

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В БЫСТРЫХ РЕАКТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДЯНОГО СТЕНДА

**В.И. Слободчук, Д.А. Уралов, Е.А. Аврамова**

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ  
249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*



Представлена оценка возможности моделирования естественной конвекции в баке быстрого реактора с использованием водяных стендов. В качестве реактора, подлежащего моделированию, принят проект БН-1200. Анализируется проблематика теплогидравлического моделирования движения теплоносителя в реакторах типа БН. При обосновании модели применялись теория подобия и метод «черных ящиков», рассмотрены их принципы и границы применения. Определяющие критерии подобия и их перечень получены из базовых дифференциальных уравнений для естественной циркуляции теплоносителя. На их основе получен комплекс безразмерных величин, определяющих соотношение характеристик модели и реакторной установки. Получены соотношения, позволяющие оценить коэффициенты пересчета величин с модели на реакторную установку. Эти выражения зависят только от теплофизических параметров сред, геометрического масштаба и отношения мощностей модели и реакторной установки. Представлены условия, при которых возможно моделирование течения натриевого теплоносителя с применением водяного стенда при достаточной точности. Используются опыт зарубежных исследований по рассматриваемой теме, в том числе принимаемые допущения. Согласно имеющимся оценкам, подобные допущения не приводят к значительным потерям в точности моделирования.

**Ключевые слова:** быстрые реакторы, естественная циркуляция, теплогидравлическое моделирование, теория подобия.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ядерной энергетике большое внимание уделяется проектам реакторных установок (РУ), использующих жидкометаллические теплоносители, и реакторы, работающие на быстрых нейтронах. Это обусловлено большим потенциалом применения энергоблоков с такими РУ в целях не только выработки электроэнергии, но и расширенного воспроизводства ядерного топлива, а также переработки отработанного топлива, что в перспективе позволит организовать замкнутый топливный цикл АЭС. Организация такого цикла является важнейшей задачей в рамках программы повыше-

© В.И. Слободчук, Д.А. Уралов, Е.А. Аврамова, 2021

ния устойчивости ядерной энергетики и перехода к четвертому поколению ядерных реакторов во многих странах, в том числе в России.

Технологии реакторов, на которых предполагается базировать замкнутый цикл топлива, должны быть в достаточной мере изучены и апробированы в соответствии с принятым консервативным подходом. Научно-экспериментальная база рассматриваемых проектов может быть, в частности, подкреплена результатами экспериментов по моделированию теплогидравлических характеристик РУ.

В некоторых проектах реакторных установок на быстрых нейтронах, например, БН-1200, в качестве теплоносителя рассматривается натрий, поскольку он обладает оптимальными нейтронно-физическими и теплогидравлическими характеристиками, совместимостью с различными конструкционными материалами, относительной простотой поддержания его чистоты при эксплуатации и сравнительно низкой стоимостью. Однако натрий проявляет высокую химическую активность при контакте с водой, сопровождающуюся выделением огромного количества энергии. Кроме того, экспериментальные установки, предназначенные для изучения его характеристик, должны быть оснащены дополнительными системами обогрева и очистки натрия холодными ловушками. Необходимо применение электромагнитных насосов, усложняющих и удорожающих технологические схемы. Таким образом, хотя использование натрия в промышленных установках широко распространено, его применение в исследовательских стендах оказывается невыгодным.

Целью исследования является оценка возможности моделирования на воде теплогидравлических процессов в жидкометаллическом теплоносителе, протекающем в верхней камере реактора в условиях естественной циркуляции. В 90-х годах прошлого столетия японские исследователи предположили, что с учетом определенных допущений моделирование теплогидравлических характеристик жидкого натрия возможно на водяных стендах. Эта идея была подтверждена в ряде работ [1 – 6]. Применение водяных установок позволяет получить более детальное представление о физике процессов, протекающих в натриевом контуре. Результаты подобных исследований позволят упростить процесс экспериментального моделирования, например, для процессов расхолаживания быстрых реакторов.

Исследования такого типа базируются на двух основных подходах – методе «черных ящиков» и теории подобия [1 – 9]. Необходимость применения теории подобия продиктована большим количеством аргументов, от которых зависят искомые величины при традиционных численных и экспериментальных методах. Объединяя физические величины в безразмерные комплексы, данная методика позволяет значительно сократить число аргументов, облегчая расчет.

Важнейшими условиями применения теории подобия являются геометрическое и временное подобие модели и реальной системы. В качестве референтной установки в работе принята РУ с реактором БН-1200. Это обусловлено актуальностью данного проекта в отечественной ядерной отрасли на данный момент [10, 11]. РУ БН-1200 является одним из примеров установок, использующих натриевый теплоноситель. В качестве модели выбранной установки, выполненной в масштабе 1:10, рассматривается исследовательский стенд В-200 (САРХ). Его технологическая схема отражает организацию циркуляции теплоносителя первого контура реактора БН в номинальном режиме и режиме расхолаживания. Размещение оборудования на стенде соответствует расположению оборудования в реальной РУ. Схематичное представление стенда, разработанное авторами на основании документации САРХ, показано на рис. 1.

