

УДК 621.039

Экспериментальное определение массовой скорости и энтальпии потока по сечению моделей водоохлаждаемых ядерных реакторов

А.В. Басов, Э.А. Болтенко, М.В. Давыдов, И.В. Кононенко

АО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций» (АО «ЭНИЦ»), г. Электрогорск, Московская обл., 142530, Россия
e-mail: boltenko@erec.ru

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-6-260-270

Поступила в редакцию 03.06.2020

После доработки 25.06.2020

Принята к публикации 02.07.2020

Представлен обзор работ по исследованию структуры потока в моделях тепловыделяющих сборок методом изокинетического отбора, выполненных в АО «ЭНИЦ». Эксперименты выполнены на моделях тепловыделяющих сборок применительно к реакторным установкам РБМК, ВВЭР и сборкам с закрученными имитаторами. Представлены исследования структуры потока при изотермическом и неизотермическом течениях теплоносителя в моделях реакторных установок различных типов.

Ключевые слова: изокинетический отбор, модели тепловыделяющих сборок, выходная решетка.

Введение

При разработке новых теплопередающих устройств, например реакторных установок (РУ), возникает необходимость определения локальных теплогидравлических характеристик в различных частях устройств. Исследования теплогидравлических характеристик на моделях сборок позволяют получить сведения различного характера. В частности, такие исследования позволяют выявить степень перемешивания теплоносителя по сечению сборки при использовании различных дистанционирующих решеток. На основе данных по расходам воды в ячейках возможно найти оптимальные конструкции дистанционирующих решеток применительно к повышению запасов до кризиса теплоотдачи. Для разработки и верификации межячейковых программ необходимы экспериментальные данные по локальным характеристикам и структуре потока в одно-двухфазных областях течения теплоносителя. Данные такого рода можно получить путем отбора проб из различных элементов конструкции.

Метод изокинетического отбора используется для определения структуры одно-двухфазного потока в каналах [1, 2]. Метод осуществляется следующим образом: в исследуемую точку канала устанавливают пробоотборник, через который отбирают теплоноситель и направляют его в систему для измерения теплогидравлических характеристик (ТГХ) (расход теплоносителя (средняя скорость), энтальпия). При этом отбор теплоносителя через пробоотборник осуществляется при соблюдении условия изокинетичности.

Условие изокинетичности отбора заключается в том, что параметры потока теплоносителя, который входит в пробоотборник, остаются такими же, какими они были до ввода пробоотборника в поток. При этом условии поток теплоносителя входит в пробоотборник без искажений. Параметры потока, которые используются для проверки условия изокинетичности, могут быть различными. На рис. 1 показана трубка отбора, установленная в центре канала. Поток поступает на вход трубки отбора и далее

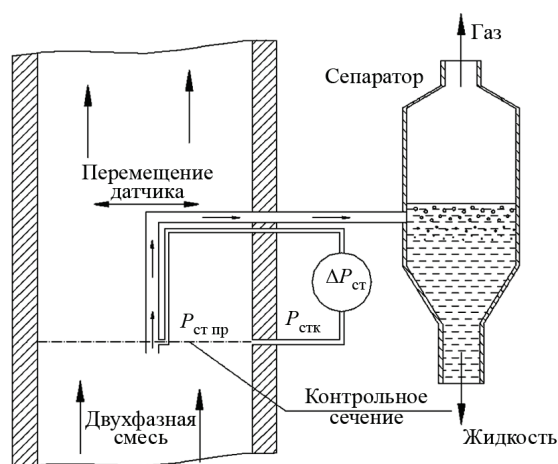


Рис. 1. Схема для изокINETического отбора проб

направляется в систему измерения проб. В случае двухфазного и (или) двухкомпонентного потока проба разделяется на составляющие (пар, вода, воздух, вода) и измеряется тем или иным способом. В данном случае изокINETичность отбора проверяется путем сравнения разности статического давления на стенке пробоотборника $P_{ст пр}$ и статического давления на стенке канала $P_{ст к}$ до ввода пробоотборника и после его ввода в канал. До ввода пробоотборника разность статических давлений в месте предполагаемой установки пробоотборника и на стенке канала равна нулю (статическое давление по сечению канала одинаково). Следовательно, для выполнения условия изокINETичности отбора разность статических давлений на стенке пробоотборника и на стенке канала после ввода пробоотборника должна быть равна нулю.

