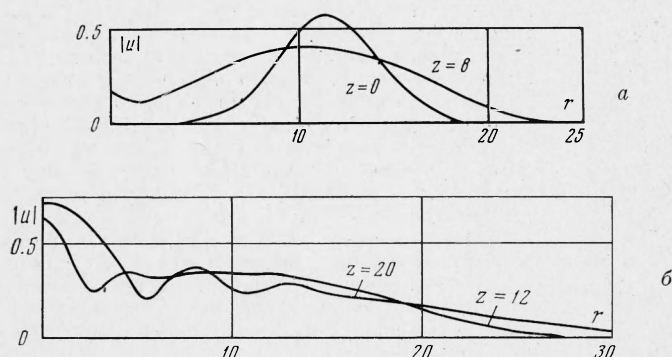


а передний фронт (направленный к оси пучка) становится круче. Картина кольцевого схлопывания пучка приведена на фиг. 5.

Исследовалось также влияние двухфотонного поглощения на распространение кольцевого пучка в кубической среде ($f_1 = \sigma |u|^2$, $f_2 = \chi |u|^3$). Как и следовало ожидать, поглощение препятствует схлопыванию пучка. Вместо этого наблюдаются затухающие осевые и радиальные осцилляции. С ростом χ частота радиальных колебаний уменьшается. В предельном случае большого поглощения наблюдается лишь один максимум на оси (фиг. 6, $\chi = 0.01$).



Фиг. 7, а, б

Что касается случая $\partial n/\partial E < 0$, то численные эксперименты подтверждают результаты работы [1] (см. фиг. 7, а, б; здесь $a_0 = 0.005$, $\alpha = 2$, $l = 4$, $r_0 = 10$, $P \approx 10 P_*$).

Авторы благодарны В. Е. Захарову за полезные обсуждения.

Поступила 28 V 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Аскаръян Г. А., Студенов В. Б. «Банановая» самофокусировка лучей. Письма ЖЭТФ, 1969, т. 10, вып. 3.
2. Ахманов С. А., Сухорукоев А. П., Хохлов Р. В. Самофокусировка и дифракция света в нелинейной среде. Усп. физ. н., 1967, т. 93, вып. 1.
3. Карпман В. И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. Новосибирск, Новосиб. гос. ун-т, 1968.
4. Соболев В. В., Сынах В. С. Численный эксперимент по самофокусировке электромагнитных волн в нелинейной среде. ПМТФ, 1969, № 6.
5. Захаров В. Е., Соболев В. В., Сынах В. С. Исследование поведения световых пучков в нелинейных средах. ЖЭТФ, 1971, т. 60, вып. 1.

УДК 536.423.1

ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ

С. С. Кутателадзе, Н. Н. Мамонтова

(Новосибирск)

Приводятся экспериментальные результаты по исследованию характера течения слоев жидкости, прилегающих к паровому пузырю, а также данные по мгновенным скоростям движения частиц жидкости около пузыря при его росте и подъеме. Визуализация движения жидкости осуществляется введением в поток твердых частиц — меток и их фотографированием скоростной кинокамерой.

Механизм теплообмена при пузырьковом кипении до сих пор далеко не ясен, несмотря на многочисленные исследования. Существенное для этого механизма соотношение между скрытой и конвективной составляющими теплового потока зависит от рода жидкости, давления, плотности теплового потока. Проблема эта может быть решена, если будет известно распределение температуры в пограничном слое пузыря и интенсивность перемешивания жидкости при движении пузыря у теплоотдающей поверхности.

В последние годы появились работы [1-3], в которых измеряются температурные поля в паровом пузыре и окружающей его жидкости. Представляет также значительный интерес выяснение характера течения жидкости в окрестности пузыря при кипении. Однако такие данные неизвестны.

