

О ЗАВИСИМОСТИ КРИТЕРИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПУЗЫРЬКОВОГО
КИПЕНИЯ ОТ СЖИМАЕМОСТИ ПАРА

С. С. Кутателадзе, И. Г. Маленков

(Новосибирск)

Приводятся некоторые результаты экспериментального изучения движения пузырей и их деформации вблизи поверхности нагревателя при различных давлениях. Обнаружено, что газообразная среда в пузырях во время их роста находится в сжатом состоянии.

Обозначения:

R — радиус пузыря,	σ — коэффициент поверхностного натяжения,
R_h — максимальный радиус деформированного пузыря в горизонтальной плоскости,	p — давление,
R_v — минимальный радиус деформированного пузыря в вертикальной плоскости,	θ — краевой угол смачивания,
γ — удельный вес,	g — ускорение силы тяжести,
B — универсальная газовая постоянная,	V — объем,
	μ — молекулярный вес,
	C_T — изотермическая скорость звука.

Индекс " означает величины, относящиеся к газообразной среде, индекс ' — величины, относящиеся к жидкой среде.

Гидродинамика процессов кипения и барботажа жидкости газом, вдуваемым через пористую пластину, во многом аналогична. Принадлежность этих процессов к одному классу физически подобных явлений отмечалась в ряде как теоретических, так и экспериментальных работ [1-4]. В частности, было установлено, что величина критерия k , характеризующего предельные условия существования устойчивого пузырькового режима для разных жидкостей при барботаже, почти постоянна в случае вдува в них одного и того же газа. Наряду с тем было замечено, что значение этого критерия при барботаже какой-либо одной жидкости разными газами, существенно зависит от рода вдуваемого газа. Так, при вдуве в дистиллированную воду водорода, гелия, азота и аргона величина критерия k соответственно равна 0.05, 0.08, 0.16 и 0.20. Этот факт наводит на мысль, что вариации k определяются не только физическими свойствами кипящей жидкости, но и некоторыми свойствами пара, неучтенными [1] при выводе формулы для определения k .

В [4] было установлено, что погрешность, вносимая в определение величины k , происходит за счет неучета искажения формы пузыря. Если предположить, что степень нарушения сферичности пузыря пропорциональна изменению давления в нем, то из соотношения, определяющего давление пара в пузыре, которое связано с изменением кривизны поверхности раздела фаз, можно получить критерий вида

$$\Pi = \frac{p_0 - p''}{p_0} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{\gamma''}{\theta p_0} \left(\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}\right)^{1/2} \quad (1)$$

Зависимость $k = f(\Pi)$ вполне удовлетворительно обобщает экспериментальные данные как по барботажу, так и кипению [4].

Очевидно, что влияние свойств легкой фазы на величину k проявляется в пределах ограниченной по размерам пристенной области.

Из-за различной сжимаемости использованных газов весьма вероятно, что даже при равенстве размеров пузырей давление в них будет различно; это обстоятельство может оказать влияние на деформацию пузырей в процессе их генерации. В связи с этим было предпринято изучение движения пузырей у поверхности нагревателя и, в частности, нарушения их сферичности.

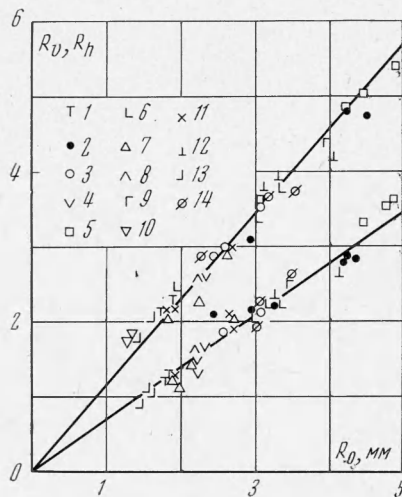
Эксперименты проводились на установке, позволявшей получать одиначные пузыри, рост и движение которых фиксировались скоростной (~ 1000 кадр/сек) кинокамерой. Для генерации пузырей использовались аргон, гелий и водород, которые вводились в жидкость через сменные сопла. Размеры отверстий (0.42, 0.92, 1.42 мм) выбирались из расчета получения пузырей с отрывными диаметрами, близкими к капиллярной постоянной, скорость всплытия которых не зависит от их размеров. Установка позволяла проводить опыты не только с газами, но и с собственным паром жидкости.

Для этой цели использовался специальный испаритель. Опыты проводились при давлениях от $9.8 \cdot 10^4$ до $400 \cdot 10^4$ н/м². Обработка полученных пленок производилась при помощи измерительного микроскопа УИМ-21.

