

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГИИ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ И БАРБОТАЖА

С. С. Кутателадзе, И. Г. Маленков

(Новосибирск)

В работах [1, 2] отмечалось, что кризис кипения жидкостей обусловлен гидродинамическими причинами и в этом смысле должен иметь общую физическую природу с явлением кризиса барботажа (потерей устойчивости динамического двухфазного слоя). В работе [3] показано, что развитие процесса барботажа газа через жидкость при визуальном наблюдении протекает аналогично развитию процесса кипения, а именно, в пристенной области наблюдаются последовательно пузырьковый, развитой и пленочный режимы.

Первые результаты наших экспериментов по непосредственной количественной проверке этой аналогии были опубликованы в [4].

Изложенные ниже исследования выполнены на установке, отличавшейся от описанной в [4] лишь тем, что рабочий сосуд позволял проводить опыты при повышенных давлениях. Было использовано шесть жидкостей (дистиллированная вода, этиловый и метиловый спирты, бензол, ацетон, четыреххлористый углерод) и четыре газа (водород, гелий, азот и аргон).

В экспериментах выяснялась зависимость критерия гидродинамической устойчивости двухфазного граничного слоя от конкретных условий протекания процесса барботажа. Полученные результаты сопоставлялись с данными по критическим режимам при кипении. Одновременно изучалось насыщение граничного слоя газом при барботаже и паром при кипении.

Определение критических режимов производилось по изменению электрического сопротивления граничного двухфазного слоя при барботаже и кипении электропроводящих жидкостей и по изменению зависимости объемного расхода газа от перепада давлений в системе пористая пластина — граничный слой при барботаже неэлектропроводных жидкостей [3].

Измерение электрического сопротивления двухфазного граничного слоя позволяет получить данные о степени насыщенности его газом или паром и выяснить закономерности изменения газо-(паро)-содержания.

Обозначения

γ — удельный вес, σ — поверхностное натяжение, r — скрытая теплота парообразования, q — удельный тепловой поток, w — приведенная скорость, n — число центров парообразования, F — поверхность, ϕ — газосодержание,	p — давление, R — радиус пузыря, μ — молекулярный вес газа, B — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура, I — сила тока, идущего через граничный слой.
--	---

Индексы означают: ' — величины, относящиеся к жидкости; '' — величины, относящиеся к пару (газу); * — критические значения; 0 — начальное значение.

Вычисление значений критерия гидродинамической устойчивости по опытным данным производилось по формулам С. С. Кутателадзе

$$k = \frac{w_*'' \sqrt{\gamma''}}{[g^2 \sigma (\gamma' - \gamma'')]^{1/4}} \quad (\text{при барботаже}) \quad (1)$$

$$k = \frac{q_*}{r \sqrt{g \gamma''} [\sigma (\gamma' - \gamma'')]^{1/4}} \quad (\text{при кипении})$$

Газо-(паро)-содержание в граничном слое вычислялось по формуле

$$\phi = 1 - \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

Первая серия опытов проводилась при атмосферном давлении. При этом, в случае барботажа был использован газообразный азот при 18—20° С.

Измерения газосодержания в граничном слое позволили обнаружить, что при кипении и барботаже существуют две стадии насыщения.

В первой стадии пузыри образуются и всплывают в жидкости без заметного взаимодействия друг с другом, а газосодержание существенно изменяется с нагрузкой [4]. Эта область (область свободного всплывания пузырей), независимо от давления, ограничена приведенными скоростями легкого компонента $w'' \approx 0.10-0.15$ м / сек. При этой нагрузке газосодержание граничного двухфазного слоя достигает своего

максимального значения. Вторая стадия насыщения граничного слоя газом (паром) представляет собою область интенсивно взаимодействующих пузырей. Газосодержание в этой области при увеличении нагрузки претерпевает незначительные изменения, которые не превышают 15%.

Вычисления показывают, что величина газосодержания определяется соотношением

$$\Phi = \frac{\pi}{6} \frac{n}{F} D_0^2$$

Здесь n/F — удельная плотность центров — источников пузырьков, D_0 — диаметр пузырей.

В области свободного движения пузырей величина газосодержания определяется значением n/F , так как здесь $D_0 = \text{const}$. В области интенсивного взаимодействия пузырей, определяющей величиной является диаметр пузырей, поскольку $n/F \approx \text{const}$.