В силу невозможности детально воссоздать миниатюрную копию такого оборудования, как активная зона и теплообменники, применяется методика «черных ящиков» – упрощенных объектов, имитирующих интегральные характеристики реального оборудования. Движение жидкости в них предполагается однонаправленным (параллельно силе

тяжести) в условиях равного сопротивления ускорению (или равного замедления)  $f^{core}$ ,  $f^{DNX}$ ,  $f^{INX}$  (т.е. в активной зоне – core, теплообменнике системы аварийного отвода тепла (САОТ) – ДНХ, промежуточном теплообменнике – ИНХ) и равномерного объемного тепловыделения  $H^{core}$ ,  $H^{DNX}$ ,  $H^{INX}$  (далее в работе  $Q_v^{core}$ ,  $Q_v^{DNX}$ ,  $Q_v^{INX}$ ). Установка с такими характеристиками была использована в экспериментах японских исследователей, ее схема представлена на рис. 2 [3].

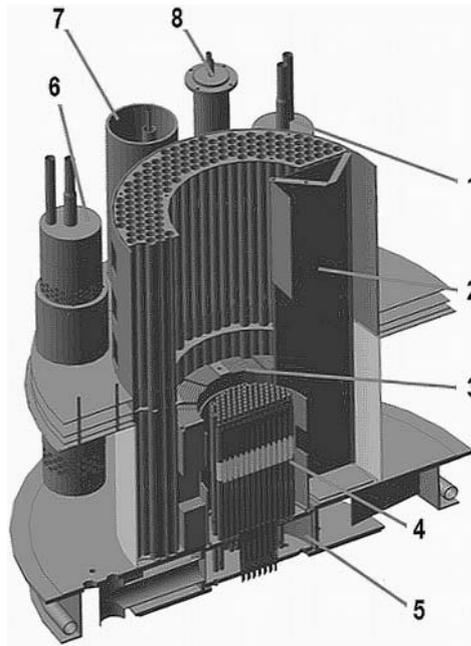


Рис. 1. Конструкция стенда SAPHIR с разрезом по элеваторной выгородке: 1, 6 – промежуточные теплообменники (ПТО); 2 – элеваторная выгородка; 3 – элементы внутрибаковой защиты; 4 – активная зона с имитаторами ТВС; 5 – напорная камера реактора; 6 – имитатор главного циркуляционного насоса (ГЦН); 8 – аварийный теплообменник (АТО)

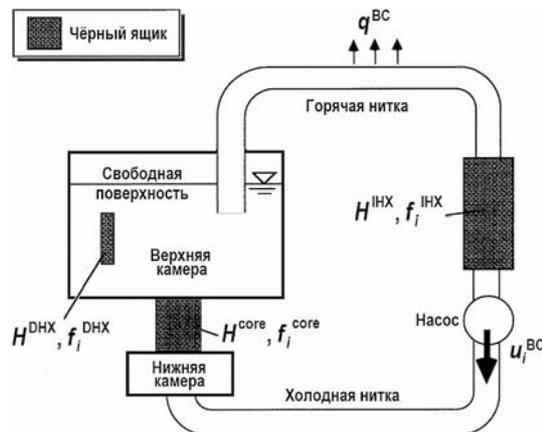


Рис. 2. Модель петли первого контура РУ с использованием «черных ящиков»

Таким образом, относительно «черных ящиков» известны лишь задаваемые параметры на входе и получаемые выходные данные, которые сравниваются с требуемыми значениями. Подробности протекания процессов в самих объектах не берутся во внимание либо в целом недоступны для наблюдения. Предлагаемая методика обеспечивает точность оценки параметров, приемлемую для практики и сопоставимую с точностью рас-

четов по верификационным кодам [1 – 6].

В работе рассматривается моделирование процесса развитой естественной конвекции в жидкометаллическом теплоносителе в верхней камере реактора с помощью водяного стенда. С точки зрения гидродинамических характеристик жидкий натрий и вода ведут себя очень схожим образом, поэтому гидродинамическое моделирование потоков одной среды с использованием другой не вызывает затруднений. Однако в моделировании тепловых процессов возникает сложность, связанная с тем, что критерий Прандтля жидкого натрия на три порядка меньше, чем для воды. При рассмотрении естественной циркуляции в пристенном слое обнаруживается, что число Нуссельта для воды зависит от произведения  $Gr\text{Pr}$ , а для жидких металлов – от  $Gr\text{Pr}^2$ . Конвективный теплообмен в каналах также выражается разными критериальными зависимостями для водной и жидкометаллической сред. Таким образом, при экспериментальном моделировании процессов естественной конвекции в верхней камере быстрого реактора необходимо исключить из рассмотрения условия теплообмена на стенках, заменить которые можно расчетами по кодам, одновременно упростив исходные дифференциальные уравнения.

