

2. В у к а л о в и ч М. П., Н о в и к о в И. И. Техническая термодинамика. Госэнергоиздат, 1952.
3. Ч и р к и н В. С., Ю к и н В. П. Кризис теплосъема в потоке некипящей воды для кольцевого зазора. ЖТФ, 1956, № 7.
4. А л а д ъ е в И. Т., Д о д о н о в Л. Д., У д а л о в В. С. Критические тепловые нагрузки при течении воды в трубах. Атомная энергия, 1959, т. 6, № 1.
5. З е н к е в и ч Б. А., С у б б о т и н В. И. Критические тепловые нагрузки при вынужденном движении воды, не догретой до кипения. Атомная энергия, 1957, т. 4, № 8.
6. З е н к е в и ч Б. А. Критические тепловые нагрузки при вынужденном движении в трубах воды с ядром, не догретым до температуры насыщения в интервале давлений 100—210 атм. Атомная энергия, 1958, т. 4, № 1.
7. З е н к е в и ч Б. А., С у б б о т и н В. И., Т р о я н о в М. Ф. Критические тепловые нагрузки при продольном омывании пучков труб водой, не догретой до температуры насыщения. Атомная энергия, 1958, т. 4, № 4.
8. П о в а р н и н П. И., С е м е н о в С. Т. Исследование кризиса кипения при течении недогретой воды в трубах малых диаметров при высоких давлениях. Теплоэнергетика, 1959, № 4.
9. Д о р о щ у к В. Е., Ф р и д Ф. П. Исследование критических тепловых нагрузок от стенки к воде и влажному водяному пару при давлении 170 ата. Сб. под ред. Н. А. Доллежаля. Атомиздат, 1958.
10. М и р о п о л ь с к и й З. Л., Ш и ц м а н М. Е. Исследование температурного режима вертикальной парогенерирующей трубы при высоких давлениях. Сб. под ред. Н. А. Доллежаля, Атомиздат, 1958.
11. С т е р м а н Л. С., С т ю ш и н Н. Г. Исследование зависимости критических тепловых потоков от скорости циркуляции. ЖТФ, 1952, т. XXII, вып. 3.
12. Н о в и к о в И. И. Условия термодинамического подобия реальных веществ. Некоторые вопросы инженерной физики. Сб. трудов МИФИ. М., 1957.
13. Б о р и ш а н с к и й В. М. Учет влияния давления на теплоотдачу и критические нагрузки при кипении на основе теории термодинамического подобия. Госэнергоиздат. Сб. «Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных сред», 1961.
14. П о в а р н и н П. И. Расчет некоторых физических параметров теплоносителя методом термодинамического подобия. Теплоэнергетика, 1962, № 6.
15. О р н а т с к и й П. П. Влияние длины и диаметра трубы на величину критического теплового потока при вынужденном движении воды, не догретой до температуры насыщения. Теплоэнергетика, 1960, № 6.
16. О р н а т с к и й А. П., К и ч и г и н А. М. Критические тепловые нагрузки при кипении недогретой воды в трубах малого диаметра в области высоких давлений. Теплоэнергетика, 1962, № 6.
17. П о в а р н и н П. И. Исследование кризиса кипения при течении 96% этилового спирта в условиях недогрева. Теплоэнергетика, 1962, № 12.

## ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА КИПЕНИЯ ПРИ БОЛЬШИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКАХ ПОСРЕДСТВОМ КИНОСЪЕМКИ

Н. Н. Мамонтова

(Новосибирск)

Первые исследования механизма кипения посредством киносъемки были проведены 25—30 лет назад [1, 2] для тепловых потоков с малыми плотностями (с современной точки зрения).

В одной из последних работ Вествотера [3] с помощью скоростной киносъемки при атмосферном давлении исследовалось пузырьковое кипение метанола в случае больших тепловых потоков с интенсивностью  $q$  [ккал / м<sup>2</sup>час], примерно до критического значения  $q = q_*$ , при котором происходит смена пузырькового режима кипения пленочным режимом. Было обнаружено, что в этом случае величина отрывного диаметра парового пузыря  $D_0$  [мм], частота отрыва паровых пузырей  $u$  [сек<sup>-1</sup>] и скорость роста паровых пузырей  $D_{0u}$  [мм / сек] зависят от плотности теплового потока.

