

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

С. С. Кутателадзе, И. Г. Маленков, С. Л. Витковский, Эффект оттеснения жидкости газом при вдуве через пористую пластину при низких давлениях, *ТВТ*, 1979, том 17, выпуск 2, 333–336

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 44.210.149.218

9 ноября 2024 г., 18:48:41



УДК 536.423

ЭФФЕКТ ОТТЕСНЕНИЯ ЖИДКОСТИ ГАЗОМ ПРИ ВДУВЕ ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ ПЛАСТИНУ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Кутателадзе С. С., Маленков И. Г., Витковский С. Л.

Приводятся результаты экспериментального исследования эффекта оттеснения жидкости от поверхности пористой пластины вдуваемым газом в условиях вакуума. Производится сравнение полученных опытных данных с данными по кипению, дается объяснение причин их различия.

Исследования разрушения пузырькового режима, существующего на поверхности пористой пластины при барботаже жидкости газом, показали [1], что при атмосферном и более высоких давлениях гидродинамическая теория кризисов [2] справедлива как для кипения, так и для барботажа. При оттеснении барботируемой жидкости от микропористой поверхности и при пленочном режиме кипения на достаточно большой поверхности нагрева критические условия характеризуются практически одинаковыми значениями критерия устойчивости

$$k = W_{кр}'' \sqrt{\rho''} / \sqrt{g\sigma(\rho' - \rho'')}, \quad (1)$$

в котором скорость барботажа при кипении $W_{кр}''$ определяется соотношением

$$W_{кр}'' = q_{кр} / r\rho''. \quad (2)$$

Постоянство критерия (1) для данной пары жидкость — газ хорошо подтверждается имеющимися экспериментальными данными для маловязких сред.

Согласно опытным данным, полученным при кипении под вакуумом [3], величина k несколько возрастает по мере убывания давления. В отношении эффекта оттеснения жидкости при барботаже такие эксперименты отсутствовали. В данной работе изложены результаты опытов с дистиллированной водой, в которую вдувались либо азот, либо гелий при давлениях 0,05—1,0 бар (семь градаций). Газ вдувался через пористую пластину из нержавеющей стали с объемной пористостью 40%.

Принципиальная схема установок, на которой проводились исследования, представлена на рис. 1. Критические режимы барботажа определялись по методике [4]. При этих режимах фиксировался расход газа через пористую пластину $G_{кр}''$, который позволял вычислить критическую приведенную скорость вдува газа

$$W_{кр}'' = G_{кр}'' / F, \quad (3)$$

где F — полная площадь поверхности пористой пластины.

На рис. 2 представлено изменение приведенной критической скорости в зависимости от давления для обоих газов. Величина $W_{кр}''$ при вдуве гелия значительно больше, чем при вдуве азота. Кроме того, с увеличением глубины вакуума приведенная критическая скорость барботажа возрастает. Несовпадение кривых изменения $W_{кр}''$ с давлением для азота

и гелия указывает на то, что обнаруженное ранее влияние молекулярного веса газа на величину k [1] сохраняется и в условиях вакуума.

На рис. 3 показана зависимость критерия устойчивости k от давления, вычисленная на основе экспериментальных данных. Там же нанесены данные для первого кризиса кипения воды. Отчетливо видно, что при давлении, близком к атмосферному, данные для кипения воды и барботажной воды азотом сближаются и затем становятся автомодельными относительно давления. Качественно такова же картина и для оттеснения воды

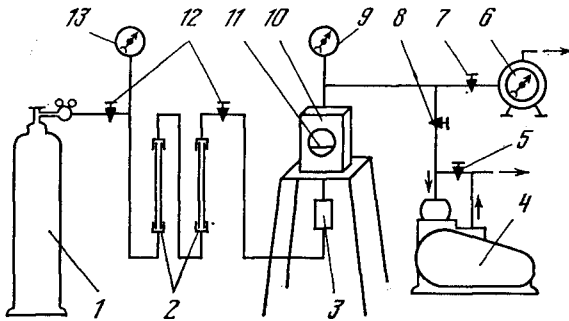


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 2 — расходомеры с облегченными поплавками; 3 — фильтр-увлажнитель газа; 4 — вакуумный насос; 6 — расходомер ГСБ-400; 10 — рабочая емкость; 11 — экспериментальный участок. (Остальные обозначения см. в тексте)

гелием, но значение критерия устойчивости при этом существенно ниже, что согласуется с данными для больших давлений [1].