При отборе теплоносителя через пробоотборник условий изокINETичности добиваются с помощью вентиля, установленного в тракте отбора. С помощью этого вентиля устанавливают такой перепад давления между точкой отбора $P_{отб}$ и атмосферным давлением $P_{атм}$, при котором будет скомпенсировано дополнительное гидравлическое сопротивление за счет ввода пробоотборника. При этом статическое давление на стенке пробоотборника и на стенке канала будут равны, теплоноситель через пробоотборник будет отбираться без искажений.

В работе представлен обзор работ, выполненных в АО ЭНИЦ, по исследованию структуры потока в моделях тепловыделяющих сборок методом изокINETического отбора. Эксперименты выполнены на моделях тепловыделяющих сборок

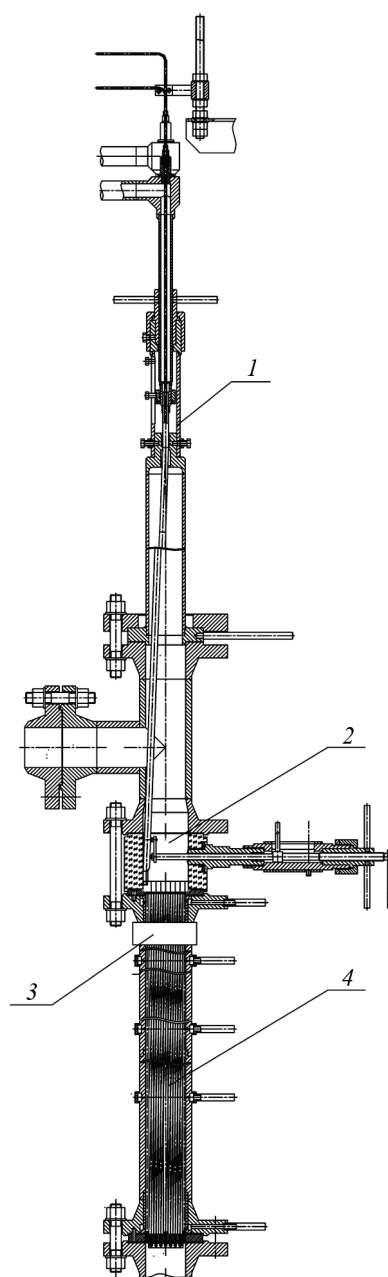


Рис. 2. Общий вид модели РУ РБМК: 1 – устройство вертикального перемещения пробоотборника; 2 – устройство горизонтального перемещения пробоотборника; 3 – устройство отбора пристенной пленки; 4 – модель сборки

применительно к реакторным установкам РБМК, ВВЭР и сборкам сложного поперечного сечения.

1. Определение структуры потока на моделях тепловыделяющих сборок. Однофазный поток

1.1. Исследования на модели сборки РУ РБМК

На рис. 2 представлен общий вид модели, предназначенный для отбора пристенной плен-

ки с корпуса модели сборки и отбора среды из характерных ячеек сборки.

На рис. 3 показано сечение модели сборки РУ РБМК с характерными ячейками.

На рис. 4 показано устройство для корректировки установки пробоотборника в ячейку сбор-

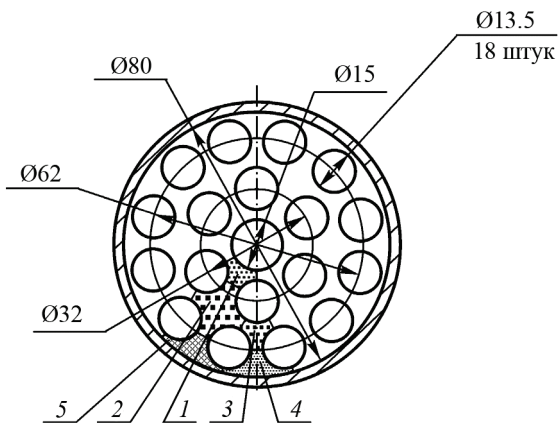


Рис. 3. Сечение сборки с характерными ячейками (1–5)