Исходя из поставленных условий можно получить систему критериев подобия, представленную следующими выражениями:

- $Eu = \Delta p / (\rho U^2)$  – критерий Эйлера;
- $Ri = g\beta\Delta T L / U^2$  – критерий Ричардсона;
- $Re = UL / \nu$  – критерий Рейнольдса;
- $Pe = UL / a$  – критерий Пекле;
- $Ho = \tau^* = \tau U / L$  – критерий гомохронности;
- $N = Q / (\rho C U L^2 \Delta T)$  – безразмерный комплекс, отражающий баланс тепла.

Здесь  $\Delta p$  – перепад давления, Па;  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $U$  – характерная скорость потока жидкости,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $\beta$  – коэффициент теплового расширения,  $1/\text{K}$ ;  $\Delta T$  – характерная разница температуры,  $\text{K}$ ;  $L$  – характерный размер,  $\text{м}$ ;  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\tau$  – характерное время,  $\text{с}$ ;  $Q$  – тепловая мощность,  $\text{Вт}$ ;  $C$  – удельная теплоёмкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

В режиме перехода от принудительной циркуляции к естественной, а также в режиме установившейся естественной циркуляции определяющее значение имеют критерии Ричардсона и Эйлера. Влияние чисел Рейнольдса и Пекле в данном случае не играет определяющей роли [12].

Результаты исследований показывают, что при моделировании естественной конвекции в реакторе с использованием воды теоретически целесообразно использовать модели малых размеров, чтобы повысить мощность энерговыделения в модели и перепад температуры до приемлемых величин. При остаточном энерговыделении в реакторе БН-1200 в 75 МВт в экспериментальной модели масштабом 1:10 мощность энерговыделения составляет порядка 400 Вт при крайне небольших значениях скорости и перепадов температуры. Поэтому приходится увеличивать мощность энерговыделения в модели практически на три порядка, при этом значения скорости в модели увеличиваются на порядок, а значения перепадов температуры увеличиваются на два порядка.

## ПОЛУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ МАСШТАБОВ

Для получения уравнений, описывающих конвективный теплообмен при естественной конвекции, запишем переменную температуру и переменную плотность жидкости соответственно:

$$T = T_0 + T', \quad (1)$$

$$\rho = \rho_0 + \rho', \quad (2)$$

где  $T_0$  и  $\rho_0$  – некие постоянные средние значения температуры и плотности, от которых отсчитывается неравномерность значений;  $T'$  и  $\rho'$  изменения (неравномерность) значений температуры и плотности. Ввиду малости изменения температуры  $T'$  мало также и вызываемое им изменение плотности  $\rho'$ :

$$\rho' = (\partial\rho/\partial T)T' = -\rho_0\beta T'. \quad (3)$$

При этом в выражении для давления

$$p = p_0 + p' \quad (4)$$

величина  $p_0$  (значение, от которого отсчитывается изменение величины  $p'$ ) не будет постоянной. Она определяется давлением, соответствующим механическому равновесию при постоянных температуре и плотности ( $T_0$  и  $\rho_0$ ). Это значение давления меняется с высотой согласно гидростатическому уравнению

$$p_0 = \rho_0 g z + \text{const}, \quad (5)$$

для которого координата  $z$  отсчитывается вертикально вверх.

Введем преобразование уравнения Навье-Стокса, которое в поле сил тяжести имеет следующий вид [13 – 17]:

$$\partial v/\partial t + (v\nabla)v = -\nabla p/\rho + \nu\Delta v + g. \quad (6)$$

Здесь  $t$  – время;  $v$  – векторное поле скорости;  $\nabla$  – векторный дифференциальный оператор Гамильтона;  $\Delta$  – векторный оператор Лапласа;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости. Подставляя выражения для переменных давления и плотности, получаем

$$\frac{\nabla p}{\rho} = \frac{\nabla p_0}{\rho_0} + \frac{\nabla p'}{\rho_0} - \frac{\nabla p_0}{\rho_0^2} \rho'. \quad (7)$$

Подставляя (3) и (5) имеем

$$\frac{\nabla p}{\rho} = g + \frac{\nabla p'}{\rho_0} + g\beta T'. \quad (8)$$

Подставив это выражение в уравнение Навье-Стокса и вводя коэффициент Кронекера  $\delta_{ij}$ , получим окончательно

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v\nabla)v = -\frac{\nabla p'}{\rho_0} + \nu\Delta v - g\beta T'\delta_{ij}, \quad (9)$$

где  $\delta_{ij} = 1$  при  $i = j$  и  $\delta_{ij} = 0$  в остальных случаях.