Фотографировать частицы можно двумя способами:

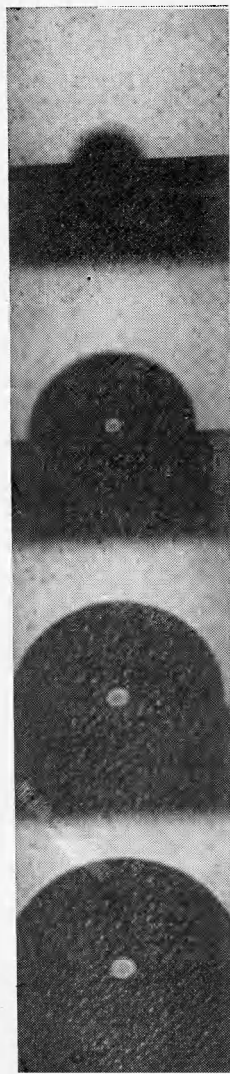
1) фотографирование на неподвижной пленке при импульсном боковом освещении, когда частицы изображаются в виде светящихся точек на темном фоне. Этот способ разработан В. В. Орловым [4] и назван методом стробоскопической визуализации потока;

2) фотографирование в проходящем свете, когда частицы изображаются в виде темных точек на светлом фоне. Здесь возможно применение скоростной киносъемки.

Для исследования обтекания пузыря жидкостью более целесообразно применение именно кинематографической съемки. Тогда можно проследить за процессом развития пузырей и получить данные по мгновенным скоростям, так как каждая частица, попавшая в кадр, является «датчиком скорости» в данной точке. Частицы, вводимые в поток в качестве «меток», должны достаточно точно следовать за движением окружающей их жидкости. В качестве твердых частиц — меток — были выбраны частицы ликоподия (форма их близка к сферической, арифметический средний диаметр $d = 22 \text{ мк}$ и удельный вес $\gamma = 9450 \text{ н/м}^3$). На основании расчетных рекомендаций [4] между такими параметрами, как скорость жидкости u_* , удельный вес жидкости γ_* , скорость, диаметр и удельный вес твердых частиц u_0 , d и γ_0 , обеспечивается выполнение условия $v_* \approx u_0$. Так как размер применяемых частиц весьма мал, необходимо вести фотографирование с увеличением.

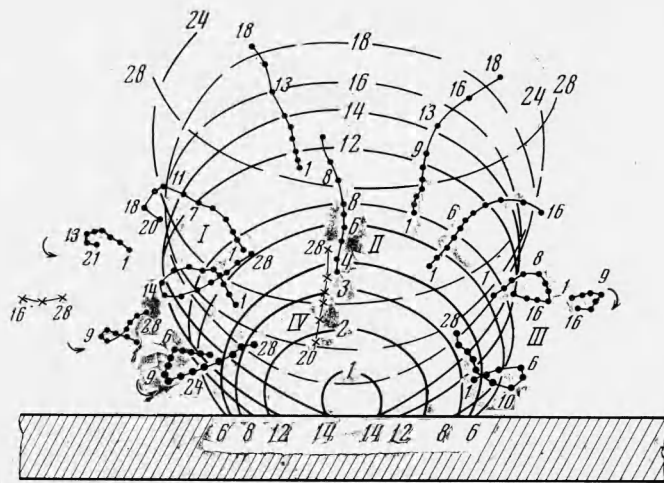
Киносъемка проводилась кинокамерой «Пентацет-35» со скоростью 1000—2000 кадр/сек через специально изготовленную фотонасадку, дающую увеличение до 4 раз.

В описываемых опытах проводились съемки процесса кипения воды при температуре насыщения на платиновой проволоке диаметром 0.5 мм и длиной 100 мм. В объем жидкости вводились частицы ликоподия нужной концентрации, предварительно смоченные в этиловом спирте. Конструкция установки и методика проведения опытов аналогичны тем, что описаны в [5]. Характер циркуляционных токов исследовался при давлениях $p = 1.0, 0.6$ и 0.4 бар . Обработка полученных фильмов производилась следующим образом. Пленка проектировалась с увеличением на экран, вычерчивались положение рабочего участка, граница пузыря и фиксировалось положение частиц относительно их. В результате последовательного совмещения кадров получается изображение пузыря на различных этапах роста или отрыва пузыря, а также траектории движения частиц. На фиг. 1 в качестве иллюстрации приведены фотографии роста парового пузыря при $p = 0.4 \text{ бар}$ и $q = 1 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2$. Видно, как частицы в виде темных точек разлетаются в радиальном направлении.

