralen S. J. D. Heat transfer to boiling binary liquid mixtures at atmospheric and sub-atmospheric pressures. Chem. Engng Sci., 1956, vol. 5, pp. 290—296.
2. Lienhard J. H., S chrock V. E. The effect of pressure, geometry and the equation of state upon the peak and minimum boiling heat flux. Trans. ASME, Ser. C., J. Heat Trans., 1963, vol. 85, No. 3, pp. 261—272.
3. Rallis C. J., Jawrek H. H. Latent heat transport in saturated nucleate boiling. Internat. J. Heat Mass Trans., 1964. vol. 7, No. 10, pp. 1051—1068.

4. М а м о н т о в а Н. Н. Кипение некоторых жидкостей при пониженных давлениях. ПМТФ, 1966, № 3, стр. 140—144.
 5. Москвичева В. Н., Бобрович Г. И., Авксентюк Б. П., Мамонтова Н. Н. Исследование процесса кипения щелочных металлов. Препринт, Ин-т теплофизики СО АН СССР, Новосибирск, 1968.
 6. Бобрович Г. И. Критические тепловые потоки при кипении жидких металлов. Сб. «Пристенная турбулентность», Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1968.
 7. Bobrovich G. I., Avksentyuk V. P., Mamontova N. N. On the mechanism of boiling of liquid metals. Papers JSME, Semi — Internat. Sympos. Tokyo, 1967, vol. 2; Tokyo S. A., pp. 171—178.
 8. Бобрович Г. И., Гогонин И. И., Кутателадзе С. С., Москвичева В. Н. Критические тепловые потоки при кипении бинарных смесей. ПМТФ, 1962, № 4, стр. 108—111.
 9. Schleisiek K. Heat transfer and boiling during forced convection of sodium in an induction-heated tube. Nucl. Engng and Design, 1970, vol. 14, No. 1.
 10. Kottowski H. Über die Ausbildung einer Restschicht beim Sieden von Alkalimetallen in Kanälen. Atomkernenergie, 1970, Bd 15, Nr 2, S. 131—137.
-