Запишем уравнение теплопереноса в несжимаемой жидкости, опуская компонент, содержащий вязкость, поскольку при свободной конвекции он мал по сравнению с другими членами уравнения:

$$\frac{\partial T'}{\partial t} + v\nabla T' = a\Delta T'. \quad (10)$$

Вместе с уравнением неразрывности потока

$$\text{div } v = 0 \quad (11)$$

выражения (9) и (10) составляют полную систему уравнений, описывающих свободную конвекцию. Однако необходимо сделать некоторые поправки, учитывающие введение в систему понятия «чёрный ящик». Введем дополнительно  $f_i$  – сопротивление ускорению, действующее внутри «чёрного ящика»,  $Q/(\rho C)$  – преобразованный вид объемного тепловыделения внутри «чёрного ящика»;  $S(\Omega)$  – коэффициент, равный единице внутри «чёрного ящика» и нулю вне него. В данном случае  $Q$  представляет собой объёмное тепловыделение, Вт/м<sup>3</sup>. С учетом этих величин система уравнений конвекции примет конечный вид:

$$\operatorname{div} v = 0;$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla) v = -\frac{\nabla p'}{\rho} + \nu \Delta v - g \beta T' \delta_{ij} + f_i S(\Omega); \quad (12)$$

$$\frac{\partial T'}{\partial t} + v \nabla T' = a \Delta T' + \frac{QS(\Omega)}{\rho c}.$$

Эту систему необходимо дополнить следующими граничными условиями:  $v_i = 0$  – скорость на границе со стенкой;  $p = p_0$  – давление на границе свободной поверхности;  $q_i = q_i^{\text{BC}}$  – плотность теплового потока на границе жидкости (т.е. при граничном условии), Вт/м<sup>2</sup> [2].

Для получения масштабов величин скорость, давление, температура, координаты, время и плотность теплового потока должны быть представлены в безразмерной форме (отмечены индексом «\*»). В этом виде величины выражаются через характерные скорости  $U$ , разницу температуры  $\Delta T$  и размер  $L$ :

$$U_i^* = v_i/U; \quad p^* = p'/(pU^2); \quad T^* = T'/\Delta T; \quad x_i^* = x_i/L; \\ t^* = tU/L; \quad q_i^* = q_iL/(a\Delta T\rho c). \quad (13)$$

Подставив эти величины в систему (12), получаем

$$\frac{\partial U_i^*}{\partial t^*} = 0; \\ \frac{\partial U_i^*}{\partial t^*} + U_j^* \frac{\partial U_i^*}{\partial x_j^*} = \left(\frac{\nu}{UL}\right) \frac{\partial^2 U_i^*}{\partial x_j^{*2}} - \left(\frac{\beta \Delta T g L}{U^2}\right) T^* \delta_{ij} - \frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \left(\frac{fL}{U^2}\right) S(\Omega); \quad (14) \\ \frac{\partial T^*}{\partial t^*} + U_j^* \frac{\partial T^*}{\partial x_j^*} = \left(\frac{a}{UL}\right) \frac{\partial^2 T^*}{\partial x_j^{*2}} + \left(\frac{QL}{\rho c U \Delta T}\right) S(\Omega).$$

Комплексы, выделенные круглыми скобками в системе (14), представляют собой безразмерные величины, масштабы, равенства которых необходимо добиться для достижения идентичности модели и натурального объекта. Выпишем их:

$$N_1 = \nu/UL; \quad N_2 = g\beta\Delta TL/U^2; \quad N_3 = fL/U^2; \quad N_4 = a/UL; \quad N_5 = QL/(\rho c U \Delta T). \quad (15)$$

Можно заметить, что некоторые из этих комплексов соответствуют известным критериям подобия [18 – 20]:

$$N_1 = \nu/UL = 1/Re; \quad N_2 = g\beta\Delta TL/U^2 = Ri; \quad N_4 = a/UL = 1/Pe.$$

Критерий  $N_3$  может быть преобразован до более простого вида с использованием перепада давления  $\Delta p$ . Общая сила сопротивления, действующая против движения жидкости в «чёрном ящике», может быть выражена как

$$k_1 \rho L^3 f = k_2 L^2 \cdot \Delta p, \quad (16)$$

где произведения  $k_1 \rho L^3$  и  $k_2 L^2$  представляют собой массу и поперечное сечение соответственно. Выражение (16) можно привести к виду  $f = k_3 \cdot \Delta p / \rho L$ , где  $k_3 = k_2 / k_1$ , а величины  $k_1, k_2, k_3$  представляют собой пропорциональные константы благодаря геометрическому подобию, тогда

$$N_3 = k_3 \cdot \Delta p / \rho U^2. \quad (17)$$

Критерий  $N_5$  тоже можно преобразовать схожим образом, вводя величину  $Q_0$  – общее количество тепла, передаваемого в секунду в «чёрном ящике». Свяжем её с объёмным тепловыделением через коэффициент пропорциональности  $k_1$  [3]:

$$Q_0 = k_1 L^3 Q. \quad (18)$$

Теперь в преобразованном виде для естественной циркуляции список критериев подобия выглядит так:

$$\begin{aligned} N_1 &= v/UL = 1/Re; \\ N_2 &= g\beta\Delta TL/U^2 = Ri; \\ N_3 &= \Delta p/\rho U^2; \\ N_4 &= a/UL = 1/Pe; \\ N_5 &= Q_0/(\rho CU\Delta TL^2). \end{aligned}$$

### Вывод отношений величин между моделью и объектом

Выражения критериев  $N_2$  и  $N_5$  удовлетворяют равенствам этих величин для модели и натурального объекта [3]:

$$(g\beta\Delta TL/U^2)_m = (g\beta\Delta TL/U^2)_r, \quad (19)$$

$$[Q_0/(\rho CU\Delta TL^2)]_m = [Q_0/(\rho CU\Delta TL^2)]_r, \quad (20)$$

где индексы « $m$ » и « $r$ » обозначают соответственно модель и реакторную установку.

