

фектов; в пятой — параметр пространственных эффектов Г. Из таблицы видно, что значения полученной эффективности для различно расположенных детекторов при $\Gamma = 0$ различаются на 10—15%. Описанный путь учета пространственных эффектов уменьшает эти различия не менее чем на порядок.

В заключение отметим, что описанные чисто экспериментальные пути учета пространственных эффектов при измерении реактивности оказались действенными для реактивности до $1,5-2\beta_{эф}$ на моделях быстрых энергетических реакторов с характерным размером примерно до 3,5 м. Для больших значений подкритичности, по-видимому, потребуется учет медленного изменения эффективности детектора и после окончания возмущения реактивности, а также поиск более достоверного закона изменения $E(t)$ при медленном возмущении реактора, чем закон (3). Надо также иметь в виду, что на систематические погрешности метода ОРУК при возрастании $|\rho|$ все большее влияние оказывают погрешности параметров запаздывающих нейтронов $\Delta\lambda_i, \Delta\lambda_i$. По предварительным оценкам погрешности в реактивности $-2\beta_{эф}$ по методу ОРУК, обусловленные погрешностями $\Delta\lambda_i, \Delta\lambda_i$, могут достигать 3—7% для времени после скачка реактивности 10—200 с соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бриккер И. Н. — Атомная энергия, 1966, т. 21, вып. 1, с. 9.
2. Monta K. — J. Nucl. Sci. Technol., 1967, v. 4, N 2, p. 51.
3. Могильнер А. И. и др. — Атомная энергия, 1974, т. 36, вып. 5, с. 358.
4. Сарылов В. Н. и др. — Атомная техника за рубежом, 1979, № 11, с. 19.
5. Mihalco J. e.a. — Nucl. Sci. Engng, 1967, v. 59, N 3, p. 350.
6. Kaiser R. — Nucl. Technol., 1975, v. 25, N 1, p. 138.
7. Allen J. e.a. — Trans. Amer. Nucl. Soc., 1974, v. 19, p. 417.
8. Колесов В. Е. и др. — Препринт ФЭИ-1162. Обнинск, 1981.
9. Баков А. Т. и др. — Препринт ФЭИ-1022. Обнинск, 1980.

Поступило в Редакцию 10.03.81

УДК 621.039.542:536.8

Теплообмен в газоохлаждаемых сборках с искусственной шероховатостью

МИНГАЛЕЕВА Г. С., МИРОНОВ Ю. В., РАЗИНА Н. С., ФОМИЧЕВА Т. И.

Для высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов важное значение имеет интенсификация теплообмена путем нанесения на поверхности твэлов искусственной шероховатости в форме небольших (высота ~0,1 мм) выступов, вызывающих турбулизацию пограничного слоя. Гидродинамика и теплообмен в каналах с шероховатыми твэлами интенсивно исследовались в последние годы как в нашей стране, так и за рубежом. При этом обширный эмпирический материал получен преимущественно для одиночных твэлов в круглых трубах (кольцевые каналы). В работе [1] предложен эффективный метод переноса данных с кольцевых каналов на пучки стержней. Этот метод основан на универсальных логарифмических профилях скорости и температуры в окрестности шероховатой поверхности:

$$u^+ = 2,5 \ln \frac{y}{n} + R(h^+);$$

$$t^+ = 2,5 \ln \frac{y}{n} + G(h^+),$$
(1)

где $u^+ = u/u^*$; u — локальная скорость потока на расстоянии y от шероховатой поверхности; u^* — динамическая скорость потока в канале; h — высота выступов; $t^+ = c\mu^*(T_w - T)/q$ — безразмерная температура; c и μ — теплоемкость и плотность газа; T — температура газа; T_w — температура стенки; q — тепловой поток; функции R и G в формуле (1) зависят от безразмерной высоты шероховатости $h^+ = hu^*/\nu$ (ν — кинематическая вязкость газа).

Как показывают опыты, функция шероховатости $R(h^+)$, определяющая величину трения, зависит не только от основных параметров выступов (высоты h , ширины b и шага p), но и от формы их, радиусов скругления кромки и т. п., т. е. от параметров, определяемых технологией нанесения шероховатости. В связи с этим обобщенные корреляции для $R(h^+)$ в данное время получены лишь для простейших форм выступов (например, для прямоугольных [1] и трапециевидных [2]). В остальных случаях целесо-

образно использовать непосредственно значения, полученные из опытов с конкретным видом шероховатости.