При обработке киноматериала определялись следующие величины: изменение вертикального R_v^* и горизонтального R_h^* размеров, скорость движения кормовой и лобовой области пузыря. Измерения показали, что горизонтальный и вертикальный размеры пузыря независимо от рода вдуваемого газа меняются почти линейно со временем в противоположных направлениях. Кроме того, выяснилось, что независимо от природы газа в пузырях и их размеров, конечная деформация (максимальная величина горизонтального и минимальная величина вертикального размеров) такова, что всегда выполняется условие (фиг. 1)

$$R_h/R_v \approx 1.65 \quad (2)$$

При рассмотрении кинокадров было обнаружено, что деформация пузырей начинается с кормовой полусферы и протекает здесь более интенсивно, чем в лобовой. Измерения скоростей перемещения лобовой и кормовой поверхностей пузыря показали их существенное различие. На фиг. 2 для азота и гелия показаны графики изменения скоростей кормовой и лобовой точек пузыря от времени, прошедшего с момента его отделения от среза сопла. Как видно из фиг. 2, скорость лобовой точки практически постоянна, что соответствует результатам, полученным в [5].

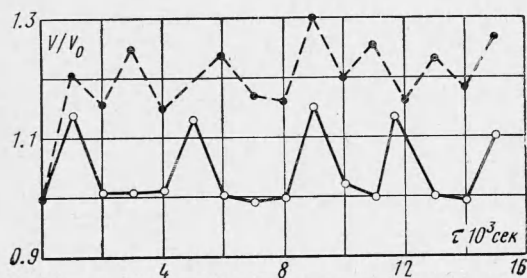


Фиг. 1. Максимальная деформация оторвавшихся пузырей. Точки 1, 2, 3, 4 — гелий соответственно при $p = 9.8, 78.5, 157$ и $400 \cdot 10^4$ н/м²; точка 5 — водород при $p = 9.8 \cdot 10^4$ н/м²; точки 6, 7, 8 — азот соответственно при $p = 9.8, 157, 400 \cdot 10^4$ н/м²; точки 9, 10, 11 — аргон соответственно при $p = 9.8, 108, 157 \cdot 10^4$ н/м²; точки 12, 13, 14 соответствуют парам ацетона, бензола и воды в собственных жидкостях при $p = 9.8 \cdot 10^4$ н/м²

Иначе обстоит дело с движением кормовой точки поверхности пузыря. Во время роста кормовая точка остается неподвижной и начинает движение лишь с момента разрыва «ножки», которая прикрепляет пузырь к устью сопла. С отделением пузыря от устья сопла скорость движения его кормы возрастает от нуля до некоторого максимума. Ускоренному движению кормовой точки, видимо, способствует быстрое уменьшение «ножки» пузыря, которая под действием сил поверхностного натяжения, быстро сокращается. Начальное движение кормовой точки происходит с большим ускорением (до $250-300 \text{ м/сек}^2$). Весь процесс первичной деформации пузыря протекает довольно быстро ($\sim 10^{-2} \text{ сек}$), поэтому можно полагать, что большая разница скоростей движения кормовой и лобовой полусфер должна приводить к сжатию газа в пузыре.

Для проверки этого предположения были выполнены тщательные покадровые измерения объемов пузырей с момента отрыва их от устья сопла. При помощи микроскопа УИМ-21, позволяющего производить измерения с точностью до 1 мк , фиксировались координаты контура поверхности пузыря.

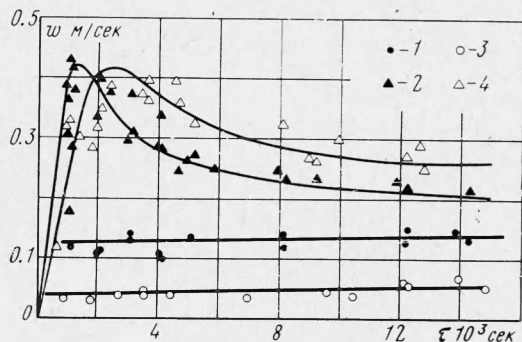
По полученным данным с увеличением до $100 \div 200$ раз профиль пузыря строился на миллиметровой бумаге. Затем производилось его рассеечение горизонтальными линиями на такое число плоских дисков, чтобы из отрезка контура пузыря на каждом диске получить практически прямую линию. Общий объем пузыря получался как сумма объемов «блинов» (в плане пузыря принимались за круг, что подтверждено киносъемкой).



Фиг. 3. Изменение объема пузырей во времени при $p = 9.8 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2$;

чески претерпевает сжатие и расширение, т. е. совершает колебательные движения. Любопытно, что объем водородного пузыря после отрыва от сопла не возвращается к исходной величине, а колеблется около нового объема, увеличенного примерно на 20% по сравнению с отрывным объемом. Объем азотного пузыря в отличие от водородного испытывает нерегулярные колебания, большую часть времени его текущий объем равен объему отрывного пузыря.