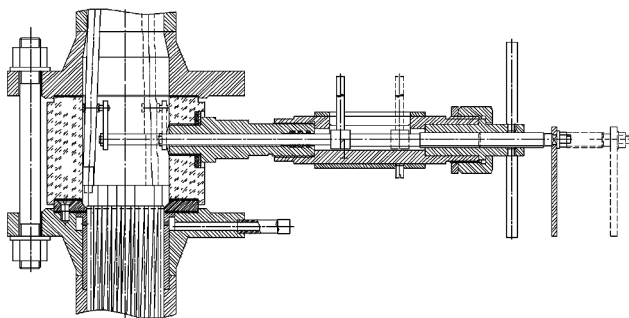


Рис. 4. Устройство для корректировки установки пробоотборника в ячейку сборки

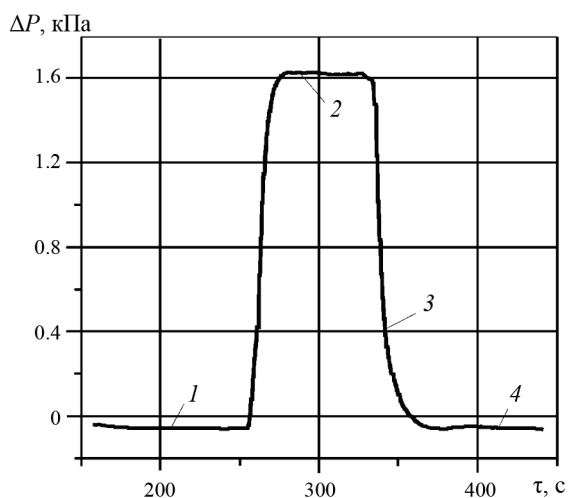


Рис. 5. Изменение перепада давления в процессе выхода на условие изокинетичности: 1 – $\Delta P_{изм}$ до ввода пробоотборника в ячейку; 2 – $\Delta P_{изм}$ после ввода в ячейку пробоотборника; 3 – участок выхода на условие изокинетичности; 4 – $\Delta P_{изм}$ после выхода на условие изокинетичности

ки. Устройство включает в себя пробоотборник и толкатель, служащий для корректировки установки пробоотборника в ячейку сборки.

Для осуществления отбора теплоносителя несколько ниже выходного сечения сборки (30–40 мм) выбирают контрольное сечение. В этом сечении проводят отбор теплоносителя из исследуемых ячеек. Для отбора теплоносителя в исследуемую ячейку устанавливают пробоотборник, идентичный по форме ячейки, в которой отбирается проба. Размеры пробоотборника соответствуют размеру области, из которой проводится отбор. Форма поперечного сечения и гидравлический диаметр пробоотборника соответствуют гидравлическому диаметру ячеек в сборке. Отбирают теплоноситель через пробоотборник и направляют его в систему для измерения теплогидравлических характеристик. Изокинетичность отбора проверяют сравнением разности статических давлений $\Delta P_{ст}$ на стенке канала и на стенке имитатора твэла со стороны исследуемой ячейки до ввода пробоотборника и после его ввода. Алгоритм определения теплогидравлических характеристик по сечению тепловыделяющей сборки заключается в следующем. Устанавливаются режимные параметры проведения опытов: расход воды и ее температура на входе в сборку, давление на выходе сборки. Измеряется разность статических давлений – статического давления в исследуемой ячейке и статического давления, например, на стенке сборки $\Delta P_{изм} = P_{яч ст} - P_{ст сб}$. Далее пробоотборник перемещается вниз до образования плотного соединения с ячейкой отбора. Вода через пробоотборник и трубку отбора подается в систему отбора и далее в дренаж. Разность $\Delta P_{изм}$ изменяется с помощью регулировочных вентилях, устанавливают такой перепад давления между точкой отбора $P_{отб}$ и атмосферным давлением $P_{атм}$, при котором будет скомпенсировано дополнительное гидравлическое сопротивление, возникшее в результате подсоединения пробоотборника к ячейке. При этом с помощью регулировочных вентилях добиваются выхода на прежнее значение $\Delta P_{изм}$. Условие изокинетичности отбора будет достигнуто, когда $\Delta P_{изм}$ вернется к исходному значению. Вода через пробоотборник будет отбираться без искажений.

На рис. 5 показана зависимость перепада давления от времени в процессе выхода на условие изокинетичности.

Расходы воды в ячейках

Номер ячейки	Площадь ячейки $S_{яч}$, 10^{-6} м^2	Расход воды в ячейке $G_{яч}$, г/с	Средняя скорость воды в ячейке $W_{яч}$, м/с	$T_{вх}$, °С	Расход воды через сборку $Q_{сб}$, $10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$	Средняя скорость воды в сборке $W_{ср\ сб}$, м/с	$Re_{сб}$
1	33.686	30.0	0.89	22.7–19.5	1.16	0.51	4300
2	40.306	30.2	0.749	22.7–19.5	1.16	0.51	4300
3	114.634	61.7	0.538	22.7–19.5	1.16	0.51	4300
4	95.13	35.1	0.369	22.7–19.5	1.16	0.51	4300
5	95.13	32.6	0.342	22.7–19.5	1.16	0.51	4300