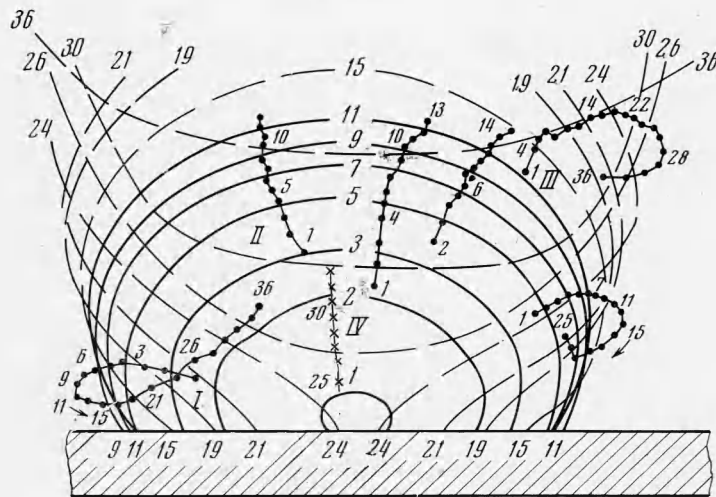


Фиг. 1

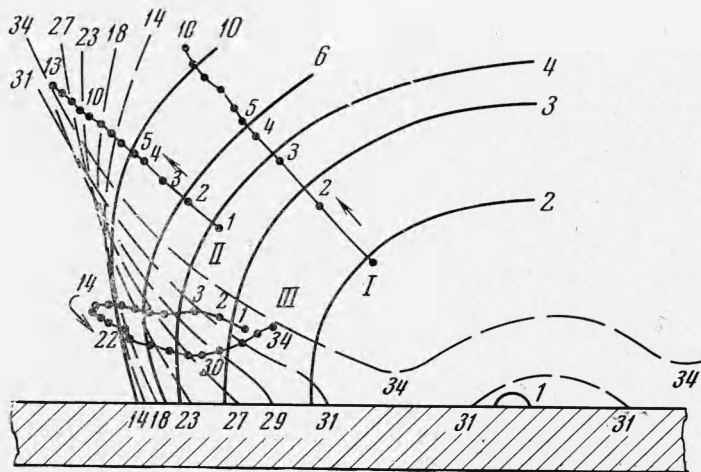
Результаты обработки картины перемещения частиц жидкости при росте и отрыве простых, изолированных пузырей (т. е. когда период выжидания достаточно велик и нет взаимного влияния соседних пузырей) при разных давлениях даны на фиг. 2 ($p = 1.0 \text{ бар}$, $q = 7.0 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2$), на фиг. 3 ($p = 0.6 \text{ бар}$, $q = 1.5 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2$), на фиг. 4 и фиг. 5 ($p = 0.4 \text{ бар}$, $q = 2.3 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2$). Цифры на траекториях и границе пузыря указывают порядковый номер кадра, например цифра 1 соответствует зарождению пузыря и началу отсчета движения частиц; интервал времени между кадрами $\Delta t = 5.5 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$ на всех фигурах. Из фиг. 2, 3, 4 видно, что при росте пузыря в начальный период частицы жидкости движутся в радиальном направлении от центра пузыря. После того как основание пузыря достигло максимального размера и пузырь вытя-