Отсюда можем получить отношения характерных величин. Из первого выражения получим

$$U_m^2/U_r^2 = (g\beta\Delta TL)_m / (g\beta\Delta TL)_r = [(g\beta L)_m / (g\beta L)_r] \cdot [\Delta T_m / \Delta T_r]. \quad (21)$$

Из уравнения (20) выразим

$$\Delta T_m / \Delta T_r = [Q_0/(\rho CUL^2)]_m / [Q_0/(\rho CUL^2)]_r. \quad (22)$$

Подставив (22) в (21), получим

$$U_m^2/U_r^2 = [(Q_0g\beta)/(\rho CUL)]_m \cdot [(\rho CUL)/(Q_0g\beta)]_r \quad (23)$$

или, перенеся скорость в левую часть и избавившись от степени,

$$U_m/U_r = (Q_m/Q_r)^{1/3} \cdot [(\beta g)_m / (\beta g)_r]^{1/3} \cdot [(\rho C)_r / (\rho C)_m]^{1/3} \cdot (L_r/L_m)^{1/3}. \quad (24)$$

Используя это соотношение, получим новое выражение для отношения температур, подставив его в (22):

$$\Delta T_m / \Delta T_r = (Q_m/Q_r)^{2/3} \cdot [(\beta g)_r / (\beta g)_m]^{1/3} \cdot [(\rho C)_r / (\rho C)_m]^{2/3} \cdot (L_r/L_m)^{5/3}. \quad (25)$$

Выведем соотношения для перепадов давления и характерного времени:

$$\Delta p_m / \Delta p_r = \rho_m / \rho_r \cdot (Q_m/Q_r)^{2/3} \cdot [(\beta g)_m / (\beta g)_r]^{2/3} \cdot [(\rho C)_r / (\rho C)_m]^{2/3} \cdot (L_r/L_m)^{2/3}, \quad (26)$$

$$\tau_m / \tau_r = (Q_r/Q_m)^{1/3} \cdot [(\beta g)_r / (\beta g)_m]^{1/3} \cdot [(\rho C)_m / (\rho C)_r]^{1/3} \cdot (L_m/L_r)^{4/3}. \quad (27)$$

Запишем также отношения для критериев Рейнольдса и Пекле:

$$Re_m / Re_r = v_r/v_m \cdot (Q_m/Q_r)^{1/3} \cdot [(\beta g)_m / (\beta g)_r]^{1/3} \cdot [(\rho C)_r / (\rho C)_m]^{1/3} \cdot (L_m/L_r)^{2/3}, \quad (28)$$

$$Pe_m / Pe_r = a_r/a_m \cdot (Q_m/Q_r)^{1/3} \cdot [(\beta g)_m / (\beta g)_r]^{1/3} \cdot [(\rho C)_r / (\rho C)_m]^{1/3} \cdot (L_m/L_r)^{2/3}. \quad (29)$$

Таким образом, получены соотношения, позволяющие оценить коэффициенты пересчета величин с модели на реакторную установку. Эти выражения зависят только от теплофизических параметров сред, геометрического масштаба и отношения мощностей модели и реакторной установки.

### Оценка коэффициентов пересчета величин с модели на объект

Как показано в работах [1 – 6], в экспериментах при переходе от принудительной циркуляции к естественной в определенный момент времени фиксируется повышение температуры теплоносителя. В этой связи важна не только сама величина роста температуры до пикового значения в переходном процессе, но и время возникновения данного пика. По этой причине помимо коэффициентов пересчета скорости, давления и температуры рассматривается также и коэффициент пересчета по времени. В качестве моделируемого объекта рассматривается проект реакторной установки БН-1200. Поскольку к настоящему времени окончательные характеристики БН-1200 не определены, полученные коэффициенты пересчета могут быть уточнены по мере конкретизации проек-

тных характеристик РУ. В данном случае, если в качестве модели РУ принят стенд В-200 с характеристиками в режиме естественной циркуляции, то оцененные коэффициенты пересчета получены с использованием параметров, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры модели и реакторной установки, используемые для получения коэффициентов пересчета**

Параметр	Для модели	Для РУ
Плотность теплоносителя, кг/м <sup>3</sup>	971	800
Расход G, м <sup>3</sup> /ч	6,6	7356
Масштабный фактор $L_r/L_m$	22,3 (10)*	
Кинетическая вязкость $\mu$ , м <sup>2</sup> /с	$0,55 \cdot 10^{-6}$	$0,28 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент объёмного расширения $\beta$ , 1/К	$0,53 \cdot 10^{-3}$	$0,62 \cdot 10^{-3}$
Тепловая мощность Q, МВт	0,00833	75
Удельная теплоёмкость $C_p$ , кДж/(кг·К)	4,1	1,2
* В качестве определяющего размера принят диаметр корпуса		

Используя представленные параметры и приведенные выражения коэффициентов пересчета величин (24) – (27), получим следующие значения для различного геометрического масштаба (табл. 2).