Таким образом, оказалось, что влияние давления на гидрогазодинамику оттеснения жидкости при барботаже должно описываться не только специфическим числом Маха

$$M_2^2 = (\rho''/P) \sqrt{g\sigma/(\rho' - \rho'')}, \quad (4)$$

но и с помощью какого-то иного механизма. Естественно связать его механизм с увеличением скорости роста пузырей при низких давлениях и возникающим при их торможении гидродинамическим сопротивлением. Аналогичный механизм известен и при кипении [5].

Тормозящая сила складывается из сопротивления обтекания и инерции присоединенной массы жидкости. Полагая, что обе они пропорциональны масштабу кинетической энергии перемещающихся слоев жидкости и принимая в качестве масштаба скорости $W_{кр}''$, можно ввести число подобия, представляющее собой меру отношения гидродинамического сопротивления росту газового пузыря к подъемной силе.

Оценивая критическую скорость по (1), имеем

$$\rho' W_{кр}''^2 / g\delta \cdot (\rho' - \rho'') \sim \rho' / \rho'', \quad (5)$$

т. е. искомое число подобия представляет собой относительную плотность фаз в условиях автомодельности числа k .

В реальной сжимаемой среде [6]

$$k \sim M_2^{1/2}, \quad (6)$$

$$k = f\left(M_2^{1/2}; \frac{\rho'}{\rho''}\right). \quad (7)$$

На рис. 4 показаны в координатах (7) опытные данные по барботажу воды азотом и гелием через микропористую поверхность. Имеет место

отчетливая и практически однозначная связь, причем при

$$\rho' M_*^{+1/3} / \rho'' \leq 3 \cdot 10^{-2} \quad (8)$$

наступает явно выраженная автомодельность зависимости (6) относительно комплекса (8). На этом же графике нанесены данные по кипению воды под вакуумом. Как видно, и в этих координатах имеется существен-

Рис. 2. Изменение критической скорости вдува с давлением при барботаже воды азотом (1) и гелием (2)

Рис. 3. Изменение критерия k в зависимости от давления при кипении (пунктирная кривая и точки 3) и барботаже воды азотом (1) и гелием (2)

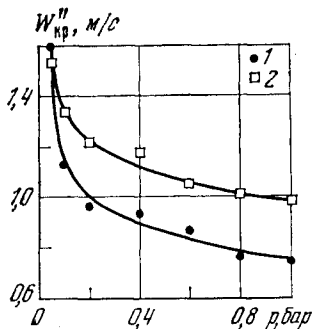


Рис. 2

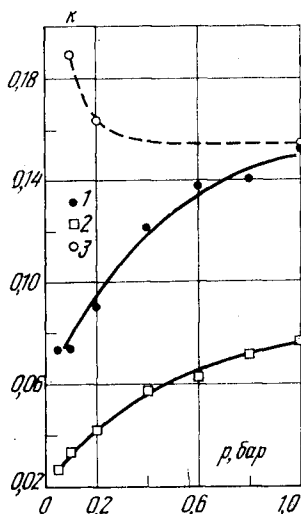


Рис. 3

ное количественное и качественное расхождение характеристик оттеснения жидкости при барботаже и кипении. Однако в области автомодельности функции (8) эти расхождения исчезают.

Для $\frac{\rho'}{\rho''} M_*^{+1/3} \geq 3 \cdot 10^{-2}$ данные по оттеснению жидкости при барботаже газом через микропористую поверхность описываются зависимостью

$$k = c \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{+1/3} M_*^{2/3} \quad (9)$$

