

4. Громов Б.Ф., Тошинский Г.И., Сазонов А.Г. и др. Атомная станция малой мощности с жидкометаллическим теплоносителем свинец—висмут. Докл. на 3-й ежегодной научно-техн. конф. Ядерного общества, 1992.
5. Громов Б.Ф., Чекунов В.В., Степанов В.С. и др. Реакторные установки с внутренне присущей безопасностью с жидкометаллическим теплоносителем — сплавом свинец—висмут. — In: Radiation and Ecological Problems Related to Nuclear Power and Production Conversion. Obninsk, Symp. XV Mendeleev Congr. on General and Applied Chemistry, 1993.
6. Громов Б.Ф., Тошинский Г.И., Степанов В.С. и др. Плавающая атомная электростанция мощностью 50 МВт (эл.) с реактором высокой безопасности, охлаждаемым сплавом свинец—висмут. Докл. на 4-й ежегодной научно-техн. конф. Ядерного общества, 1993.
7. Громов Б.Ф., Козловцев В.Г., Чекунов В.В. и др. Энергообеспечение крупнотоннажных производств синтетического жидкого топлива от атомной энерготехнологической станции на быстрых нейтронах. — Энергетическое строительство, 1992, № 6, с. 34.
8. Мясников В.О., Стекольников В.В., Степанов В.С. и др. Концептуальный проект модульной АЭС предельной безопасности с быстрым реактором, охлаждаемым сплавом свинец—висмут. Докл. на 3-й ежегодной конф. Ядерного общества, 1992.
9. Subbotin V.I., Matveev V.I., Toshinsky G.I. Fast reactors with lead-bismuth coolant in future nuclear power. — In: Proc. ARS'94 Intern. Topical Meeting of Advanced Reactors Safety, 1994, v. 2, p. 636.

Поступила в Редакцию 30.04.96

УДК 632.039

ДОПУСТИМЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ СНИЗУ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СЛАБОНАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Бабыкин А.С., Балунев Б.Ф. (АООТ ЦКТИ),

Вахрушев В.В., Кууль В.С., Тарасов Г.И., Фальков А.А. (ОКБМ)

При разработке компьютерных кодов расчета тяжелых аварий с плавлением топлива и скоплением расплава на днище реактора актуальным становится определение замыкающих соотношений для интенсивности наружного охлаждения днища реактора как в некипящих режимах ($t_{\text{пов}} < t_{\text{н}}$, где $t_{\text{пов}}$ — температура теплоотдающей поверхности; $t_{\text{н}}$ — температура насыщения), так и при кипении воды (поверхностном и объемном). Наиболее актуальным является определение максимально допустимых тепловых потоков (кризиса кипения и закризисной теплоотдачи). Перечисленные вопросы рассмотрены в некоторых публикациях и справочниках [1—7].

Авторами настоящей статьи проведено экспериментальное исследование интенсивности однофазной теплоотдачи и условий ухудшения теплоотдачи при кипении на плоской слабонаклонной охлаждаемой снизу пластине. Электрообогрев омический. Ширина пластины $b = 0,1$ м. Эксперименты проведены при 18 сочетаниях длины пластины $l = 0,3, 0,5$ м, толщины $\delta = 0,2, 1, 2$ мм и угле наклона к горизонтали β до $9,4$ и $13,3^\circ$. Сверху к пластине были прижаты листы теплоизоляции из фторопласта-4 толщиной 10 мм и паронита толщиной 2 мм. Тепловой поток через изоляцию составлял $q_{\text{верх}}/(t_{\text{пов}} - t_{\text{в}}) = 30$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$). Упомянутую конструкцию и токоподводы крепили на корытообразном каркасе — пластине толщиной 1 мм. Боковые ребра перевернутого «корыта» располагались ниже теплоотдающей поверхности ($\Delta z = 10$ мм) и предотвращали массообмен через боковые грани. Пластины размещали в горизонтальном несущем давлении цилиндрическом сосуде размером 219×10 мм и длиной 1,6 м. Сосуд был подсоединен к наружному циркуляционному контуру, через который разогревали воду в сосуде и компенсировали давление. Соприкасающиеся с водой элементы сосуда и циркуляционного контура изготовлены из нержавеющей стали, за исключением листов теплоизоляции и медных токоподводов. Температуру пластины измеряли 12 разнесенными и прижатыми к ее верхней поверхности через слой слюды толщиной

