

фиг. 4,а, пересчитаны в координаты α , φ , где α — угол отклонения факела от вертикали в точке его выхода из пограничного слоя на пластине.

Здесь более отчетливо заметна преобладающая роль наклона пластины в ориентировке факела для больших φ . Причиной этого является возрастающее по мере роста угла φ взаимодействие факела с конвективным пограничным слоем на неравномерно нагретой пластине.

Поступила 5 VI 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. Bland R. E., Pelick T. J. The Schlieren Method applied to flow visualisation in a water tunnel. Paper. Amer. Soc. Mech. Engrs., 1961, WA-47 (русск. перев.: Тр. амер. об-ва инж.-мех. Техническая механика, 1962, № 4).
2. Saudners O. A., Fishenden M., Manshion H. D. Some measurements of convection by an optical method. Engineering, 1935, vol. 139.
3. Остроумов Г. А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. Гостехиздат, 1952.
4. Ляхов Ю. Н. Температурное поле в пластине от подвижного источника тепла. Сб. научн. тр., Пермский политехн. ин-т, 1965, № 21.
6. Попов С. Г. Измерение воздушных потоков. Гостехиздат, 1947.
5. Ферри А. Аэродинамика сверхзвуковых течений. Гостехиздат, 1952.
7. Physical measurements in gas dynamics and combustion, London, 1955 (русск. перев.: Физические измерения в газовой динамике и при горении (перев. с англ. под ред. Ю. Ф. Дитякина), Изд. иностр. лит., 1957).

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ХАРАКТЕРОМ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ И ВИДОМ ПОВЕРХНОСТНОГО КИПЕНИЯ ВОДЫ В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ

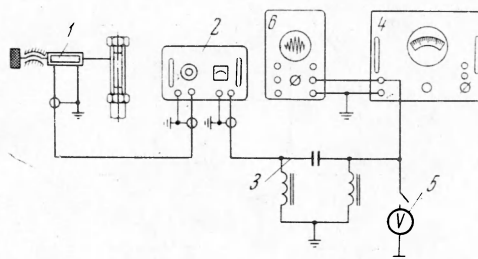
А. М. Кичигин, Л. А. Кесова

(Киев)

Излагаются результаты исследования зависимости частоты и интенсивности звуковых колебаний, возникающих при поверхностном кипении воды в кольцевом канале, от теплового потока. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что в момент перехода от пузырькового кипения к пленочному происходит резкое изменение характера звуковых колебаний. Зависимость частоты звуковых колебаний от теплового потока подобна кривой кипения Нукиямы.

Рядом исследований в большом объеме установлено, что процесс кипения жидкостей сопровождается звуковыми колебаниями. Между характером кипения, интенсивностью и частотой этих колебаний существует определенная связь. Наиболее полный анализ работ, посвященных исследованию звуковых колебаний при кипении в большом объеме, сделан Е. И. Нессисом [1].

При поверхностном кипении и вынужденном движении жидкости подобные исследования до настоящего времени не проводились. Изучая кризисы теплообмена при поверхностном кипении воды, движущейся в кольцевых каналах шириной от 0.6 до 3.0 мм со скоростью от 4 до 20 м/сек под давлением от 0.4 до 0.8 Мн/м², было обнаружено, что при некотором значении теплового потока в области опытных элементов появлялись звуковые колебания частотой f от 8 до 10 кгц. Наблюдения за возникновением этих колебаний проводились при помощи пьезодатчика (кристалл сегнетовой соли) и осциллографа типа ЭО-7. При низких значениях скорости (от 4 до 7 м/сек) в момент возникновения звуковых колебаний на поверхности нагрева видна была паровая пленка, не приводящая к покраснению и пережогу опытного элемента. Уравновешенный мост, применявшийся для фиксирования кризиса теплообмена, разбалансировался в момент возникновения звуковых колебаний при всех исследованных в работе режимах.



Фиг. 1. Схема измерений: 1 — пьезодатчик, 2 — усилитель, 3 — фильтр, 4 — герцметр, 5 — вольтметр, 6 — осциллограф

Исследование показало, что тепловой поток, при котором возникают звуковые колебания частотой от 8 до 10 $\kappa\text{гц}$, увеличивается с ростом скорости, недогрева и ширины кольцевого зазора δ от 0.6 до 1.2 мм и не зависит в исследованных пределах (6 и 14 мм) от диаметра опытного элемента.