Фиг. 2

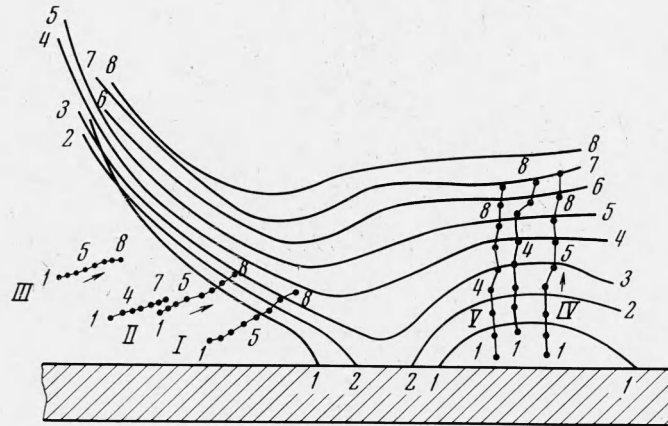


Фиг. 3



Фиг. 4

гивается в вертикальном направлении, происходит изменение направления движения частиц. Так, на фиг. 2 частицы, расположенные близко к поверхности (на расстоянии $\leq 0.5 \text{ мм}$), меняют направление в положении 6, на фиг. 3 — в положении 9, на фиг. 4 — в положении 14. При давлении $p = 0.4 \text{ бар}$ паровой пузырь не вошел целиком в кадр, поэтому на фиг. 4 показан рост, а на фиг. 5 — отрыв половины пузыря; отрыв

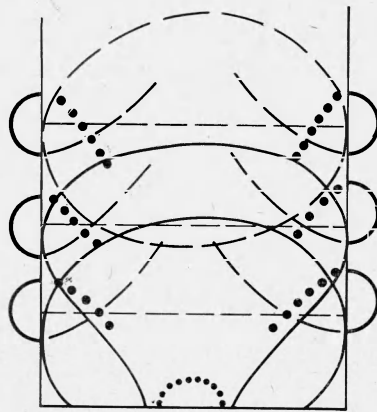


Фиг. 5

происходит по двум перешейкам. После поворота траектории частиц, который осуществляется во время сужения контактной площади пузыря, частицы жидкости устремляются за пузырь и продолжают движение за ним при его отрыве и подъеме (например, на фиг. 2 частица III в положении 12—28, на фиг. 3 частица I в положении 20—36, на фиг. 4 частица III в положении 27—34 и частицы I, II, III на фиг. 5). В кормовой области пузыря частицы перемещаются почти вертикально, на фиг. 2 и фиг. 3 — частицы IV и на фиг. 5 — частицы V.

Частицы жидкости, более удаленные от поверхности нагрева, испытывают изменение в направлении движения (завихренность) позднее, по мере подъема пузыря и приближения наибольшего сечения пузыря к уровню, на котором находятся частицы жидкости.

Характер движения слоев жидкости, прилегающих к пузырю, можно изобразить схематично так, как показано на фиг. 6, полагая для простоты, что диаметр пузыря не изменяется по мере его отрыва и подъема. Часть кривой, обозначенная точками, — путь, который проходят частицы жидкости в начальный момент времени при достижении пузырем наибольшей площади контакта. Сплошная линия — путь частицы при повороте и подтекане под пузырь при сужении контактной площади. Часть кривой, обозначенная пунктиром, соответствует движению за пузырем и увлечение ее в след.

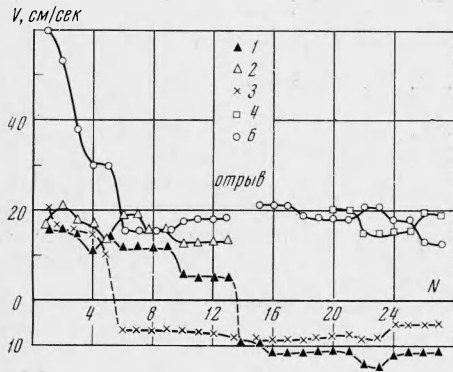


Фиг. 6

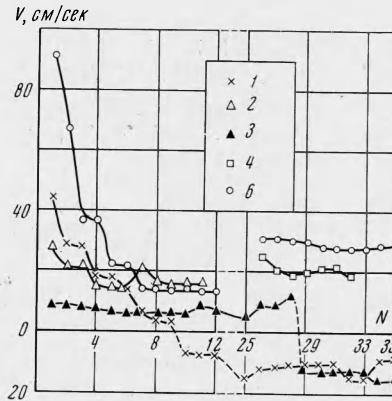
Расстояние между двумя соседними изображениями частицы дает возможность определить мгновенное значение линейной скорости $V = \Delta S / \Delta t n$ и две компоненты мгновенной скорости $V_x = \Delta x / \Delta t n$ и $V_y = \Delta y / \Delta t n$, где n — увеличение.