10^{-2} мм кабельными хромель-алюмелевыми термопарами КТМС. Выводы термопар через сверления в теплоизоляции и каркасе, а также грани пластины гидроизолированы кремнеорганическим лаком. Также измеряли температуру воды (t_v) под теплоотдающей поверхностью и наружной поверхности сосуда по нижней, средней и верхней образующей. Кроме того, фиксировали давление в сосудах и электрическую мощность, подводимую к пластине.

Эксперименты проведены в следующем диапазоне режимных параметров: давление $p = 0,102-7,5$ МПа; $t_v = 20-195$ °С; $t_{\text{пов}} = 40-268$ °С; $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_v = 20-170$ °С; удельный тепловой поток на теплоотдающей поверхности $q = 8-186$ кВт/м². При $\beta \leq 3^\circ$ не наблюдали монотонного роста $t_{\text{пов}}$ по длине участка, и при обработке использовали среднеарифметическое значение показаний всех поверхностных термопар при $|(t - t_{\text{пов}})| < 5$ К. При $\beta > 3^\circ$ вследствие температурной стратификации воды учитывали лишь показания поверхностных термопар в верхней части пластины t_v .

Коэффициенты теплоотдачи составляли $\alpha = q/\Delta t = 200-1150$ Вт/(м²·К). Опытные данные обрабатывали в критериях, характерных для теплоотдачи при естественной конвекции $\text{GrPr} = (ql^3/\nu^2)\beta\Delta t\text{Pr}$; $\text{Nu} = \alpha l/\lambda$. Физические константы определяли при $t = 0,5(t_v + t_{\text{пов}})$. Диапазон изменения критериев составлял $\text{GrPr} = (2-950) 10^{10}$, $\text{Nu} = 92-700$. На рис. 1, а показаны графики такой обработки при двух предельных углах наклона пластины 0 и 13,3°. Удовлетворительное обобщение опытных данных (отклонение 95% точек от обобщающих линий составляет менее $\pm 10\%$) достигалось в случае применения соотношения

$$\text{Nu} = A (\text{GrPr})^n, \quad (1)$$

где $n = 0,25$. Попытка применения более высокого значения $n = 0,33$, в основном рекомендуемого в работах [7, 8] при столь высоких значениях GrPr , не дала удовлетворительных результатов. Коэффициент A увеличивался с ростом угла наклона пластины. На рис. 1, б обобщены результаты экспериментов, проведенных при 12 сочетаниях геометрических параметров пластины. Вне зависимости от длины и толщины пластины они обобщаются соотношением

$$A = 0,23 (1 + 4,7\beta) \pm 10\%, \quad (2)$$

где β , рад. Кривая 2 рассчитана по рекомендации [7]: $A = 0,26 (1 + \sin \beta)$ при $\beta = 0-90^\circ$, но при $\text{GrPr} < 10^9$. В работе [7] не указан экспериментальный материал, на основе которого предложена приведенная зависимость. Обобщая опытные данные при малых $\beta = 0-4^\circ$, она дает меньший по сравнению с имеющимся на графике рост A с увеличением β .