Анализ описанных явлений, а также сопоставление опытных данных с результатами работ по исследованию кризисов теплообмена в кольцевых каналах [2-4] позволили предположить, что звуковые колебания частотой от 8 до 10 $\kappa\text{гц}$ возникают в момент перехода от пузырькового режима кипения к пленочному, т. е. при возникновении кризиса теплообмена.

Аналогично расценен «шумовой предел» и в работе Бертолетти и др. [5], где изучались кризисы теплообмена при течении пароводяной смеси в обогреваемых трубах.

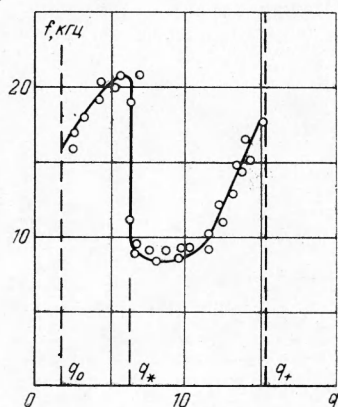
Для проверки высказанного предположения и изучения зависимости частоты и интенсивности звуковых колебаний, сопровождающих процесс поверхностного кипения, от теплового потока была разработана схема измерений, представленная на фиг. 1.

Пьезодатчик установлен так, чтобы его игла воспринимала колебания наружной трубки кольцевого канала, выточенной из термостойкого органического стекла. Сигнал с пьезодатчика подается на вход усилителя низкой частоты типа 28-ИМ, а затем на фильтр, срезающий колебания ниже 400 гц , которые возникают от работы вращающихся механизмов и наводок переменного тока. Частота усиленных колебаний измерялась герцметром типа ИЧ-5а, а интенсивность — милливольтметром Сberg. Для визуальных наблюдений за процессом изменения звуковых колебаний параллельно герцметру включался осциллограф типа ЭО-7.

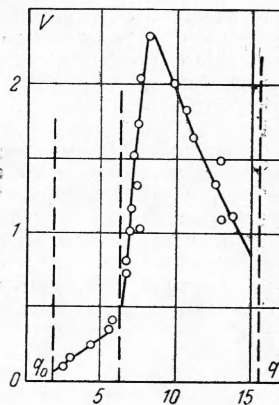
Следует указать, что измерение интенсивности колебаний было относительным, так как не учитывалось поглощение сигнала потоком и наружной трубкой кольцевого канала. Милливольтметр включался только в момент замера интенсивности. Так, при постоянном коэффициенте усиления была получена зависимость напряжения, генерируемого датчиком, от теплового потока. Схема была проверена при помощи звукового генератора ЗГ-12.

Методика проведения экспериментов была следующей. При постоянных значениях скорости, давления и недогрева ступенчато изменялась тепловая нагрузка на опытном элементе, обогреваемом постоянным током. Через каждые 0.2—0.4 мвт/м^2 производились отсчеты силы греющего тока, падения напряжения на опытном элементе, температуры воды на входе и выходе экспериментального участка интенсивности и частоты звуковых колебаний. Исследование проведено в кольцевом канале шириной 3.0 мм при скоростях 4 и 10 м/сек , недогревах 70, 85 и 100 град . В качестве теплоотдающих поверхностей использовались гладкие цилиндрические опытные элементы из нержавеющей стали (1Х18Н9Т) диаметром 6 мм .

При скоростях свыше 10 м/сек измерение частоты не проводилось, так как из-за шумов потока и низкой интенсивности колебаний трудно было снять участок пузырькового кипения. Фиксировался только момент перехода от пузырькового кипения к пленочному, который характерен резким изменением частоты и интенсивности звука.



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Зависимость частоты звуковых колебаний f ($\kappa\text{гц}$) от теплового потока q Мвт/м^2 при скорости 4 м/сек , недогреве 70 град

Фиг. 3. Зависимость интенсивности звуковых колебаний от теплового потока при скорости 4 м/сек и недогреве 70 град

Опыты показали, что в области конвективного теплообмена ($q < q_0$) звуковые колебания в исследованном диапазоне скоростей и недогрева не наблюдаются¹.