Опыты позволили установить, что при повышении давления характер насыщения граничного слоя сохраняется, но происходит сокращение размеров области интенсивного взаимодействия пузырей, т. е. уменьшение величины критической скорости газообразной фазы (изменение w_{*} происходит по гиперболическому закону, в соответствии с теорией).

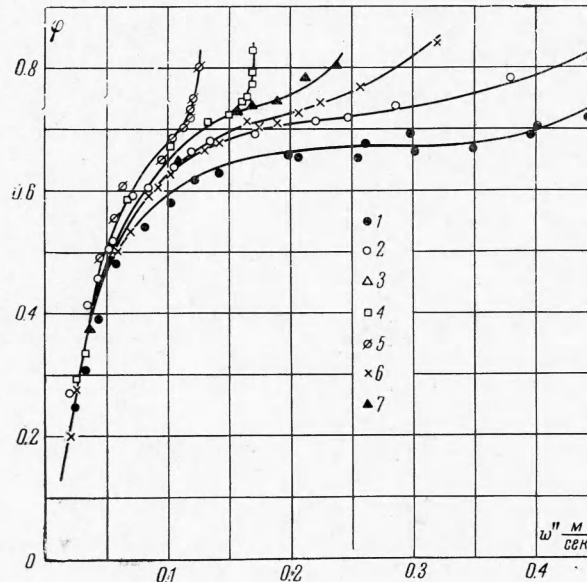
На фиг. 1 показаны кривые изменения газосодержания с увеличением нагрузки для разных давлений при барботаже дистиллированной воды азотом. Видно, что величина газосодержания во второй области для разных давлений различается не очень сильно. В силу этого критическое значение газосодержания Φ_* остается постоянным и с давлением не меняется. Опыты показывают, что эта величина не зависит также ни

от рода барботирующего газа, ни от рода барботируемой жидкости. На фиг. 2 приведены данные критической величины газосодержания для двух различных жидкостей, которые барботировались четырьмя различными газами. Здесь же приведены опыты по кипению этилового спирта и дистиллированной воды.

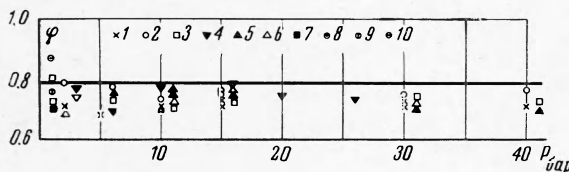
Обработка опытных данных по измерению критических режимов кипения и барботажа показала, что критерий устойчивости k для всех исследованных

пар газ — жидкость имеет при барботаже значение $k = k_1$, близкое к его значениям $k = k_2$ при кипении этих жидкостей (см. таблицу).

В случае барботажа газа через пористую пластину наступление кризиса, т. е. перестройка структуры граничного слоя, происходит при нулевой разности температур поверхности пористой пластины и жидкости. Тем не менее, величины критерия устойчивости как для кипения, так и барботажа практически совпадают. Следовательно, можно утверждать, что и при кипении температура поверхности не является определяющей величиной. Напротив, уровень температуры поверхности нагрева является прямым следствием интенсивности охлаждения, т. е. интенсивности движения жидкости. Нарушение гидродинамических условий теплоотвода от поверхности нагрева, существующих при пузырьковом кипении, влечет за собою аккумуляцию тепла пластиной и вызывает ее разогрев. При вдуве различных газов (водород, гелий,



Фиг. 1. Характер изменения газосодержания от нагрузки; точки соответствуют давлению: 1 — 58.7, 2 — 108, 3 — 157, 4 — 304, 5 — 402 [10^4 Н/м^2]



Фиг. 2. График $\Phi_* = f(p)$ для кипения и барботажа. Барботаж воды при $9.8 \cdot 10 \text{ Н/м}^2$; точки соответствуют: 1 — N, 2 — Ar, 3 — He, 4 — H, 5 — Ar, 6 — N, 7 — He с этанолом. Кипение; точки соответствуют: 8 — вода, $9.8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; 9 — этанол, $9.8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; 10 — этанол, $9.8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$

азот, аргон) в одну и ту же жидкость при постоянном давлении обнаруживается зависимость критерия гидродинамической устойчивости от природы барботирующего газа и барботируемой жидкости.