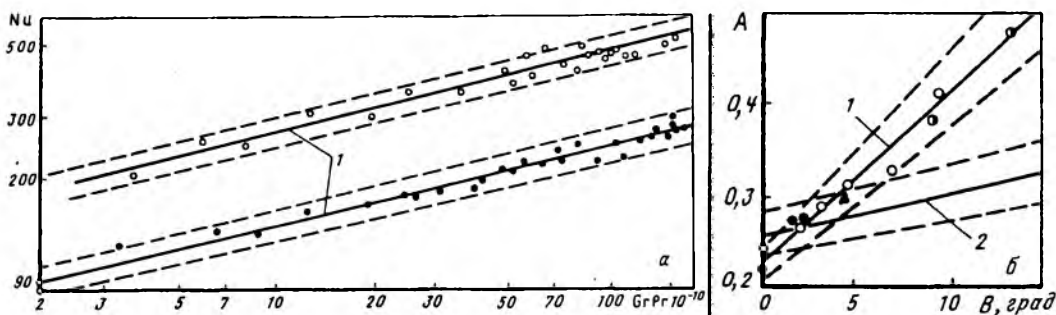


Рис. 1. Теплоотдача при естественной конвекции (вода): а — $l = 0,3$ м; $\delta = 0,2$ мм; β равно 0 (●) и $13,3^\circ$ (○); 1 — расчет по формуле (1) при A , равном 0,25 (●) и 0,48 (○); б — l равно 0,3 (●, ○) и 0,5 м (▲); δ равно 0,2 (●), 1 (○), 2 мм (○, ▲); 1, 2 — расчет по формуле (2) и [7] соответственно

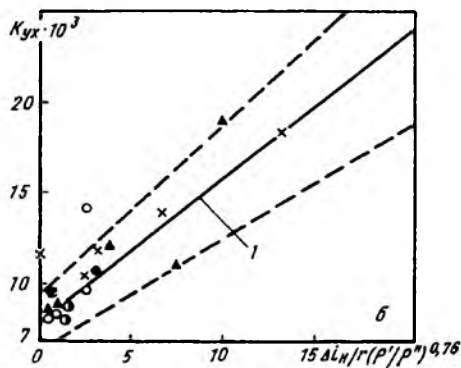
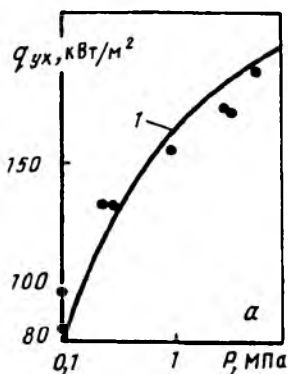
В работах [5, 6] сопоставляли коэффициенты теплоотдачи при объемном пузырьковом кипении ($\alpha_{\text{кип}}$) в случае охлаждения плоской поверхности сверху или снизу. При низких q значения $\alpha_{\text{кип}}$ при охлаждении снизу были немного выше (примерно на 20%). При более высоких q , но $q < q_{yx}$ значения $\alpha_{\text{кип}}$ были одинаковы при обоих видах ориентации теплоотдающей поверхности. В настоящей работе $\alpha_{\text{кип}}$ при относительной погрешности определения $|\delta\alpha_{\text{кип}}| \leq 0,3$ соответствовали рассчитанным по рекомендации [8] для кипения в «большом» объеме на охлаждаемой сверху поверхности ($\alpha_{\text{кип}}^{\text{расч}}$). При этом рекомендации [8] обобщали опытные данные и при существенном недогреве воды $\Delta t_{\text{н}} = t_{\text{н}} - t_{\text{в}} \leq 70$ К, если конвективный коэффициент теплоотдачи принимался равным $2 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Ухудшение теплоотдачи исследовали в следующем диапазоне режимных параметров: $p = 0,102 - 3,7$ МПа, $\Delta t_{\text{н}} = 0 - 115$ К. Учитывая существенные погрешности определения $\alpha = q/(t_{\text{пов}} - t_{\text{н}})$, ухудшение теплоотдачи ассоциировали с $q = q_{yx}$, при котором $\Delta t_{yx} = t_{\text{пов}} - t_{\text{н}} - q/\alpha_{\text{кип}}^{\text{расч}}$ превышала 10 К, что соответствовало снижению α в 2 раза по сравнению с $\alpha_{\text{кип}}^{\text{расч}}$. На рис. 2, а при одном из исследованных значений $\beta = 7^\circ$ ($l = 0,3$ м, $\delta = 2$ мм) представлена зависимость $q_{yx} = f(p)$ в опытах, проведенных при малом недогреве воды $\Delta t_{\text{н}} = t_{\text{н}} - t_{\text{в}} < 10^\circ \text{C}$. Эти данные обобщаются при постоянном, зависящем лишь от угла наклона поверхности β критерию Кутателадзе