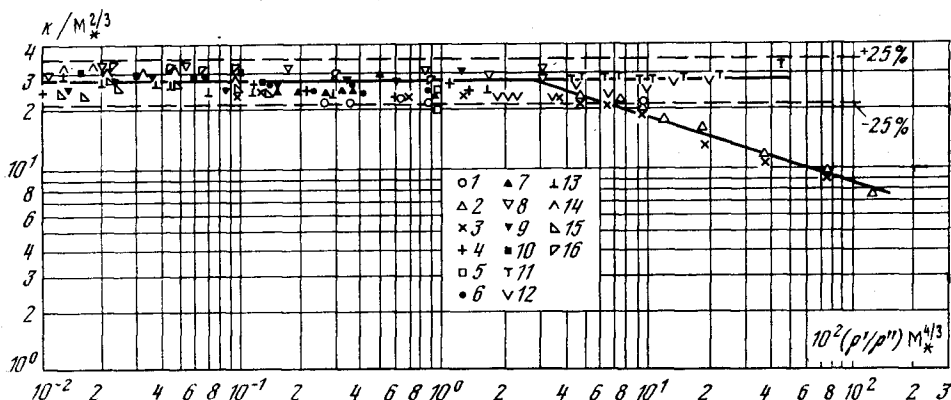


Рис. 4. Обобщение опытных данных при кипении и барботаже. Барботаж воды при $p = (1,0-42) \cdot 10^5$ Па; 1 - водород; 2 - гелий; 3 - азот; 4 - аргон; 5 - ксенон, этанол; 6 - азот; 7 - аргон. Кипение: 8 - вода, $p = (1,0-190) \cdot 10^5$ Па; 9 - метанол, $p = (1-60) \cdot 10^5$ Па; 10 - этанол, $p = (1-50) \cdot 10^5$ Па; 11 - вода, $p = (0,1-1,0) \cdot 10^5$ Па; 12 - этанол, $p = (0,1-1,0) \cdot 10^5$ Па; 13 - бензол, $p = (1-45) \cdot 10^5$ Па; 14 - водород, $p = (1,94-12,12) \cdot 10^5$ Па; 15 - гелий, $p = (0,006-2,07) \cdot 10^5$ Па; 16 - азот, $p = (1,13-29,8) \cdot 10^5$ Па

Отсюда видно, что при пониженных давлениях наряду с числом Маха, влияние которого в этой области сильно возрастает, существенное значение приобретает критерий, представляющий соотношение плотностей пара (газа) и жидкости. Обнаруженная закономерность указывает на то, что качественные различия величин k , наблюдаемые при кипении и барботаже под вакуумом, связаны с преобладающей ролью газодинамических аспектов.

Количественные расхождения данных по оттеснению жидкости при барботаже и кипении в области низких давлений, по-видимому, можно объяснить следующим.

Как известно, полный критический тепловой поток в действительности является суммой

$$q_{кр} = q_{кр\ r} + q_{кр\ k}. \quad (10)$$

Здесь $q_{кр\ r}$ — тепло, пошедшее на парообразование; $q_{кр\ k}$ — тепло, отведенное конвекцией жидкости.

При атмосферном давлении, как показывают опыты [7], $q_{кр\ r}$ составляет величину порядка $(0,8-0,85)q_{кр}$. С повышением давления это соотношение возрастает.

При уменьшении давления ниже атмосферного доля $q_{кр\ r}$ в полном потоке $q_{кр}$ уменьшается и тем сильнее, чем глубже вакуум. Например, при $p=0,3$ бар доля тепла, расходуемого на парообразование, уменьшается до $0,4q_{кр}$ [7].

По физическому смыслу в (1) должна входить скорость испарения, т. е. величина

$$W_{кр\ r}'' = q_{кр\ r} / r\rho''. \quad (11)$$

Фактически при определении k в (1) вводится величина $W_{кр}''$, вычисляемая по (2), т. е. на основе полного теплового потока $q_{кр}$. Между тем ясно, что тепло, отводимое за счет конвекции жидкости, никакой роли в критических преобразованиях пристенного слоя не играет; разрушение пузырьковой структуры двухфазного слоя происходит только за счет энергии движущегося в пристенной области пара.

Институт теплофизики
СО Академии наук СССР

Поступила в редакцию
3 X 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Кутателадзе, И. Г. Маленков. ПМТФ, № 2, 140, 1966.
2. С. С. Кутателадзе. ЖТФ, 20, № 11, 1839, 1950.
3. Н. Н. Мамонтова. Автореф. канд. дис., ИТФ СО АН СССР, Новосибирск, 1967.
4. И. Г. Маленков. ПМТФ, № 6, 160, 1963.
5. С. С. Кутателадзе. Основы теории теплообмена. Машгиз, Изд. 2, 1962.
6. S. S. Kutateladze, I. G. Malenkov. Intern. J. Heat Mass Transf., 4, 209, 1977.
7. Д. Н. Сорокин. Автореф. докт. дис., ФЭИ, Обнинск, 1975.