

Изменение плотности кипящей объемно нагреваемой жидкости при импульсе мощности

В. К. Завойский

В связи с изучением временного поведения кипящего гомогенного реактора необходимо знать механизм изменения плотности кипящей объемно нагреваемой жидкости при импульсном увеличении мощности тепловыделения. При изучении этого вопроса в работах [1, 2] опыты ставились следующим образом. Вода с небольшой добавкой щелочи нагревалась в стеклянном сосуде пропусканием через нее переменного электрического тока. В заданный момент времени мощность тока импульсно увеличивалась и регистрировалось изменение плотности пароводяной смеси. Плотность определялась методом поглощения γ -лучей с точностью $\pm 0,01$ г/см³.

Авторы указанных работ пришли к выводу, что вклад в изменение плотности за счет роста пузырьков пара, находящихся в жидкости при стационарном кипении до импульса мощности, очень мал и не превышает в конце импульса 1% от фактического уменьшения плотности. Поэтому изменение плотности было объяснено ростом пузырьков пара, появляющихся в избыточном количестве после начала импульса в связи с повышением температуры жидкости. Распределение количества этих пузырьков во времени, определяющее изменение плотности, находилось из экспериментальных данных. Для этого время, в течение которого регистрировалось изменение плотности, было разделено на интервалы по 25 мсек, и для каждого интервала рассчитывалось число «новых» пузырьков пара, которые должны были образоваться и начать расти, чтобы обеспечить измеренное в эксперименте уменьшение плотности за данный промежуток времени. При этом учитывался и рост пузырьков, появившихся в предыдущие интервалы времени.

Можно дать другую интерпретацию этих экспериментов и рассмотреть более вероятный механизм изменения плотности.

Для оценки вклада в изменение плотности за счет роста пузырьков пара, имевшихся в жидкости при стационарном кипении, в работах [1, 2] используется уравнение для роста неподвижного пузырька, полученное в работе [3]. Между тем за время, для которого вычисляется изменение плотности, эти пузырьки успевают пройти в жидкости расстояние, в несколько раз превышающее их радиус и, следовательно, во много раз превышающее толщину пограничного теплового слоя, окружающего пузырек. Поэтому скорость роста пузырьков следует рассчитывать по уравнению, учитывающему их движение.

Из работы [4] следует, что объем V_t движущегося пузырька пара в момент времени t определяется выражением

$$V_t^{1/2} - V_0^{1/2} = \sqrt{6} \frac{c\gamma'}{\gamma''} (au)^{1/2} \Delta T t, \quad (1)$$

где V_0 — начальный объем пузырька в момент времени $t=0$; γ' и γ'' — плотность жидкости и пара соответственно; c — теплоемкость жидкости; a — коэффициент температуропроводности жидкости; u — скорость движения пузырька пара относительно жидкости; ΔT — перегрев жидкости, т. е. разность температур жидкости вдали от пузырька и у его поверхности.

Используя уравнение (1) и экспериментальные данные работ [1, 2], можно убедиться, что рост пузырьков пара, находящихся в жидкости при стационарном кипении, играет отнюдь не малую роль, а вначале практически полностью обуславливает наблюдаемое в опыте изменение плотности. Для расчета нужно знать стационарный перегрев жидкости и изменение его со временем при импульсе мощности, а также начальное распределение пузырьков по размерам.

Стационарный перегрев жидкости оказывает заметное влияние на ход расчетной кривой. Температура в опытах определялась с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$, а абсолютные величины перегревов жидкости изменялись от 0,1 до $0,5^\circ\text{C}$. Поэтому в расчетах был использован средний перегрев для данного уровня мощности, который был определен на основании опытов, проведенных при атмосферном давлении в сравнимых условиях*.

Если пренебречь сравнительно небольшим количеством тепла, которое расходуется на парообразование за контролируемое время, то изменение перегрева жидкости при импульсе мощности можно вычислить, используя выражение

$$\Delta T_t = \Delta T_0 + \frac{Q t}{cV}, \quad (2)$$

где ΔT_0 — перегрев жидкости при стационарном кипении; Q — мощность импульса.

Начальное распределение пузырьков по размерам приведено в работах [1, 2] для двух опытов при атмосферном давлении.

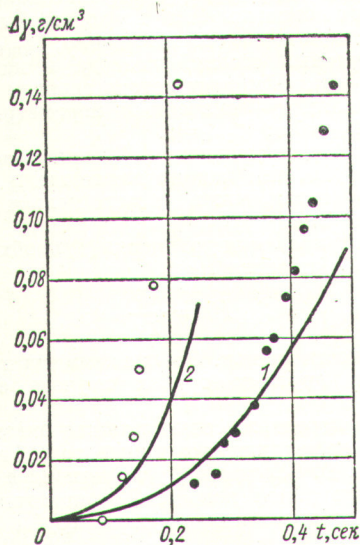
Схема расчета была такой же, как в работах [1, 2]. Время, в течение которого изменялась плотность, было разделено на интервалы по 25 мсек. Для каждого интервала вычислялись средний перегрев жидкости и увеличение объема каждого пузырька пара, находившегося в наблюдаемой части жидкости до начала импульса. Отсюда было найдено уменьшение плотности жидкости в зависимости от времени.