Аналогичная зависимость отмечалась в работе [5], в которой для пары азот — вода было определено значение $k = 0.10$ и для пары аргон — вода — $k = 0.21$. Поскольку

Таблица

	k_1	k_2
Дистилат	0.161	0.156
	0.166	0.165
	0.158	0.177
Метилловый спирт	0.142	0.145
	0.139	0.158
	0.145	0.148
Этиловый спирт	0.142	0.130
	0.136	0.141
	0.139	0.145
	0.140	0.155
Ацетон х. ч.	0.154	0.150
	0.158	0.137
	0.156	—
Бензол	0.163	0.176
	0.166	—
CCl ₄	0.177	—
	0.173	0.190

физические свойства газов различаются удельным и молекулярным весами, то для выяснения физического свойства газа, с изменением которого наблюдаются вариации величины k , была выполнена вторая серия опытов при повышенных давлениях (до 40 бар).

Результаты экспериментов с дистиллированной водой представлены на фиг. 3. Видно, что критерий устойчивости при барботаже, как и при кипении, не зависит от давления, следовательно — и от удельного веса¹ газа, если последний меняется посредством давления. Видно, однако, что различия величины критерия гидродинамической устойчивости для разных газов сохраняются.

Таким образом, вариации k связаны не с изменением удельных весов, а с некоторыми другими физическими свойствами пары газ — жидкость (молекулярный вес, скорость молекул, размер молекул).

На фиг. 4 приведены экспериментальные значения

$$w_*'' = f(\theta), \quad \theta = \left(\frac{g^2 \sigma (\gamma' - \gamma'')}{\gamma''^2} \right)^{1/4}$$

Тангенс угла наклона осредняющей линии представляет собою величину критерия гидродинамической устойчивости и оказывается равным 0.16. Из фиг. 4 видно, что от среднего значения наблюдаются отклонения опытных

данных как при кипении, так и при барботаже различных систем, не превышающих, однако, 10—15%.

Принимая во внимание отмечавшуюся выше аналогию процессов кипения и барботажа, можно полагать, что наблюдаемые вариации критерия гидродинамической устойчивости при кипении разных жидкостей, так же как и при барботаже жидкости различными газами обусловлены одинаковыми причинами, т. е. факторами, непосредственно связанными с молекулярным весом пара, заключенного в пузыре.

В формуле (1) для вычисления критерия устойчивости лапласовское давление учитывается непосредственно, поэтому имеет смысл рассмотреть возможность влияния вариаций томпсоновской разности давлений

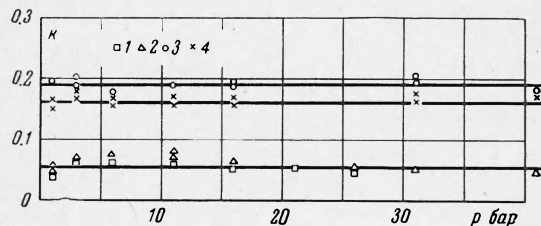
$$\Delta p'' \sim \frac{\sigma}{R} \frac{\gamma''}{\gamma' - \gamma''}$$

возникающих из-за отклонения формы пузыря от сферической. Тогда влияние изменений этой величины должно зависеть от абсолютного уровня давления, т. е. можно ввести параметр

$$\Pi = \frac{\Delta p''}{p} \sim \frac{\gamma''}{p} \left(\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''} \right)^{1/2}$$

Обработка опытных данных по барботажу газов через пористую пластину, а также данных по кипению, полученных разными авторами (Е. А. Казакова, В. Г. Морозов,

¹ Наблюдается некоторая зависимость от давления в случае барботажа водорода и гелия. Но, принимая во внимание, что в реальных кипящих системах столь низких значений γ''/γ' практически не имеется, допустимо на данном этапе работы не акцентировать внимание на этом факте.



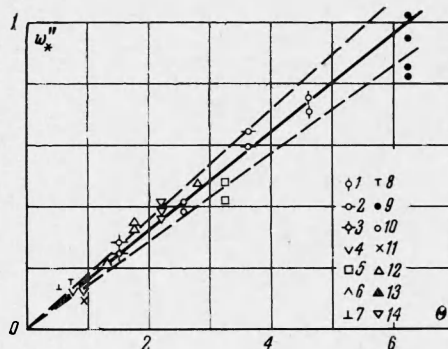
Фиг. 3. Зависимость критерия устойчивости k от давления p для дистиллированной воды; точки соответствуют 1 — Н, 2 — He, 3 — Ar, 4 — N