При тепловых потоках, несколько превышающих q_0 , частотомер и осциллограф начинают фиксировать наличие слабых звуковых колебаний частотой порядка 15 кгц. По мере увеличения теплового потока интенсивность и частота колебаний возрастают. Происходит это, по-видимому, за счет роста числа действующих центров парообразования и увеличения вследствие этого количества излучающих звук пузырьков пара.

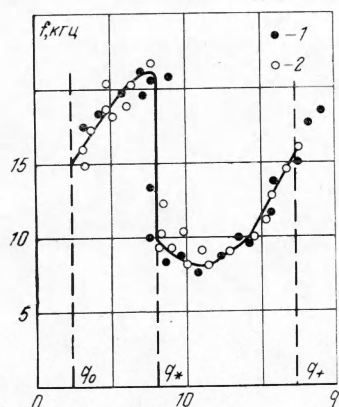
К подобному же выводу о росте интенсивности «звукового шума», но при кипении в большом объеме пришли Е. И. Несис [1], В. И. Токмаков [6], Шварц и Сайлер [7].

С некоторого значения теплового потока поверхность насыщается центрами парообразования и частота колебаний изменяется очень незначительно ($f = 19-21$ кгц); интенсивность колебаний продолжает расти.

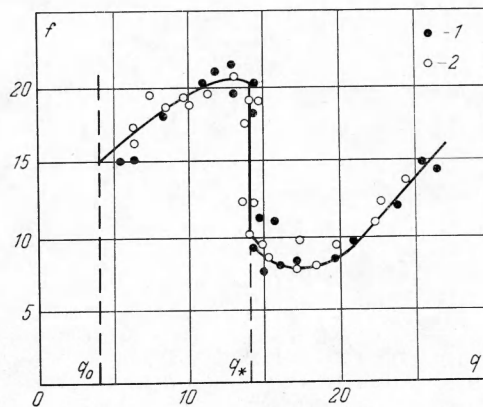
Дальнейшее увеличение тепловой нагрузки приводит к резкому падению частоты колебаний до $f = 8-10$ кгц. Такое резкое изменение характера звуковых колебаний при поверхностном кипении свидетельствует о коренной перестройке гидродинамики двухфазного пристенного слоя жидкости, т. е. о смене пузырькового режима кипения пленочным. Тепловой поток, при котором появляются звуковые колебания частотой от 8 до 10 кгц, является критическим.

Возникшая на поверхности нагрева паровая пленка пульсирует, изменяя размер и форму. Частота колебаний некоторое время при увеличении теплового потока продолжает уменьшаться, а интенсивность резко возрастает, причем минимум частоты колебаний соответствует максимуму их интенсивности. Достигнув некоторого минимального значения ($f = 8-9$ кгц), частота возрастает и уходит за порог слышимости, а интенсивность резко падает. Происходит это, по-видимому, потому, что по мере приближения к пережогу поверхность раздела фаз пар — жидкость становится более стабильной; возможно, что в действие вступают другие пленки пара, которые сливаются с уже существующей.

Наблюдаемая зависимость $f = \varphi(q)$ качественно согласуется с теоретическими предположениями волновой теории кризиса теплообмена, развитой Чангом [8] для кипения жидкости в большом объеме. В качестве примера описанных зависимостей на фиг. 2, 3 показаны зависимости $f = \varphi(q)$ и $u = \varphi(q)$, полученные при скорости 4 м/сек и недогреве 70 град. При других значениях параметров процесса ($w, \Delta t$) кривые $f = \varphi(q)$ и $u = \varphi(q)$ аналогичны приведенным на фиг. 2, 3.



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Зависимость частоты звуковых колебаний от теплового потока при скорости 4 м/сек и недогреве 100 град: 1 — латунный элемент, 2 — элемент из нержавеющей стали

Фиг. 5. Зависимость частоты звуковых колебаний от теплового потока при скорости 10 м/сек и недогреве 85 град. 1 — нагрузка, 2 — разгрузка

Исследование показало, что, независимо от скорости и недогрева, смена режимов кипения происходит в том же интервале изменения частоты, но при различных значениях тепловой нагрузки.

¹ Величина q_0 соответствует тепловому потоку, при котором температура стенки при данных условиях равна температуре насыщения воды. Эта величина рассчитывается по формулам конвективного теплообмена в кольцевых каналах.