Расход воды через ячейку находится путем определения объема воды, заполнившей измерительную емкость, и времени заполнения емкости, т.е.

$$G_{яч} = (V_k - V_n) \cdot \rho_{вод} / t, \quad (1)$$

где $G_{яч}$ – расход воды через ячейку, кг/с; V_k – конечный объем воды в измерительной емкости; V_n – начальный объем воды в измерительной емкости ($V_n = 0$); t – время заполнения определенного объема измерительной емкости, с; $\rho_{вод}$ – плотность воды. После проведения одного замера регулировочный вентиль закрывается, пробоотборник и трубка статического давления возвращаются в исходное состояние. Далее цикл измерений повторяется 2–4 раза.

В качестве примера в таблице представлены измеренные расходы воды в ячейках при массовой скорости через сборку $500 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$.

Относительный небаланс расхода воды через сборку равен

$$\Delta = \frac{\sum G_{яч} - G_{сб}}{G_{сб}} = -(2 - 4)\%.$$

Как видно из таблицы, имеет место значительное отличие средних скоростей в ячейках от средней скорости в сборке.

1.2. Исследования на модели сборки РУ ВВЭР

Исследования теплогидравлических характеристик на моделяхборок позволяют получить сведения различного характера. В частности, такие исследования позволяют выявить степень перемешивания теплоносителя по сечению сборки при использовании различных дистанционирующих решеток. На основе данных по расходам воды в ячейках возможно найти оптимальные конструкции дистанционирующих решеток применительно к повышению запасов до кризиса теплоотдачи.

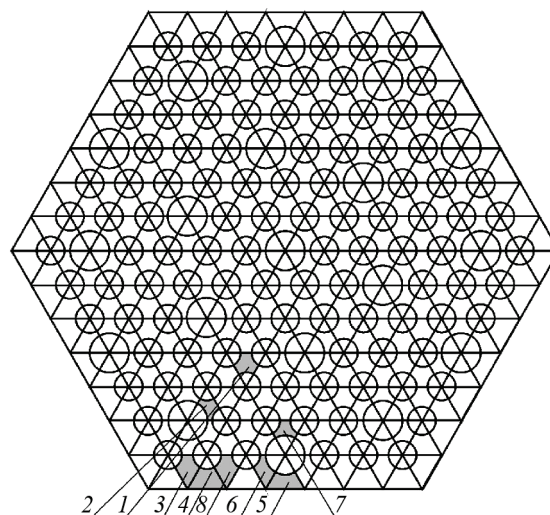


Рис. 6. Поперечное сечение модели ТВС

В качестве примера приведены результаты исследований расходов воды в ячейках штатной геометрии. На рис. 6 представлено поперечное сечение сборки с дистанционирующей решеткой (ДР) штатной геометрии без перемешивающих устройств – 127 стержней. Там же показаны характерные ячейки сборки, в которых выполнены измерения расходов воды. Измерения выполнены в диапазоне средних скоростей воды через сборку $W_{ср\ сб} = 0.5 - 2 \text{ м/с}$. Число $Re = 5000 - 20000$. Давление $P = 0.1 \text{ МПа}$. Измерения расходов воды в ячейках выполнены на различных расстояниях от дистанционирующей решетки: $\Delta Z = 0, 50, 125, 250 \text{ мм}$.

На рис. 7 представлены зависимости средних скоростей воды в ячейках 1 и 2 (см. рис. 6) на различных расстояниях от дистанционирующей решетки без перемешивающих устройств. Как видно из рисунка, в ячейках 1 и 2 скорость воды на различных расстояниях от дистанционирующей решетки практически не изменяется, перемешивание воды по сечению сборки практически отсутствует.

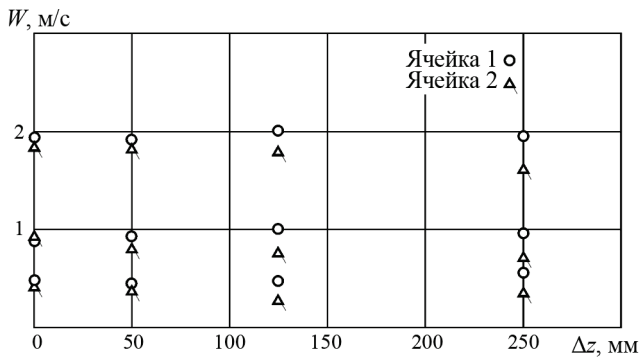


Рис. 7. Распределение средних скоростей воды в ячейках 1 и 2 на различных расстояниях от дистанционирующей решетки без перемешивающих устройств

Относительный небаланс расходов воды в ячейках и расходов воды в сборке

$$\Delta = \frac{\sum G_{\text{яч}} - G_{\text{сб}}}{G_{\text{сб}}} = (2.5 - 15)\%$$

1.3. Сборки сложного поперечного сечения

Методика изокинетического отбора в виде, описанном выше, практически неосуществима для тепловыделяющих сборок, представленных на рис. 8.