На рисунке приведены экспериментальные точки из работ [1, 2] и расчетные кривые, полученные автором, показывающие изменение плотности только за счет роста пузырьков пара, имевшихся в жидкости при стационарном кипении. Время $t=0$ соответствует началу импульса, а $\Delta\gamma$ — разность между плотностью жидкости при стационарном кипении и плотностью в момент времени t . Поскольку в пределах погрешности измерений расчетная кривая 1 описывает изменение плотности приблизительно до 0,04—0,05 г/см³, это означает, что в условиях опыта рост пузырьков пара, находившихся в жидкости при стационарном кипении, практически полностью обуславливает начальное изменение плотности. После этого скорость изменения плотности заметно увеличивается и экспериментальные точки отклоняются вверх от расчетной кривой. В соответствии с работами [1, 2] это отклоне-

* В обработанных опытах для облегчения образования пузырьков на дно сосуда были положены алюминиевые стружки. При реакции алюминия со щелочным раствором образовывались мелкие пузырьки газа, которые могли служить центрами парообразования.

можно объяснить появлением и ростом в рассматриваемой области большого числа «новых» пузырьков пара, скорость образования которых возрастает в связи с увеличением мощности тепловыделения*.

При большем импульсе мощности скорость изменения плотности за счет появления и роста добавочного числа новых пузырьков увеличивается раньше (см. рисунок, кривая 2). Но и в этом случае рост пузырьков,



Зависимость $\Delta\rho$ от времени:

1, 2 — расчетные кривые; $\circ$, $\bullet$ — экспериментальные точки
 $Q_0 = 0,32$ кет/л; $Q = 17,1$ кет/л; $\bullet$ — $Q_0 = 0,34$ кет/л,
 $Q = 4,83$ кет/л. Здесь Q_0 — мощность при стационарном кипении; Q — мощность в импульсе.

имевшихся в жидкости при стационарном кипении, обеспечивает изменение плотности приблизительно до $0,02$ г/см³.

Из уравнения (1) следует, что мелкие пузырьки растут быстрее крупных. Но, с другой стороны, при меньшем относительном изменении радиуса крупные пузырьки могут внести больший вклад в изменение паросодержания. Поэтому по крайней мере вначале скорость изменения плотности будет зависеть от распределения пузырьков по размерам при стационарном кипении, а также от их количества, т. е. от стационарного паросодержания. При прочих равных условиях скорость изменения плотности будет тем больше, чем больше начальное паросодержание, т. е. чем больше стационарная мощность. Это видно из экспериментальных данных работ [1, 2] и отмечено их авторами. Однако приходящая там концепция, согласно которой пузырьки, захваченные в жидкости при стационарном кипении,

* Если пузырьки пара зарождаются не внутри жидкости, а, например, на дне или стенках сосуда, то потребуется определенное время, чтобы они попали в рассматриваемую область. Это время будет определяться расстоянием, которое должны пройти пузырьки, и скоростью их движения, зависящей, в частности, от интенсивности перемешивания жидкости. Очевидно, в этом случае начальное изменение паросодержания может произойти только за счет роста пузырьков, находившихся в жидкости при стационарном кипении.

играют очень малую роль в изменении плотности, не позволила объяснить этот факт.

Авторы работ [1, 2] не учитывали роста пузырьков, имевшихся в жидкости при стационарном кипении и не располагали другим критерием для проведения аналитической кривой, описывающей изменение плотности, кроме экспериментальных точек. И так как первые точки, соответствующие малым изменениям плотности, оказались сдвинутыми вправо относительно начала импульса, авторы пришли к выводу, что паросодержание в кипящей жидкости с увеличением мощности начинает изменяться не сразу, а спустя некоторое время. Они нашли, что задержка в зависимости от величины импульса при атмосферном давлении достигает $0,1-0,2$ сек, а при давлении $\sim 9,5$ атм даже $0,3-0,4$ сек. Этот вывод получен распространением и был повторен, например, в работе [5]. Между тем очевидно, что первые точки, лежащие в области малых изменений плотности, имеют большую относительную погрешность и не могут служить основанием для подобного вывода.

Из сказанного следует, что если учитывать рост движущихся пузырьков пара, имевшихся в жидкости при стационарном кипении, то нет основания ожидать заметной задержки начала парообразования. Из рисунка видно, что даже первые экспериментальные точки отклоняются от расчетных кривых не более чем на величину погрешности измерения*.

В работах [1, 2] было найдено также, что при увеличении давления уменьшается начальная скорость изменения плотности при импульсе мощности (увеличивается сдвиг кривых вправо по оси времени). Распределение пузырьков пара по размерам при стационарном кипении для этих опытов, к сожалению, не приводится, и поэтому нельзя рассчитать изменение плотности за счет роста этих пузырьков. Однако, как это можно видеть из уравнения (1), при прочих равных условиях увеличение давления должно приводить к уменьшению скорости изменения плотности вследствие уменьшения скорости роста пузырьков пара.

Таким образом, чтобы найти изменение плотности кипящей объемнонагреваемой жидкости при импульсе мощности следует учитывать рост пузырьков пара, имевшихся в жидкости до начала импульса. Уравнение для роста неподвижного пузырька пара нельзя использовать для расчетов в условиях, когда пузырьки движутся. Работы [1, 2] не дают основания считать, что парообразование в кипящей жидкости при импульсе мощности заметно задерживается.

Поступило в Редакцию 2/VII 1962 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Lipkis et al. Chem. Engng. Progr. Symposium series, 52, 105 (1951).
2. M. Greenfield et al. Report 54-77, Department of Engineering, University of California at Los Angeles, 1954.
3. H. Forster, N. Zuber. J. Appl. Phys., 25, 474 (1954).
4. В. К. Завойский. «Атомная энергия», 10, 272 (1961).
5. Ч. Бонилла. Вопросы теплопередачи в ядерной технике. М., Госатомиздат, 1961.

* Разумеется здесь не имеется в виду задержка в несколько микросекунд, связанная с эффектом инерции жидкости, подробно рассмотренная в работах [1, 2].