Для расчета гидравлики и теплообмена в стержневых газоохлаждаемых сборках на базе программы ПУЧОК БМ [3] была разработана новая версия ее — ПУЧОК БМ-RIP, в которой к элементарным ячейкам проходного сечения пучка зависимости (1) применяются на основе принципа «эквивалентного кольца». Эта программа позволяет проводить расчеты охлаждения стержневыхборок с использованием корреляций, полученных для конкретных видов шероховатости и определяющих трение и теплообмен в зависимости от локальных условий в ячейках. Для функции $R(h^+)$ использовалось выражение [1]:

$$R(h^+) = R(\infty) + 0,4 \ln \left(100 \frac{h}{\hat{y}} \right) + \frac{5}{\sqrt{h_w^+}} \times$$

$$\times \left(\frac{T_w}{T} - 1 \right)^2 + \frac{5100}{h_w^{+3}} \quad (2)$$

где \hat{y} — расстояние от стенки до линии нулевых касательных напряжений эквивалентного кольца; $R(\infty)$ — авторемодельное значение функции R при больших h^+ .

На рис. 1 сопоставлены результаты расчета перепада давления Δp по программе ПУЧОК БМ-RIP с опытными

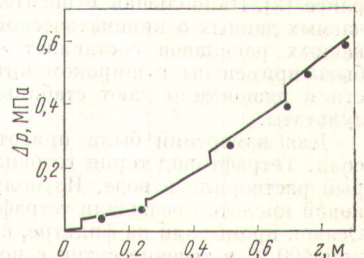


Рис. 1. Сопоставление расчета (—) по программе ПУЧОК БМ-RIP с опытными данными (●) для 12-стержневой модели [4]

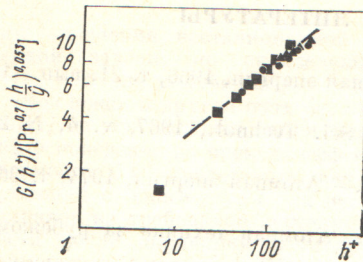


Рис. 2. Корреляция данных работы [5] по теплообмену в зависимости от шероховатости по формуле (3) при $h = 0,1$ (○); $0,75$ (▲) и $0,05$ мм (■)

данными для 12-стержневой модели, охлаждаемой гелием [4], при этом функция $R(\infty)$ вычислялась по корреляциям (2) с поправочным множителем для трапецидальной формы согласно работе [2].

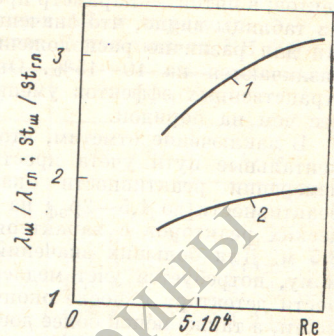
Исследования технологичных форм шероховатости были выполнены в ВТИ им. Ф. Э. Дзержинского [5]. Однако эти результаты были преобразованы по методу Wilkie [6], что, как показано в работе [1], может привести к значительным ошибкам при непосредственном переносе их на стержневые сборки. Пересчет данных работы [5] к форме (1) для шероховатости оптимальных в теплогидравлическом смысле параметров ($h = 0,05 \div 0,1$ мм; $b/h = 2$; $p/h = 10$) дает при $h^+ > 100$ значения функции $R(h^+) \infty$ в диапазоне от 7,0 до 7,6. Данные для функции $G(h^+)$, определяющей теплоотдачу, хорошо обобщаются корреляцией, предложенной в работе [1] (рис. 2):

$$G(h^+) = K_1 (h^+)^{K_2} Pr^{0,7} \sqrt{\frac{T_w}{T}} \left(\frac{h}{y}\right)^{0,053} \quad (3)$$

где K_1 и K_2 — постоянные, характерные для каждого вида шероховатости.

