

Гидравлическое сопротивление в каналах с поверхностным кипением

КНЯЗЕВ В. А.

УДК 532.542.4

При исследовании поверхностного кипения недогретой жидкости принято выделять характерную область, называемую стадией развитого кипения. Различные определения начала этой стадии, предложенные рядом авторов [1—8], дают близкие результаты. Воспользуемся определением, данным Д. А. Лабунцовым:

$$(\alpha \vartheta_s / q)_e \approx 0,35, \quad (1)$$

где $\vartheta_s = T_s - T_L$ — местный недогрев теплоносителя; α — коэффициент теплоотдачи в одноплазном потоке; q — плотность теплового потока.

Согласно [8], в сечении (1) объемное пароудержание $\varphi \approx 0,01$. С другой стороны, принципиальная возможность закипания может быть выражена условием $T_w \approx T_s$, что соответствует сечению $\alpha \vartheta_s / q \approx 1$.

Назовем область

$$1 \gtrsim \frac{\alpha \vartheta_s}{q} \gtrsim 0,35 \quad (2)$$

областью развития поверхностного кипения. Свойствами этой стадии кипения являются сравнительно слабое проявление основных эффектов кипения, высокая степень неравновесности процесса и большая протяженность области развития. Например, записывая уравнение теплового баланса и используя условие (2), для цилиндрической трубы с равномерным обогревом получаем, что область развития кипения составляет число калибров, равное

$$\frac{L}{D} \approx \frac{0,1625}{St} \approx 7,2 Re^{0,2} Pr^{0,6}. \quad (3)$$

Последнее обстоятельство является основанием для специального изучения закона гидравлического сопротивления на стадии развития поверхностного кипения, что и рассматривается в настоящей статье.

В качестве теоретической модели течения в области развития кипения принимается турбулентный поток с возмущениями на границах течения. Принцип суперпозиции напряжений, установленный М. Д. Миллиончиковым для случая течения на шероховатой поверхности [9], позволяет предположить, что турбулентное и «возмущенное» пульсационные движения не коррелированы между собой. Тогда мгновенное поле скоростей можно представить в виде

$$V_i = v_i + v'_i, \quad (4)$$

где течение, осредненное по турбулентным пульсациям, имеет вид

$$v_i = \langle \bar{v}_i \rangle + \bar{v}_i + \langle v'_i \rangle + v'_i. \quad (5)$$

Знак $\langle \rangle$ выражает осреднение на некотором масштабе длины λ , а \bar{v} — пространственную пульсацию.

На основании уравнений движения в форме Громеки — Ламба для осредненного установившегося течения получаем

$$-(\partial/\partial x) \langle \bar{p} \rangle = -\nu \frac{\partial}{\partial y} \langle \bar{\omega} \rangle - \bar{v}'_y \bar{\omega}' - \langle \bar{v}_y \bar{\omega} \rangle, \quad (6)$$

где $\langle \bar{\omega} \rangle = -\partial/\partial y \langle \bar{v}_x \rangle$ — завихренность осредненного движения.

Первые два члена справа в формуле (6) выражают вязкую и турбулентную составляющую сил сопротивления в турбулентном потоке. Третий член $\langle \bar{v}_y \bar{\omega} \rangle$ выражает дополнительное вихревое сопротивление в потоке, возмущенном поверхностным кипением.

Касательное напряжение будет равно

$$v_*^2 \equiv \tau/\rho = -\nu \langle \bar{\omega} \rangle + \int_0^y \bar{v}'_y \bar{\omega}' d\eta + \int_0^y \langle \bar{v}_y \bar{\omega} \rangle d\eta. \quad (7)$$

В то же время можно написать

$$v_*^2 = -(\nu + \nu_T + \nu_B) \langle \bar{\omega} \rangle, \quad (8)$$

где ν , ν_T , ν_B — молекулярная, турбулентная и «возмущенная» вязкость соответственно.

Сравнив (7) и (8), получим

$$\nu_B = \int_0^y \langle \bar{v}_y \bar{\omega} \rangle d\eta / \langle \bar{\omega} \rangle (y). \quad (9)$$

Выражение (9) можно рассматривать как определение эффективной «возмущенной» вязкости. Найдем связь ν_B с относительным увеличением гидросопротивления в возмущенном потоке. Сравняются коэффициенты сопротивления ξ турбулентного потока в гидравлически гладком канале и кипящего турбулентного потока при одних и тех же значениях расхода (среднемассовой скорости). Записывая уравнения М. Д. Миллионщикова

$$\begin{cases} [\nu + a\nu_* (y - \delta_0)] \frac{du}{dy} = \nu_*^2; & y \geq \delta_0, \quad a = 0.39; \\ u = \frac{y\nu_*}{\nu} \nu_*; & 0 \leq y < \delta_0; \end{cases}$$

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф.Скорины

и замечая, что

$$v_{\perp} \approx \frac{\pi a (Ja)^2}{2D_0},$$

где Ja — число Якоба; a — коэффициент теплопроводности, после простых преобразований получаем

$$v_{к/в} \approx 3 (q/L\rho_v \bar{u}) \left(\frac{\alpha_{кип}}{\alpha} - 1 \right). \quad (14)$$

Таким образом, коэффициент гидросопротивления на стадии развития поверхностного кипения определяется формулами (11) и (14).