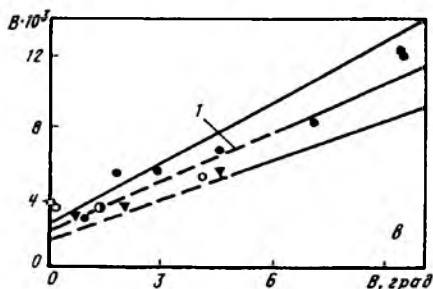
$$K_{yx} = \frac{q_{yx}}{r \sqrt[4]{g\sigma(\rho'')^2(\rho' - \rho'')}} = B.$$

Обобщение данных опытов, проведенных в более широком диапазоне $\Delta t_{\text{н}}$, достиглось (см. рис. 2, б) в случае применения соотношения

$$K_{yx} = B \left[1 + 0,1 \frac{C_p \Delta t_{\text{н}}}{r} \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,76} \right]. \quad (3)$$



Р и с. 2. Ухудшение теплоотдачи: а — $l = 0,3$ мм; $\delta = 0,2$ мм; $\beta = 7^\circ$; $\Delta t_{\text{н}} < 10$ К; l — $K_{yx} = B = 8 \cdot 10^{-3}$; б — $l = 0,3$ мм; $\delta = 2$ мм; $\beta = 7^\circ$; l — расчет по формуле (3) при $B = 8 \cdot 10^{-3}$; давление, МПа: 0,102 ($\times$), 0,28—0,5 ($\blacktriangle$), 0,6—0,8 ($\bullet$), 1—1,5 ($\circ$), 1,6—2,3 (∇), 2,5—3,2 ($\odot$); в — l — расчет по формуле (4) при l , равном 0,3 ($\bullet$, $\circ$, $\odot$) и 0,5 м ($\blacktriangledown$); δ , равном 0,2 ($\circ$), 1 ($\odot$), 2 мм ($\bullet$, $\blacktriangledown$)

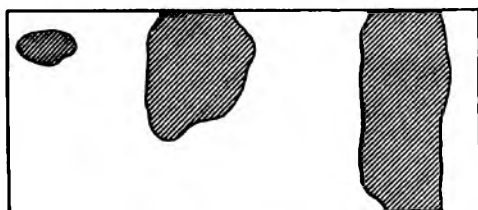


Соотношение (3) отличается от известной формулы [8] для охлаждаемой сверху поверхности лишь постоянной B , которая увеличивалась с ростом угла наклона. При $\beta \geq 3^\circ$ соотношение вида (3) обобщало опытные данные с разбросом не более $\pm 20\%$. При меньшем угле наклона разброс не превышал $\pm 30-35\%$. Таким образом, соотношение (3) описывает влияние давления и недогрева жидкости на относительное изменение q_{yx} при любой ориентации теплоотдающей поверхности относительно гравитационных сил. На рис. 2,а представлены значения B , рассчитанные по формуле (3) и обобщающие данные 233 опытов, которые получены при 14 сочетаниях геометрических параметров пластины. Представленные на графике данные вне зависимости от длины и толщины пластины обобщаются с разбросом $\pm 20\%$ соотношением

$$B = 2 \cdot 10^{-3} (1 + 25,8 \beta). \quad (4)$$

В исследованном диапазоне угла наклона пластины начало ухудшения теплоотдачи могла фиксировать любая поверхностная термопара, т.е. не было места преимущественной фиксации ухудшения. Одновременно начало ухудшения фиксировалось 1—4-й термопарами, т.е. носило локальный характер.