Подробное исследование механизма процесса кипения в движущейся недогретой жидкости было проведено Г. Г. Трещевым [4]. Были получены кривые распределения величин максимальных диаметров  $D$ , периодов образования пузырей  $\tau$  и число центров парообразования при изменении режима кипения. Однако перенести эти данные на кипение полностью насыщенной жидкости не представляется возможным.

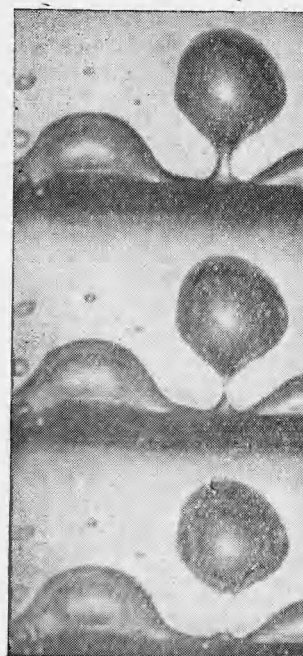
Ниже излагаются результаты первого этапа исследования механизма кипения насыщенной жидкости при свободной конвекции.

Опыты проводились на экспериментальной установке, принципиальная схема и описание которой даны в [5].

Рабочий участок изготавливался из фольги нержавеющей стали толщиной 0.1 мм; ширина рабочего участка 2 мм, длина около 40 мм. Нижняя сторона рабочего участка теплоизолировалась текстолитом, что исключало возможность образования пузырей на ней. Для уплотнения между текстолитом и нижней стороной рабочего участка применялась термостойкая резина. Резина и текстолит прижимались к нижней стороне фольги при помощи специальных винтов. Верхняя теплоотдающая поверхность участка шлифовалась пастой ГОИ.



Фиг. 1. Переходный режим при кипении этилового спирта. Тепловая нагрузка близка к критической,  $p = 1 \text{ атм}$



Фиг. 2. Пленочное кипение этилового спирта:  
 $q \approx 600\,000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$ ,  
 $p = 1 \text{ атм}$

Обогрев осуществлялся путем пропускания через фольгу электрического тока. Киносъемка процесса кипения производилась в проходящем свете в масштабе М 1:2. Смотровые окна сделаны из кварца. Скорости съемок от 1000 до 4000 кадров / сек. Применялись скоростные камеры: 16 мм — ЦЛ-16 и 35 мм — Пентацет-35.

Для определения значения отрывного диаметра  $D_0$  соответствующие кадры киносъемки просматривались на измерительном микроскопе и производился замер диаметра пузырька. Частота отрыва  $n$  определялась непосредственным установлением промежутка времени между отрывом одного пузырька и отрывом последующего на одном и том же месте.

Изучался процесс кипения воды и этилового спирта. При пузырьковом кипении воды под атмосферным давлением с ростом плотности теплового потока примерно до  $q = 100\,000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$  ( $\sim 0.1 q_*$ ) происходит постепенное увеличение числа центров парообразования до тех пор, пока вся поверхность не покроется пузырьками. С дальнейшим ростом теплового потока начинается слияние соседних пузырей, растущих на отдельных центрах парообразования. Подобное влияние тепловых потоков на картину пузырькового кипения воды наблюдается при всех исследованных давлениях от 1 до  $52 \text{ кг/см}^2$ .

В области, близкой к критическим тепловым потокам, наблюдается интенсивное и беспорядочное движение пара и жидкости около поверхности нагрева. Характерная фотография переходного режима при кипении этилового спирта приведена на фиг. 1. Поверхность нагрева отделяется от жидкости нестабильной пленкой пара, паровые пузыри образуются в результате разрыва пленки в случайных местах.

При дальнейшем увеличении теплового потока возникает устойчивое пленочное кипение. На фиг. 2 приведена фотография пленочного кипения этилового спирта: виден

волновой характер движения паровой пленки. На каждой длине волны образуются два ряда паровых пузырей, которые отрываются с определенной частотой.