Таблица 2

**Коэффициенты пересчета величин в зависимости от геометрического масштаба**

$L_r/L_m$	$U_r/U_m$	$\Delta T_r/\Delta T_m$	$\tau_r/\tau_m$
22,3	17,86	5,67	0,07
10	23,34	21,59	0,21

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В качестве косвенного подтверждения достоверности полученных коэффициентов пересчета могли бы послужить результаты численного моделирования теплогидравлических процессов в реакторной установке с помощью расчетных кодов.

Предварительно можно заключить, что процессы естественной циркуляции натриевого теплоносителя в баке быстрого реактора можно с приемлемой точностью моделировать с использованием водяных стендов. Однако следует отметить, что на одном и том же стенде невозможно моделирование процессов при разных режимах – принудительной и естественной циркуляции, – поскольку они требуют соответствия разных критериев подобия [21].

Дальнейшее исследование требует уточнения ряда характеристик активной зоны и в целом реакторной установки БН-1200 с целью более точного определения характеристик для проектирования или модернизации водяных стендов, которые можно использовать для моделирования процессов естественной циркуляции в баке быстрого реактора.

**Литература**

1. Takeda H., Koga T. Study on similarity rule for natural circulation water test of LMFBFR. / Specialists' Meeting of IAEA: Evaluation of Decay Heat Removal by Natural Convection. O-arai Engineering Center, PNC, Japan. Feb. 22-25, 1993.

2. *Eguchi Y., Takeda H. Koga T., Tanaka N., Yamamoto K.* Quantitative prediction of natural circulation in an LMFR with a similarity law and a water test. // Nuclear Engineering and Design. – 1997. – Vol. 178. – No. 3. – PP. 295-307.
3. *Eguchi Y., Takeda H.* Experimental and computational Study of prediction of Natural Circulation in top-entry Loop-type FBR. / Specialists' Meeting of IAEA: Evaluation of Decay Heat Removal by Natural Convection. O-arai Engineering Center, PNC, Japan. Feb. 22-25, 1993.
4. *Ieda Y., Kamide H., Ohshima H., Sugawara S., Ninokata H.* Strategy of Experimental Studies in PNC on Natural Convection Decay Heat Removal. / Specialists' Meeting of IAEA: Evaluation of Decay Heat Removal by Natural Convection. O-arai Engineering Center, PNC, Japan. Feb. 22-25, 1993.
5. *Ishii M., Kataoka I.* Scaling Criteria for LWR's under Single-Phase and Two-Phase Natural Circulation. / Joint NRC/ANS Meeting on Basic Thermal Hydraulic Mechanisms in LWR Analysis. Bethesda, MD, USA. September 14-15, 1982.
6. *Ishii M., Kataoka I.* Scaling laws for thermal-hydraulic system under single-phase and two-phase natural circulation. // Nuclear Engineering and Design. – 1984. – Vol. 81. – No. 3. – PP. 411-425.
7. *Bomelburg H.J.* An Evaluation of the Applicability of Water Model Testing to Liquid Metal Engineering Problems. // General, Miscellaneous and Progress Reports, LMEC-68-4. Liquid Metal Engineering Center, Atomics International. February 26, 1968.
8. *Ушаков П.А., Сорокин А.П.* О возможностях моделирования на воде, воздухе распределений температур твэлов и теплоносителей реакторов с жидкометаллическим охлаждением. Препринт ФЭИ-2346. – Обнинск: ФЭИ, 1993. – 34 с.
9. *Ushakov P.A., Sorokin A.P.* Modeling Problems of Emergency Natural Convection Heat Removal in the Upper Plenum of Fast Reactors Using Water. / Proc. of the IX-th Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9). USA, October 3-8, 1999.
10. *Аширметов М.Р., Ершов Г.А.* Основные проектные решения для энергоблока с реактором БН-1200. Электронный ресурс: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=4279>. 25.01.2013 (дата доступа 20.06.2021).
11. *Митенков Ф.М.* Перспективы развития быстрых реакторов-размножителей. Электронный ресурс: [http://elib.biblioatom.ru/text/mitenkov\\_razmyshleniya-operezhitom\\_2004/go,170/](http://elib.biblioatom.ru/text/mitenkov_razmyshleniya-operezhitom_2004/go,170/) (дата доступа 20.06.2021).
12. *Ushakov P.A., Sorokin A.P.* Role of the Reynolds number in modeling natural convection in liquid metals. // Atomic Energy. – 1998. – Vol. 84. – No. 5. – PP. 309-313.
13. *Полежаев В.И.* Численное решение уравнений Навье-Стокса для течения и теплообмена в замкнутой двумерной области. – Дисс. канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1967. – 196 с.
14. *Михатулин Д.С., Чирков А.Ю.* Конспект лекций по теплообмену. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 148 с.
15. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 416 с.
16. *Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И. и др.* Теория теплообмена: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1979. – 495 с.
17. *Кириллов П.Л., Богословская Г.П.* Теплообмен в ядерных энергетических установках. – М.: Энергоатомиздат, 2000 г. – 458 с.
18. *Гухман А.А.* Введение в теорию подобия. Учебное пособие для вузов, Изд. 2-е, доп. и переработан. – М.: Высшая школа, 1973. – 296 с.
19. *Кирпичев М.В.* Теория подобия. – М.: АН СССР, 1953. – 96 с.
20. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.* Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы), 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.