На рис. 1 показано изменение $\bar{\xi}$ по длине канала для ряда значений чисел Re и $A = q/L\rho_v \bar{u}$. При этом $\alpha_{кип}$ рассчитывалось по работе [13].

Влияние параметра A на величину $\bar{\xi}$ представлено на рис. 2. Для неизменных значений q и \bar{u} эта зависимость означает, что при невысоком уровне давления в контуре ($A \gg 0,5$) перепад давления на участке развития поверхностного кипения достаточно велик и может быть соизмерим с перепадом давления на всем участке кипения недогретой жидкости. В частности, при $q = 10^6 \text{ вт/м}^2$ и $\bar{u} = 5 \text{ м/сек}$ давление можно считать малым, если $p \leq 3 \text{ бар}$. При тех же условиях вкладом вихревого сопротивления в общий перепад давления по каналу можно пренебречь, если $p > 10 \text{ бар}$.

На рис. 3 дано сравнение расчетного профиля давления по длине кипящего канала диаметром 2,34 мм с экспериментальными данными работы [14]. Режимы 2—5 соответствуют случаям, когда стадия развития поверхностного кипения

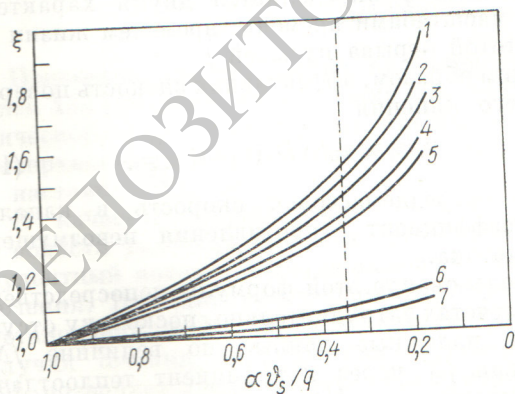


Рис. 1. Изменение коэффициента сопротивления по длине кипящего канала (пунктиром показано сечение заметного парообразования):

1 — $Re = 5 \cdot 10^4$; 2 — 10^5 ; 3 — $2 \cdot 10^5$; 4 — $5 \cdot 10^5$; 5 — 10^6 при $A = 1$; 6 — $5 \cdot 10^4$; 7 — 10^6 при $A = 0,1$.

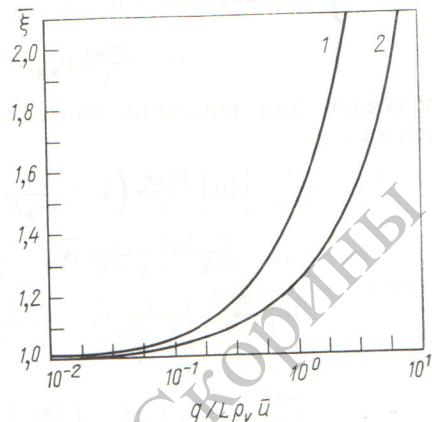


Рис. 2. Влияние параметра $q/L\rho_v \bar{u}$ на коэффициент сопротивления при $Re = 10^5$.

Сечение $\alpha v_s/q = 0,35$ (1) и 0,6 (2).

устанавливалась на всей длине рабочего участка. Для этих режимов согласие экспериментальных и расчетных результатов вполне удовлетворительное. Режим 1 соответствует случаю, когда на последней четверти рабочего участка, на которой падение давления связано в основном с ростом объемного паросодержания, устанавливался режим развитого кипения ($\alpha v_s/q < 0,35$).

Итак, возрастание гидросопротивления в канале на стадии развития поверхностного кипения объясняется появлением дополнительного вихревого сопротивления в возмущенном кипением турбулентном потоке. Гидравлический

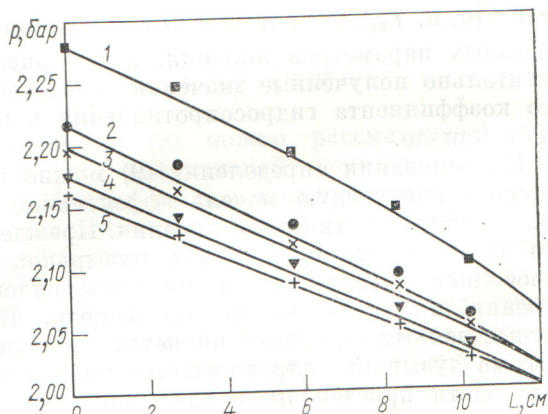


Рис. 3. Распределение давления в канале при поверхностном кипении воды ($v = 6,096 \text{ м/сек}$; $T_{вх} = 27^\circ\text{C}$; $P_{вых} = 2,00 \text{ бар}$; $L = 12 \text{ см}$):

1 — $q = 6,93 \cdot 10^6$; 2 — $6,18 \cdot 10^6$; 3 — $5,40 \cdot 10^6$; 4 — $4,63 \cdot 10^6$; 5 — $3,78 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2$.