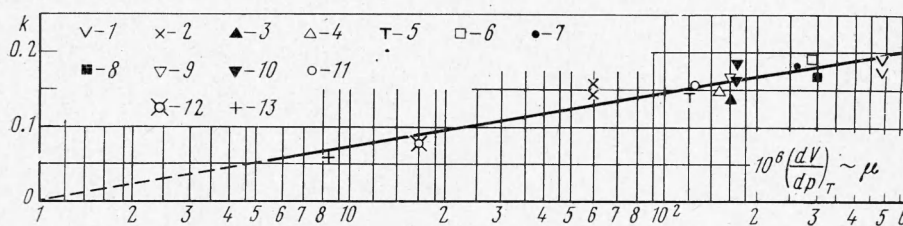
Из дополнительных опытов было установлено, что отрывной объем пузыря увеличивается с уменьшением молекулярного веса μ вдуваемого газа (при прочих равных условиях). Время роста пузырей до отрывных размеров также увеличивается с уменьшением молекулярного веса газа.



Фиг. 2. Изменение скорости лобовой (точки 1, 3) и кормовой (2, 4) точек пузыря в начале свободного движения; 1, 2 — гелий в воде, 3, 4 — азот в воде

Однако увеличение времени роста пузырей непропорционально росту объемов отрывающихся пузырей. Так, объем пузырей водорода больше объема пузырей аргона в 2.76 раза, тогда как время их роста превышает время роста аргоновых пузырей всего лишь в 1.7 раза. Это значит, что пузыри водорода растут быстрее по сравнению с пузырями аргона, и поэтому газ в них должен быть сильно сжат еще во время роста (чему способствует большая сжимаемость водорода). В связи с этим окончательное достижение равновесного объема (дорасширение газа) происходит после завершения роста и отделения пузыря от устья сопла.

Во время расширения потенциальная энергия сжатого газа превращается в кинетическую энергию движения частичек окружающей жидкости и слагается с энергией, передаваемой жидкости поступательным движением пузыря как целого.



Фиг. 4. Зависимость критерия k от сжимаемости газообразной среды при $p = 9.8 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2$ и $T = \text{const}$; точки 1 — четыреххлористый углерод, 2 — вода, 3 — этанол, 4 — метанол, 5 — ацетон, 6 — пентан, 7 — бензол, 8 — гептан, 9 — пропан, 10 — аргон-вода, 11 — азот-вода, 12 — гелий-вода, 13 — водород-вода

Таким образом, при деформации пузырей, сопровождающейся сжатием заключенного в них газа, совершается работа, величина которой (при прочих равных условиях) зависит от упругости данной газообразной среды, и, следовательно, должна существовать некоторая связь величины k со сжимаемостью газообразных сред. Такая закономерность представлена на фиг. 4, где опытные значения k для ряда жидкостей даны в виде зависимости от сжимаемости газов, представленной производной $(dV/dp)_T$ при одном и том же среднем давлении. В полулогарифмических координатах эта зависимость имеет линейный характер.

Для обобщения всех экспериментальных данных по кризисам кипения, координата $(dV/dp)_T$ была приведена к безразмерному виду по параметру

$$\gamma'' \Delta p'' \sim \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \frac{\gamma''^2}{\gamma' - \gamma''} \quad (3)$$

Выбор (3) в качестве масштаба давления обусловлен тем, что внешнее статистическое давление p_0 входит как составная часть в суммарное давление, существующее внутри пузырей, и поэтому, являясь величиной постоянной, не отражает изменений, происходящих в паровой фазе при деформации пузырей. Часть же общего давления в пузыре, которая обусловлена изменением кривизны поверхности раздела фаз, различна по величине, зависит от свойств газообразной среды, поэтому может служить мерой энергии, израсходованной на сжатие содержимого пузыря.

В результате приведения производной $(dV/dp)_T$ к безразмерному виду можно получить модификации безразмерного параметра Π , содержащие вместо второго множителя в (1) величины $\mu/\theta VT$ или $g/\theta c_T^2$. Первая из них указывает, что физическим свойством газообразной среды, ответственным за величину вариации k , является молекулярный вес. Второй

вариант свидетельствует о том, что динамическое воздействие молекулярного веса газа на жидкие прослойки пристенного двухфазного слоя проявляется через изотермическую скорость распространения звука в паровой среде.

Поступила 19 I 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. К у т а т е л а д з е С. С. Гидродинамическая теория изменения режима кипения жидкости при свободной конвекции. Изв. АН СССР, ОТН, 1951, № 4.
2. W a l l i s G. B. Some hydrodynamic aspects of two-phase flow and boiling. Internat. Developm. in Heat Trans., pt 2, N. Y., ASME, 1961.
3. К у т а т е л а д з е С. С., М а л е н к о в И. Г. Экспериментальное исследование аналогии процессов кипения и барботажа. ПМТФ, 1966, № 2.
4. М а л е н к о в И. Г. О роли газообразной среды в механизме кризиса кипения при естественной конвекции. Теплофизика высоких температур, 1968, т. 6, вып. 2.
5. C o l e R. A photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux. Amer. Inst. Chem. Engng Journal, 1960, vol. 6, No. 4.