21. *Suh K.Y., Todres N.E., Rohsenow W.M. Mixed Convective Low Flow Pressure Drop in Vertical Rod Assemblies: II-Experimental Validation. // Trans. of the ASME. – 1989. – Vol. 111. – No. 4. – PP. 966-973.*

Поступила в редакцию 26.06.2021 г.

**Авторы**

Слободчук Виктор Иванович, доцент, канд. техн. наук,  
E-mail: [slobovic@mail.ru](mailto:slobovic@mail.ru) .

Уралов Дмитрий Александрович, старший преподаватель,  
E-mail: [dmitryshalkov@yandex.ru](mailto:dmitryshalkov@yandex.ru).

Аврамова Екатерина Александровна, доцент  
E-mail: [eavramova@mail.ru](mailto:eavramova@mail.ru)

UDC 621.039.526:536.24.021

**POSSIBILITY OF SIMULATING NATURAL CIRCULATION IN FAST NEUTRON REACTORS USING A LIGHT WATER TEST FACILITY**

Slobodchuk V.I., Uralov D.A., Avramova E.A.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU MEPhI  
1 Studgorodok, 249040 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

ABSTRACT

The paper evaluates the possibility of modeling the heat transfer phenomena in a liquid-metal coolant using a light water test facility. It considers the natural circulation of the coolant in the upper plenum of the fast-neutron reactor. The sodium-cooled BN-1200 reactor was selected as the reactor installation to be modeled. The development of novel reactor designs must be based on the results of experimental studies. Some problems of modeling thermohydraulic processes in BN type reactors are studied by using sodium test facilities. Experimental studies of natural convection processes using light water test facilities can be considered as a good alternative to those using sodium test facilities. To validate the model, the similarity theory and the «black box» method were used and their principles and applicability were analyzed. Using the «black box» method makes it possible to avoid detailed modeling of such components as the reactor core and heat exchangers, replacing them by a simplified representation of these components to simulate the integral characteristics of the existing real life equipment. The paper considers the basic criteria which determine the similarity of the thermohydraulic processes under study. The governing criteria of similarity were estimated based on the fundamental differential equations of natural convection heat transfer. Based on these criteria, a set of dimensionless values was obtained which show the correlation between the model parameters and the characteristics of the reactor facility. Besides, generalized relationships were derived which can be used to estimate the scaling factors for calculating the key values of the reactor facility based on the model parameters. These relationships depend on the thermal-physics parameters of the working fluids, the geometrical scale value and the ratio of the thermal power of the model to that of the reactor facility, i.e., model-to-reactor thermal power ratio. The conditions under which it is possible to model sodium coolant by light water with adequate accuracy were analyzed. An example is given of the numerical values of the

scaling factors for one of the reference light water test facilities. The paper uses the experience of a number of foreign researchers in this field, in particular, the accepted assumptions which do not result in serious loss in modeling accuracy. According to the available estimates, the assumptions used do not result in considerable losses in accuracy. Thus, the natural circulation of the sodium coolant in the upper plenum of the fast-neutron reactor can be simulated with adequate accuracy by using light water test facilities.