На фиг. 7, 8, 9, 10 приведены значения линейных мгновенных скоростей для частиц I, II, III, IV и V (на графиках это точки 1, 2, 3, 4, 5 соответственно), траектории частиц видны из фиг. 2, 3, 4, 5. Для сравнения дается значение мгновенной скорости роста парового пузыря в вертикальном направлении к поверхности $V^\circ = \Delta h / \Delta t n$ (точки 6 на графиках). Цифрами указан порядковый номер кадра.

При сравнении этих графиков видно, что наибольшие скорости движения частиц жидкости в окрестности пузыря наблюдаются в начальный период роста пузыря, причем скорости тем большие, чем ближе частицы расположены к границе пузыря. По мере снижения темпа роста пузыря уменьшаются скорости движения частиц.

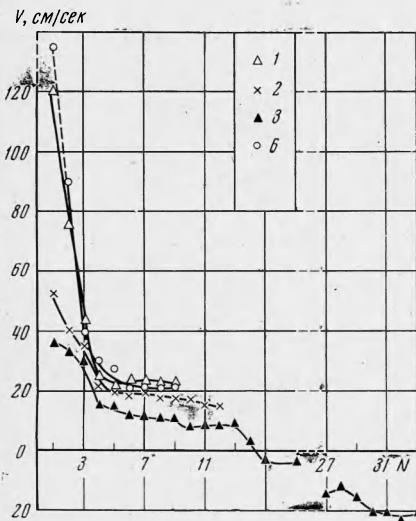


Фиг. 7



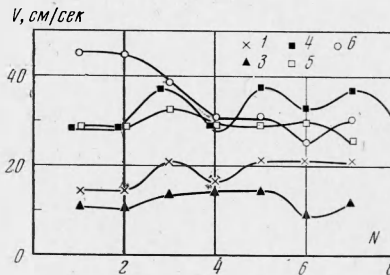
Фиг. 8

Для обработки брались частицы, близко расположенные к пузырю (на расстоянии 0.5—2.0 мм). После поворота траектории, когда частицы увлекаются пузырем



Фиг. 9

скорость их движения практически постоянная и слабо зависит от размера пузыря. Скорости частиц I и III на фиг. 7, 8, 10 лежат в пределах 10—20 см/сек. В следе оторвавшегося пузыря частицы движутся с постоянной скоростью, примерно равной скорости всплытия пузыря (частицы IV на фиг. 7, 8 и частицы IV и V на фиг. 10). При этом скорость всплытия пузыря имеет



Фиг. 10

слабую зависимость от давления, т. е. от размера пузырей, изменяясь от 20 до 35 см/сек. В опытах принимал участие А. А. Шабуров.

Поступила 18 VI 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Jacobs J. D., Shade A. H. Measurement of temperatures associated with bubbles in subcooled pool boiling. Trans. ASME, Ser. Heat Trans., 1969, vol. 91, No. 2.
2. Subbotin W. I., Sorokin D. N., Tsiganok A. A. Some problems on pool boiling heat transfer. Paris, Heat Trans., 1970, vol. 5.
3. Semeria R. Relationship between the structure of the two — phase layer near a heating wall and the mechanisms of thermal exchange. Intern. Summer School Heat and Mass Trans. in Turbulent Boundary Layer. Beograd, 1970, vol. 2.
4. Орлов В. В. Экспериментальное изучение пристенной турбулентности в канале. ПМТФ, 1966, № 4.
5. Мамонтова Н. Н. Кипение некоторых жидкостей при пониженных давлениях. ПМТФ, 1966, № 3.