Дальнейшее увеличение мощности, подводимой к пластине, не приводило к резкому росту температуры теплоотдающей поверхности. Так, на горизонтальной пластине ($l = 0,3$ м, $\delta = 0,2$ мм, $p = 0,102$ МПа, $\Delta t_n = 0$) 7-кратное увеличение q по сравнению с q_{yx} , рассчитанным по формулам (3), (4), до $q_{\max} = 122$ кВт/м² не приводило к повышению температуры поверхности выше 350°C и лишь при средних по пластине значениях $q_{\max} = 390$ кВт/м² наблюдались локальные следы почернения ($t_{\text{пов}} = 900^\circ\text{C}$) (рис. 3). В анализируемых опытах период поддержания мощности при указанных значениях $q_{\max}$ составлял 1—1,5 мин, что, вероятно, превышало период стабилизации режима закризисной теплоотдачи. На рис. 4,а для пластины приведены данные авторов настоящей статьи и результаты работ [1, 3]. В работе [3] ухудшение теплоотвода (кризис) ассоциировалось с достижением температурой поверхности нижнего граничного (вероятно, стационарного) значения 400°C , в работе [1] кризис фиксировался до локальному покраснению поверхности, т.е. при



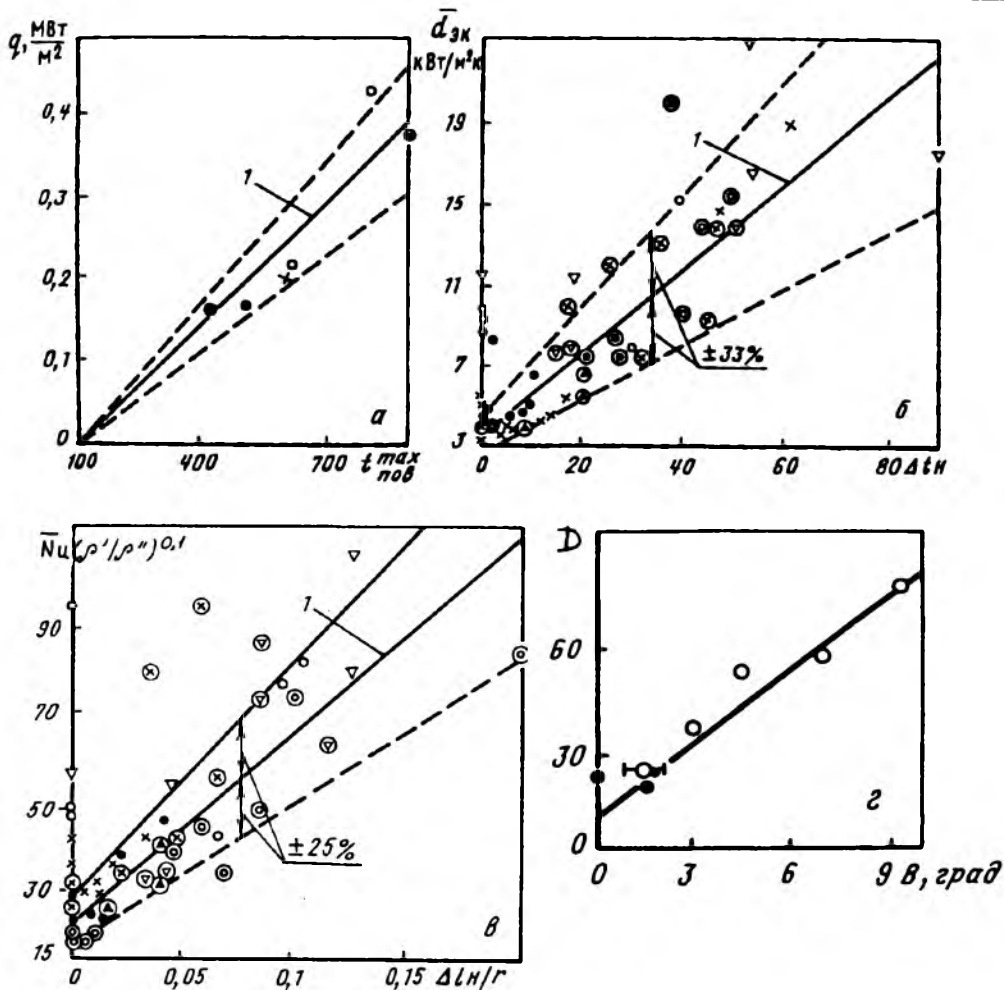
Р и с. 3. Расположение следов почернения поверхности горизонтальной пластины