Эффективность исследованного в работе [5] типа шероховатости с высотой выступов 0,1 мм для кассеты газоохлаждаемого реактора, рассмотренной в работе [3], пред-

ставлена на рис. 3, где параметры гладкого пучка вычислялись по принятым в формуле (3) зависимостям. Как показывают проведенные расчеты, увеличение числа Стантона St в шероховатых сборках в 1,7–2 раза сопровождается в рассматриваемом диапазоне чисел Рейнольдса увеличением коэффициента гидравлического трения соответственно в 2,4–3,2 раза.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dalle Donne M., Meyer L. — Intern. J. Heat Mass Transfer, 1977, v. 20, N 6, p. 583.
2. Han J. e.a. — Ibid., 1978, v. 21, N 8, p. 1143.
3. Мингалеева Г. С., Мионов Ю. В. — Атомная энергия, 1980, т. 48, вып. 5, с. 303.
4. Dalle Donne M. e.a. — Nucl. Engng Design, 1977, v. 40, p. 143.
5. Лельчук В. Л. и др. — Теплоэнергетика, 1980, № 2, с. 57.
6. Wilkie D., White L. — J. Brit. Nucl. Energy Soc., 1967, v. 6, N 1, p. 48.

Поступило в Редакцию 16.03.81

УДК 532.133.14:546.161

Плотность и кинематическая вязкость расплавов $\text{NaF} - \text{ThF}_4$ и $\text{KF} - \text{ThF}_4$

ДЕСЯТНИК В. Н., КЛИМЕНКОВ А. А., КУРБАТОВ Н. Н., НЕЧАЕВ А. И., РАСПОПИН С. П., ЧЕРВИНСКИЙ Ю. Ф.

Температурные зависимости плотности ρ и кинематической вязкости ν расплавленных бинарных смесей $\text{NaF} - \text{ThF}_4$ и $\text{KF} - \text{ThF}_4$ были измерены во всем интервале концентраций тетрафторида тория. Плотность определяли методом максимального давления в пузырьке газа (очищенного аргона). Измерения проводили в тиглях из стеклоуглерода при помощи никелевых капилляров, заточенных «на нож», что обеспечивало погрешность не более 1%. Для измерения вязкости использовалось затухание крутильных колебаний цилиндрического молибденового тигля, наполненного исследуемой жидкостью [1]. Методика эксперимента и установка для измерения описаны ранее [2]. Наибольшая относительная погрешность получаемых данных о кинематической вязкости для рассматриваемых расплавов составляет ~3%. Оба метода могут быть применены в широком интервале значений плотности и вязкости и дают стабильные воспроизводимые результаты.

Для измерений были приготовлены чистые исходные соли. Тетрафторид тория готовили из тетрахлорида, который растворяли в воде. Из полученного раствора плавиковой кислотой осаждали тетрафторид в виде $\text{ThF}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Осадок промывали на фильтре, сушили в никелевой чашке при 100 °С в течение суток с последующим вакуумированием при постепенном повышении температуры вплоть до

плавления. Фториды натрия и калия готовили по известным методикам [3].

Экспериментальные результаты обрабатывали методом наименьших квадратов. Для всех расплавов в изученном интервале температуры установлена линейная зависимость ρ и экспоненциальная зависимость ν от температуры (K). Значения плотности и вязкости чистых фторидов натрия и калия хорошо согласуются с опубликованными [4, 5]. Высокая температура плавления тетрафторида тория не позволила измерить его плотность указанным методом, поэтому для последующих расчетов были использованы известные данные [4] и уравнение температурной зависимости плотности ThF_4 : $\rho = 7,08 - 0,759 \cdot 10^{-3} T$. По экспериментальным данным во всем интервале концентрации были рассчитаны молярные объемы V и их относительные отклонения от аддитивных значений $\Delta V/V_{\text{ад}}$, динамическая η и молярная ν вязкости, энергия активации вязкого течения E_{ν} . Температурные изменения η и ν также хорошо описываются экспоненциальными зависимостями. Результаты измерений и расчетные значения показаны в таблице в виде коэффициентов уравнений температурной зависимости плотности (табл. 1) и вязкости (табл. 2). Здесь же приведены средние квадратические отклонения S , используемые в качестве показателя точности, с которой выбранный тип уравнения описывает