**Key words:** fast neutron reactors, natural circulation, thermohydraulic simulation, similarity theory.

#### REFERENCES

1. Takeda H., Koga T. Study on similarity rule for natural circulation water test of LMFBR. *Specialists' Meeting of IAEA: Evaluation of Decay Heat Removal by Natural Convection. O-arai Engineering Center, PNC, Japan.* Feb. 22-25, 1993.
2. Eguchi Y., Takeda H., Koga T., Tanaka N., Yamamoto K. Quantitative prediction of natural circulation in an LMFR with a similarity law and a water test. *Nuclear Engineering and Design.* 1997, v. 178, no. 3, pp. 295-307.
3. Eguchi Y., Takeda H. Experimental and computational Study of prediction of Natural Circulation in top-entry Loop-type FBR. *Specialists' Meeting of IAEA: Evaluation of Decay Heat Removal by Natural Convection. O-arai Engineering Center, PNC, Japan.* Feb. 22-25, 1993.
4. Ieda Y., Kamide H., Ohshima H., Sugawara S., Ninokata H. Strategy of Experimental Studies in PNC on Natural Convection Decay Heat Removal. *Specialists' Meeting of IAEA: Evaluation of Decay Heat Removal by Natural Convection. O-arai Engineering Center, PNC, Japan.* Feb. 22-25, 1993.
5. Ishii M., Kataoka I. Scaling Criteria for LWR's under Single-Phase and Two-Phase Natural Circulation. *Joint NRC/ANS Meeting on Basic Thermal Hydraulic Mechanisms in LWR Analysis. Bethesda, MD, USA.* Sept. 14-15, 1982.
6. Ishii M., Kataoka I. Scaling laws for thermal-hydraulic system under single-phase and two-phase natural circulation. *Nuclear Engineering and Design.* 1984, v. 81, no. 3, p. 411-425.
7. Bomelburg H.J. An Evaluation of the Applicability of Water Model Testing to Liquid Metal Engineering Problems. *General, Miscellaneous and Progress Reports, LMEC-68-4. Liquid Metal Engineering Center, Atomics International.* Feb. 26, 1968.
8. Ushakov P.A., Sorokin A.P. *About the Possibilities of Modeling the Fuel and the Coolant Temperature Distributions in Liquid-Metal Cooled Reactors using Water and Air.* IPPE Preprint -2346. Obninsk. FEI Publ., 1993. 34 p. (in Russian).
9. Ushakov P.A., Sorokin A.P. Modeling Problems of Emergency Natural Convection Heat Removal in the Upper Plenum of Fast Reactors Using Water. *Proc. of the IX-th Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9).* USA, October 3-8, 1999.
10. Ashirmetov M.R., Ershov G.A. The general design features of a BN-1200 unit. Available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=4279>. 25.01.2013 (accessed Jun. 20, 2021) (in Russian).
11. Mitenkov F.M. *The opportunities of developing the fast-neutron breeder reactors.* Available at: [http://elib.biblioatom.ru/text/mitenkov\\_razmyshleniya-o-perezhitom\\_2004/go,170/](http://elib.biblioatom.ru/text/mitenkov_razmyshleniya-o-perezhitom_2004/go,170/) (accessed Jun. 20, 2021) (in Russian).
12. Ushakov P.A., Sorokin A.P. Role of the Reynolds number in modeling natural convection in liquid metals. *Atomic Energy,* 1998, v. 84, no. 5, pp. 309-313.
13. Polezhaev V.I. *The numerical calculation of the Navier-Stokes equations for the flowing and heat transfer in a closed two-dimensional region.* Cand. Sci. (Engineering) Diss. Moscow. MEI Publ., 1967, 196 p. (in Russian).
14. Mihatulín D.S, Chirkov A.Yu. *The Compendium of Lectures in the Heat and Mass*

*Transfer*. Moscow. MG TU Publ., 2009, 148 p. (in Russian).

15. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Heat Transfer*. Moscow. Energiya Publ., 1975, 416 p. (in Russian).

16. Isaev S.I., Kozhinov I.A., Kofanov V.I., Leontiev A.I., Mironov B.M., Nikitin V.M., Petrazhitsky G.B., Hvostov V.I., Chukaev A.G., Shishov E.V., Shkola V.V. *The Heat and Mass Transfer Theory*. Moscow. Vysshaya Shkola Publ., 1979, 495 p. (in Russian).

17. Kirillov P.L., Bogoslovskaya G.P. *The Heat and Mass Transfer in Nuclear Power Systems*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2000, 458 p. (in Russian).

18. Guhman A.A. *Introduction to the Similarity Theory*. Textbook. 2-nd ed. Moscow. Vysshaya Shkola Publ., 1973, 296 p. (in Russian).

19. Kirpichev M.V. *The Similarity Theory*. Moscow. AN SSSR Publ., 1953, 96 p. (in Russian).

20. Kirillov P.L., Yur'ev Yu.S., Bobkov V.P. *The Thermohydraulic Calculations Handbook (Nuclear Reactors, Heat Exchangers, Steam Generators)*. 2-nd ed. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1990, 360 p. (in Russian).

21. Suh K.Y., Todres N.E., Rohsenow W.M. Mixed Convective Low Flow Pressure Drop in Vertical Rod Assemblies: II-Experimental Validation. *Trans. of the ASME*. 1989, v.111, no. 4, pp. 966-973.

#### **Authors**

Slobodchuk Victor Ivanovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: slobovic@mail.ru

Uralov Dmitry Alexandrovich, Senior Lecturer

E-mail: dmitryshalkov@yandex.ru.

Avramova Ekaterina Aleksandrovna, Associate Professor

E-mail: eavramova@mail.ru