сировался до локальному покраснению поверхности, т.е. при $t_{\text{пов}}^{\max} \approx 600^\circ\text{C}$. Представленные опытные данные с разбросом $\pm 20\%$ обобщаются кривой $l q = \alpha_{3k}^{\min} (t_{\text{пов}}^{\max} - t_n)$ при $\alpha_{3k}^{\min} = 0,5$ кВт/(м²·К). Как указывалось, ухудшение теплоотвода носило локальный характер и средние значения $\bar{\alpha}_{3k} = q / (t_{\text{пов}} - t_n)$, где

$$\bar{t}_{\text{пов}} = \sum_i (t_{\text{пов}})_i / n, \text{ определенные на основе показаний всех поверхностных термопар,}$$

для пластин толщиной 0,2 и 1 мм превышали $\alpha_{3k}^{\min}$ в 7—9 раз. При толщине пластины 2 мм увеличивались растечки тепла по поверхности пластины, и при сохранении таких же средних значений α_{3k} в 3—4 раза повышались $\alpha_{3k}^{\min}$.

Для пластин любой толщины наблюдался рост $(\alpha_{3k})_i$ с увеличением β , p , Δt_n . На рис. 4,б представлена зависимость $\bar{\alpha}_{3k} = f(\Delta t_n)$ при параметре p . На графике отсутствует расслоение опытных данных, полученных на пластинах разной длины. Поэтому при обобщении данных по $\bar{\alpha}_{3k}$ в виде $\bar{Nu} = \bar{\alpha}_{3k} l / \lambda'$ в качестве линейного размера l принята капиллярная постоянная $l_{\text{кап}} = \sqrt{\sigma / g(\rho' - \rho'')}$. На рис. 4,в в виде $\bar{Nu}(\rho' / \rho'')^{0,1} = f(\Delta t_n / r)$, где $\Delta t_n = C_p \Delta t_n$,



Р и с. 4. Закризисная теплоотдача: а — β равно 0 (●, ⊗, ×, ⊕) и 1,5° (○); $\delta = 0,2$ мм (⊗), остальные 1 мм; $\Delta t_k < 5$ К, × [1] при $l = 0,2$ м, ⊕ [3], ●, ⊗ — данные авторов настоящей статьи при $l = 0,3$ м; б — $\delta = 2$ мм; $\beta = 0,86-2,1^\circ$, условные обозначения точек см. на рис. 2, б (без обвода — при $l = 0,3$ м, с обводом — 0,5 м); 1 — расчет $\bar{\alpha}_{3к} = 3,5 (1 + 0,06 \Delta t_k)$; в — 1 — расчет по формуле (5) при $D = 23$; г — 1 — расчет по формуле (6) при δ , равном 1 (●) и 2 мм (○)

приведены те же опытные данные, что и на рис. 4, б. Основное число представленных данных обобщается соотношением

$$\overline{Nu} = D(1 + 20 \Delta i_n / r) (\rho'' / \rho')^{0,1}. \quad (5)$$

Соотношение вида (5) обобщает опытные данные и при иных углах наклона пластины. При этом постоянная D увеличивается с ростом β . Представленные на рис. 4, г данные обобщаются зависимостью

$$D = 10 (1 + 44,6\beta). \quad (6)$$

Такие значения $\alpha_{3к}$ получены и в опытах авторов со слабонаклонной ($\beta = 1,5^\circ$) тепловой трубой ($d_{\text{внут}} = 46$ мм, $l = 6$ м), где ухудшение теплоотдачи фиксировалось на верхней образующей трубы и соответствовало $\alpha_{3к} = 0,5-2$ кВт/(м²·К) при $q = 5-31$ кВт/м².