Покраснение и пережог опытных элементов обычно имели место при тепловых потоках q^+ , значительно превышающих величину q_* . В некоторых случаях эти величины были соизмеримы. По-видимому, на величину q^+ оказывают влияние такие факторы, как теплопроводность стенки, ее кривизна, а также параметры потока.

С целью проверки влияния материала теплоотдающей поверхности на величину q_* была проведена серия опытов при скорости 4 м/сек на латунных элементах. Результаты этих опытов сопоставлены на фиг. 4 с данными, полученными на элементах из нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т. Как видно из фиг. 4, на латунной поверхности кризис наступает при тех же значениях теплового потока и частоты колебаний, что и на элементе из нержавеющей стали. Ограниченная мощность генератора не позволила получить пережога латунной теплоотдающей поверхности. Однако результаты опытов позволяют утверждать, что материал поверхности нагрева на величину критической плотности теплового потока влияния не оказывает, но сказывается на значении теплового потока, при котором наступает пережог опытного элемента (q^+).

Замер частоты колебаний производился как при увеличении, так и при уменьшении тепловой нагрузки.

Результаты этих опытов показывают, что смена пузырькового режима кипения пленочным и обратно происходит при одинаковых тепловых потоках (фиг. 5). Таким образом, можно полагать, что q_{*1} и q_{*2} совпадают. Величины эти не будут равны, если за первую критическую плотность теплового потока принимать значение q^+ . Сопоставление кривых $f = \varphi(q)$ при различных скоростях и недогревах (фиг. 2, 4, 5) с кривой кипения Нукиямы для большого объема [9] показывает качественную аналогию между ними. Следовательно, по зависимости частоты колебаний от теплового потока можно судить о виде и характере процесса кипения жидкости.

Полученные результаты показывают, что путем измерения интенсивности и частоты звука можно предвидеть приближение кризиса теплообмена, регулировать выделение тепла и предотвращать пережог поверхности нагрева.

Изложенный материал позволяет сделать следующие выводы:

1. Смена пузырькового режима кипения пленочным сопровождается резким изменением характера звуковых колебаний.

2. Величина критической плотности теплового потока при поверхностном кипении и вынужденном движении воды получается одинаковой на опытных элементах из нержавеющей стали и латуни.

3. Значения q_{*1} и q_{*2} совпадают. Разница будет, если за величину первой критической плотности теплового потока принимать тепловой поток, при котором происходит покраснение или пережог теплоотдающей поверхности.

4. Зависимость частоты колебаний от тепловой нагрузки при поверхностном кипении воды в вынужденном потоке позволяет судить о виде и характере процесса кипения и подобна кривой кипения Нукиямы для большого объема.

Поступила 8 VII 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Несис Е. И. Кипение жидкостей. Успехи физ. наук, 1965, т. 87, № 4.
2. M s A d a m s W. H., K e n n e l W. E., M i n d e n C. S. and oth. Heat transfer at high rates to water with surface boiling. Industr. and Engng Chem., 1949, vol. 41, No. 9.
3. О р н а т с к и й А. П. Теплообмен при поверхностном кипении в условиях вынужденного движения жидкости по кольцевому каналу. Сб. «Исследование процессов теплообмена при больших тепловых потоках» (под ред. Толубинского В. И.), Изд. АН УССР, 1955.
4. Ч и р к и н В. С., Ю к и н В. П. Кризис теплосъема в потоке кипящей воды для кольцевого зазора. Ж. техн. физ., 1956, т. 27, № 7.
5. B e r t o l e t t i S., G a s p a r i G. P., L o m b e r t i C., P e r l o n g o G., S i l v e s t r i M., T o s c a n i F. A. Heat transfer crisis with steam-water mixtures. Energia nucl., 1965, vol. 12, No. 3.
6. Т о к м а к о в В. И. О связи между тепловым потоком и звуковым давлением шума при кипении жидкости. Инж.-физ. ж., 1965, т. 8, № 5.
7. Ш в а р ц, С а й л е р. Связь между звуковыми колебаниями и теплоотдачей при кипении. Теплопередача, Тр. Америк. о-ва инж. механ., 1965, № 4.
8. Y a n P o C h a n g. A theoretical analysis of heat transfer in natural convection and in boiling. Trans. ASME, 1957, No. 7, vol. 79.
9. N u k i y a m a S. Film boiling water on thin wires. Soc. Mech. Engng (Japan), 1934, vol. 37, No.