эффект кипения определяется относительной величиной «кипящей» вязкости по сравнению с турбулентной и молекулярной вязкостью. В контурах низкого давления необходимо учитывать перепад давления на участке развития поверхностного кипения.

Поступила в Редакцию 29/I 1974 г.
В окончательной редакции 22/V 1974 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аладьев И. Т., Додонов Л. С., Уралов В. С. В сб.: Исследование теплоотдачи к пару и воде, кипящей в трубах при высоком давлении. М., Атомиздат, 1958, с. 64.
2. Тарасова Н. В., Орлов В. М. «Теплоэнергетика», 1962, № 6, с. 48.
3. Полетавкин П. Г. «Теплоэнергетика», 1959, № 12, с. 13.

4. Полетавкин П. Г., Шапкин Н. А. «Теплоэнергетика», 1958, № 4, с. 54.
5. Трецов Г. Г. В сб.: Конвективная теплопередача в двухфазном и однофазном потоках. Под ред. В. М. Боршанского и И. И. Палеева. М., «Энергия», 1964, с. 118.
6. Osmachkin V., Borisov V. IV Intern. Heat Trans. Conf., Paris — Versailles, 1970, v. 3.
7. Costa J. Note TT, N 244. Grenoble, Nov. 1966.
8. Захарова Э. А., Кольчугин Б. А., Лабунцов Д. А. «Теплоэнергетика», 1970, № 6, с. 58.
9. Миллионщиков М. Д. «Атомная энергия», 1970, т. 28, вып. 3, с. 207.
10. Кутателадзе С. С., Мамонтова Н. Н. «Прикл. мат. и техн. физика», 1971, № 6, с. 177.
11. Якобс, Шейл. Теплопередача (Тр. Амер. о-ва мех.-инж.). М., «Мир», 1969, т. 2, с. 113.
12. Трецов Г. Г. «Теплоэнергетика», 1957, № 5, с. 44.
13. Богданов Ф. Ф. «Атомная энергия», 1970, т. 29, вып. 6, с. 454.
14. Bergles A., Dormer T. Intern. J. Heat Metals Trans., 1969, v. 12, N 5, p. 459.

Рецензии

Мюллер Г., Майерсбергер К., Шпринц Х. **Специальные методы анализа стабильных изотопов.** Пер. с нем. М., Атомиздат, 1974, 28 л., 3 р. 05 к.

В различных областях науки и техники для решения важных научных и практических задач в нашей стране широко используются стабильные изотопы и меченые или соединения. При этом для определения количеств изотопного состава изучаемых веществ наряду с масс-спектрометрией применяются и другие аналитические методы (газовая хроматография, оптическая спектроскопия, ядерный магнитный резонанс и т. д.). Однако несмотря на обилие экспериментальных работ и публикаций об использовании стабильных изотопов ученые и специалисты этой области до настоящего времени не имели в своем распоряжении практического руководства по методам анализа стабильных изотопов. В связи с этим следует приветствовать выпуск в свет перевода монографии «Специальные методы анализа стабильных изотопов».

Монография состоит из введения и 13 глав, в которых достаточно полно описаны принципиальные особенности того или иного метода анализа изотопного состава вещества и показаны примеры практического применения методов.

В первых шести главах рассмотрены особенности изотопных методов анализа, основанных на измерении таких характеристик, как теплопроводность (катарометрия), плотность (денсиметрия), показатель преломления (рефрактометрия), подвижность ионов в водных дейтерированных растворах (электрометрия), скорость потока газа через малое отверстие (эффузиометрия), вязкость (вискозиметрия), температура замерзания (кримометрия) и давление пара (тензометрия).

Значительный интерес представляют седьмая и восьмая главы, в которых обсуждается применение методов спектрального анализа для качественного и количественного определений содержания стабильных изотопов водорода, гелия, аргона, кислорода, ртути, лития, бора, стронция, свинца, урана, плутония, углерода, азота, серы, полония. Весьма удачным дополнением к ним являются 12 и 13 главы. В 12 главе, написанной В. И. Мосичевым, достаточно подробно освещены возможности использования методов оптической спектроскопии для анализа стабильных изотопов, изложены требования к оптической аппаратуре, применяемой для этих целей, и даны дополнительные примеры практического использования этого метода. В 13 главе (И. В. Домиденкова и В. И. Мосичев) рассмотрено применение ИК-спектроскопии для анализа изотопозамещенных соединений.

Описание количественных и структурных методов изотопного анализа с помощью спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) приведено в девятой главе. 10 и 11 главы посвящены методам определения содержания изотопов с помощью газовой хроматографии и активационного анализа.

Книга является ценным практическим руководством по изотопному анализу и окажет существенную помощь многим ученым и специалистам, работающим в области применения стабильных изотопов. Она снабжена обширной библиографией (1182 наименования), очень полезным справочным материалом в виде таблиц.

Однако перевод и редакция отдельных глав выполнен не всегда тщательно, в книге встречается текст дословного перевода, не всегда используются принятые у нас в стране термины.

ПЕТРЕНКО Л. И.