Приведенные результаты позволяют предположить следующий характер процесса: оторвавшиеся от теплоотдающей поверхности паровые пузыри перемещаются лишь вдоль этой поверхности. Сливаясь, они образуют паровые конгломераты, которые блокируют поверхность от воды, вызывая ухудшение теплоотдачи. Начало этого процесса, определяемого соответствующим значением $q_{yx} = f(\beta, p, \Delta t_{11})$, не должно быть связано с толщиной пластины. Длина пути перемещения пара (l) может оказывать негативное влияние на q_{yx} [1, 3]. Однако в работе [3] указывается, что при $l \geq 0,2$ м это влияние почти не ощущается. При движении вдоль теплоотдающей поверхности паровые конгломераты срывают капли с расположенного ниже водяного слоя, которые орошают теплоотдающую поверхность, тем самым повышая в несколько раз $\alpha_{3к}$ по сравнению с $\alpha = \lambda''/\delta_{п.с}$ (где λ'' — теплопроводность пара; $\delta_{п.с}$ — толщина парового слоя). Увеличение расхода пара ($G_{п}$) к верхнему торцу пластины (или при повышении теплового потока q) утолщает паровые конгломераты и их число на единицу теплоотдающей поверхности. Однако при этом возрастает скорость их движения и повышается интенсивность орошения поверхности каплями, сорванными конгломератами. Поэтому снижения $\alpha_{3к}$ с ростом $G_{п}$ не происходит. Последнее иллюстрируется данными, представленными на рис. 4,а, а также отсутствием места преимущественной фиксации максимальных значений $t_{пов}$ и расслоения данных по $\alpha_{3к}$, полученных на пластинах разной длины (см. рис. 4,б).

Использованный метод прижатия термопар к поверхности пластины не позволял корректно определять амплитуду и период высокочастотных пульсаций температуры теплоотдающей поверхности ($f \geq 1$ Гц), наблюдавшихся при ухудшении теплоотдачи.

Увеличение толщины теплоотдающей пластины (днища реактора) способствует выравниванию температуры по теплоотдающей поверхности и переходу от задачи с краевыми условиями $q = \text{const}$, что имело место в настоящих экспериментах, особенно при $\delta = 0,2, 1$ мм, к задаче при $t_{пов} = \text{const}$. Поэтому лишь усредненные по поверхности $\alpha_{3к}$ могут дать представление о соответствующих $\alpha_{3к}$, которые будут наблюдаться на поверхности днища реактора, расположенного в большом объеме.

Таким образом, на основе экспериментов, которые проведены на охлаждаемых снизу горизонтальных слабонаклонных плоских пластинах, расположенных в большом объеме, предложены зависимости для определения интенсивности теплоотдачи в некипящей воде (1), (2), начала ухудшения теплоотдачи при кипении на теплоотдающей поверхности (3), (4), а также интенсивности закризисной теплоотдачи (5), (6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грановский В.С., Сулацкий А.А., Шмелев С.М. Кризис пузырькового кипения на обращенной вниз горизонтальной поверхности. — Теплофиз. высоких темп., 1994, т. 32, № 1, с. 79—82.
2. Грановский В.С., Ефимов В.К., Черный О.Д. Экспериментальное определение критических тепловых потоков при наружном охлаждении корпуса реактора. — В кн.: Матер. Межд. конф. «Теплофизика-95». Обнинск, ноябрь 1995 г., т. 1, с. 190—195.
3. Безруков Ю.А. Исследование теплоотдачи от нижней части корпуса в аварии с плавлением топлива. — В сб.: Первая Российская нац. конф. по теплообмену. М., МЭИ, 1994, т. 4, с. 19—25.
4. Гогонин И.И., Кутателадзе С.С. К зависимости критического теплового потока от размера нагревателя при кипении жидкости в большом объеме. — Инж.-физ. журн., 1977, т. 33, № 5, с. 805—806.
5. Смирнов Г.Ф., Коба А.Л. Теплоотдача и критические тепловые нагрузки при кипении на перевернутой пластине, погруженной в свободный объем жидкости. — Вопросы радиоэлектроники, 1974, вып. 2, с. 70—73.
6. Jung D., Venurt J. Effects of enhanced surfaced and surface orientation on nuclear and film boiling heat transfer in R-11. — Intern. J. Heat Mass Transfer, 1987, v. 30, № 12, p. 2627—2639.
7. Теория теплообмена. Учебн. для вузов. Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа, 1979. 495 с.
8. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. М.: Энергоатомиздат, 1984. 294 с.