Г. И. Бобрович) в широком диапазоне давлений (до $206 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$) показана на фиг. 5. Как видно, все точки по кипению и барботажу удовлетворительно группируются вокруг прямой

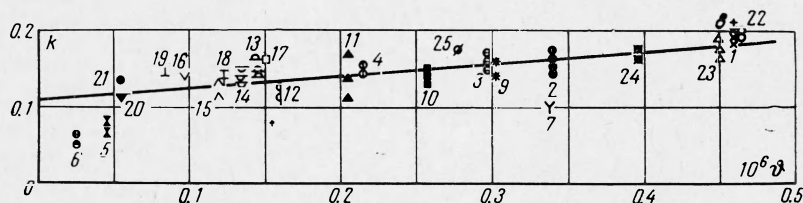
$$k = 0.11 + 1.58 \cdot 10^5 \vartheta \left(\vartheta = \frac{\gamma''}{p} \left(\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''} \right)^{1/2} \right) \quad (3)$$

Здесь p берется в Н/м^2 , а γ — в Н/м^3 .

Фиг. 4. График $w_*'' = f(\vartheta)$
 Барботаж; точки соответствуют: 1, 2, 3, 4 — вода-азот ($9.8, 19.6, 98, 392$) $\cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; 5, 6, 7 — этанол-аргон ($9.8, 49, 294$) $\cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; 8 — вода-аргон $294 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$.
 Кипение; точки соответствуют: 9 — вода, $9.8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; 10 — этанол, $9.8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; 11 — метанол $9.8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; 12 — пентан $9.8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; 13 — гептан $9.8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; 14 — бензол $9.8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$.



Заметное отклонение от общей закономерности, как и прежде (фиг. 1), обнаруживают опыты по барботажу дистиллированной воды гелием и водородом.



Фиг. 5. Зависимость $k = f(\vartheta)$ согласно (3)
 Барботаж; точки соответствуют: 1 — аргон-вода; 2 — азот-вода; 3 — аргон-этанол; 4 — азот-этанол; 5 — гелий-вода; 6 — водород-вода; 7 — азот-жидкость [5]; 8 — аргон-жидкость [5]; 9 — воздух-вода [7].
 Кипение; точки соответствуют: 10, 11 — этанол ($9.8 \cdot 10^4, 9.8 \cdot 10^4$) Н/м^2 ; 12, 13, 14, 15, 16 — метанол ($98, 196, 294, 392.5, 588$) $\cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; 17, 18, 19, 20, 21 — вода ($9.8, 440, 540, 1860.5, 2060$) $\cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; 22 — пентан $9.8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; 23 — бензол $9.8 \cdot 10^4$; 24 — пропан $9.8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$; 25 — гептан $9.8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$.

В меру применимости уравнения Клапейрона зависимость (3) может быть представлена в виде

$$k = 0.11 + 1.58 \cdot 10^5 \frac{\mu}{BT} \left(\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''} \right)^{1/2} \quad (\mu — молекулярный вес газа) \quad (4)$$

Из соотношения (4) очевидна наблюдающаяся в экспериментах независимость критерия гидродинамической устойчивости от давления. Из (4) видна также независимость k от вязкости жидкости.

Поступила 20 VII 1965

ЛИТЕРАТУРА

- Кутателадзе С. С. Гидродинамическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости, при свободной конвекции. Ж. техн. физ., 1950, № 11.
- Кутателадзе С. С., Москвичева В. Н. О связи гидродинамики двухкомпонентного слоя с теорией кризисов в механизме кипения. Ж. техн. физ., 1959, № 9.
- Wallis G. V. Some hydrodynamic aspects of two-phase flow and boiling. Internat. developments in heat transfer, part 2, 1961.
- Маленков И. Г. Критические явления в процессах барботажа и кипения. ПМТФ, 1963, № 6.
- Spalding D. V., Duffield P. Z. Diffusion-controlled electrolysis with gas injection through the porous electrode (Докл. на II Всесоюз. конф. по массовому теплообмену, 1964).
- Борисанский В. М. О критериальной формуле для обобщения опытных данных по прекращению пузырькового кипения в большом объеме жидкости. Ж. техн. физ., 1956, т. 24, № 2.
- Sims G. E., Aktürk U., Evans K. O. Sutterdt. Simulation of pool boiling transfer by gas injection at the interface. Internat. J. heat and mass transfer, 1963, No. 3.