Количественное изучение проводилось с целью определения статистических величин отрывных диаметров паровых пузырей  $D_0$ , их частоты отрыва от поверхности  $u$  и скорости роста  $D_0 u$  при пузырьковом кипении воды и пленочном кипении этилового спирта. Для определения среднестатистических величин  $D_0$  и  $u$  строились кривые распределения для каждого режима. Экспериментальные кривые распределения диаметра  $D_0$  близки к симметричной кривой, а кривые распределения частоты  $u$  отличаются от нормальной кривой распределения — среднее значение частоты  $u$  отличается от наиболее вероятного значения примерно на 20%. На фиг. 3 дано влияние теплового потока и давления на среднестатистические величины  $D_0$  и  $u$  при пузырьковом кипении воды, повышение теплового потока приводит к увеличению отрывных диаметров  $D_0$  при всех исследованных давлениях: частота отрыва  $u$  не меняется ни от теплового потока, ни от давления и примерно равна  $35 \text{ сек}^{-1}$  до  $20 \text{ кг/см}^2$ . При  $p = 52 \text{ кг/см}^2$  частота увеличилась до  $45 \text{ сек}^{-1}$ .

На фиг. 4 представлены результаты обработки фильмов с пленочным кипением этилового спирта при изменении давления от 1 до  $54 \text{ кг/см}^2$  ( $\sim 0.75 P_*$ ) при плотностях теплового потока  $q \approx 1.2 q_*$ . Как видно из графика, диаметр  $D_0$  уменьшается с ростом давления, частота  $u$  не меняется и остается примерно равной  $20 \text{ сек}^{-1}$  вплоть до давления  $p = 42 \text{ кг/см}^2$ , затем несколько увеличивается; величина  $D_0 u$  соответственно уменьшается.

Из полученных данных вытекает, что характер движения паровой фазы при пузырьковом кипении воды, нагретой до температуры насыщения, при больших тепловых потоках существенно отличается от того, что наблюдалось при тепловых потоках, меньших  $\sim 0.1 q_*$ . Происходит слияние и образование крупных пузырей, «клубов пара».

При околоскритических режимах кипения жидкостей обнаруживается сложная и неустойчивая гидродинамика двухфазного пограничного слоя. Значительно более упорядоченная гидродинамика в области устойчивого пленочного кипения.

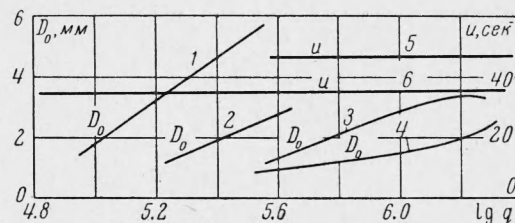
С ростом давления уменьшается скорость роста паровых пузырей  $D_0 u$ , т. е. качественно имеет место та же зависимость, что и при малых тепловых потоках. Однако в данном случае частота образования пузырей при  $q < q_*$  от давления или не зависит, или зависит слабо, а существенно меняется отрывной диаметр пузырей.

Частота образования и отрывные диаметры паровых пузырей с поверхности паровой пленки ( $q > q_*$ ) также зависят от давления и плотности теплового потока.

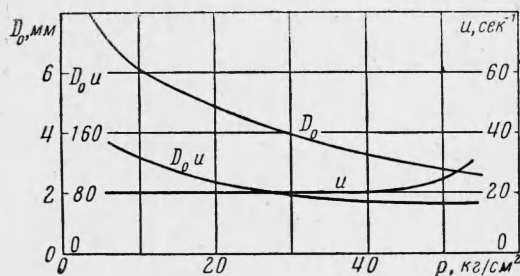
Поступила 25 XII 1962

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Fritz W., Ende W., Verdampfungsvorgang nach Kinematographischen Aufnahmen und Dampfblasen. Phys. Z., 1936, No. 11.
2. Зыкина-Моложен Л. М., Кутателадзе С. С. К вопросу о влиянии давления на механизм парообразования в кипящей жидкости. Ж. техн. физ., 1950, т. XX, вып. 1.
3. Perkins A. S., Westwater J. W., Measurements of Bubbles Formed in Boiling Methanol., A. I. Ch. E. Journal, 1956, vol. 2, No. 4.
4. Трещев Г. Г. Экспериментальное исследование механизма процесса поверхностного кипения. Теплоэнергетика, 1957, № 5.
5. Бобрович Г. И., Гогонин И. И., Кутателадзе С. С., Москвичева В. Н. Критические тепловые потоки при кипении бинарных смесей. ПМТФ, 1962, № 4.



Фиг. 3. Кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют давлениям  $p = 1, 11, 20, 52, 52 \text{ кг/см}^2$ ; кривая при  $p = 1 - 20 \text{ кг/см}^2$



Фиг. 4. Зависимость среднестатистических значений  $D_0$ ,  $u$  и  $D_0 u$  от давления при пленочном кипении этилового спирта