На нем показано поперечное сечение тепловыделяющей сборки, собранной из имитаторов твэл крестообразного профиля, закрученных по высоте с некоторым шагом (720 мм).

Как видно из рисунка, ячейки ТВС имеют сложный профиль, закручены по высоте с некоторым шагом. Размеры ячеек малы (гидравлический диаметр 2–3 мм), число ячеек велико (138). Ввод пробоотборника в такую ячейку приводит

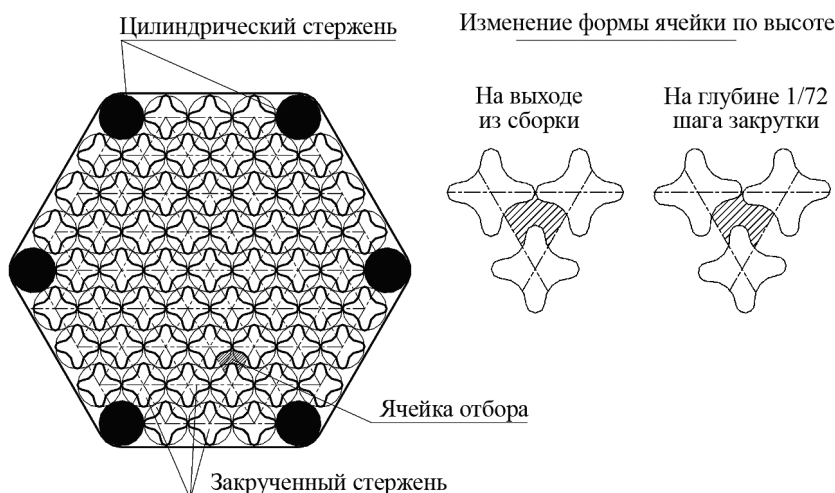


Рис. 8. Поперечное сечение тепловыделяющей сборки с имитаторами твэл крестообразного профиля

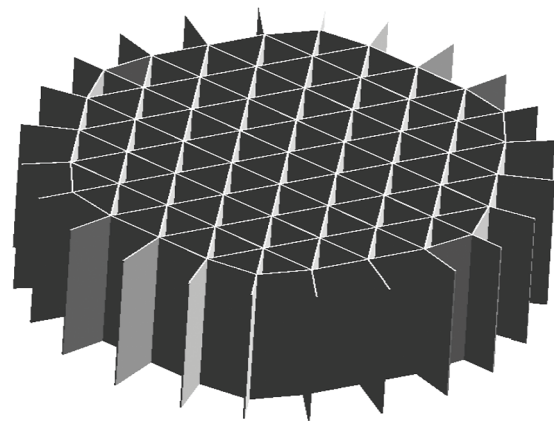


Рис. 9. Выходная решетка

к значительному искажению гидравлического сопротивления тракта отбора. Отбор статического давления со стенки имитатора технически трудно выполним. В связи с этим установление изокинетичности отбора затруднено. Для определения средних скоростей в сборках сложного профиля метод изокинетического отбора модифицирован [3, 4]. Для выполнения измерений в сборках сложного профиля предварительно формировались ячейки отбора продлением стенок имитаторов и замещением жидких границ исследуемых ячеек непроницаемыми стенками в пределах формируемых ячеек от выхода активной части сборки до контрольного сечения. Ячейки отбора формировались установкой в контрольном сечении выходной решетки (рис. 9). Выходная решетка служит для фиксации формы выходной части сборки и для фиксации внешних границ потоков, выходящих из ячеек, над имитаторами.

Стенки ячеек выходной решетки проходят через центры имитаторов твэл от выхода активной части сборки до контрольного сечения. Контрольное сечение сборки выбиралось на выходе сборки вне ее активной части. Так как контрольное сечение сборки выбрано вне активной ее части, а ячейки отбора формируются предварительно, гидравлический тракт отбора практически не изменяется (искажается). Изокинетичность отбора осуществляется при минимальном изменении расхода через сборку.

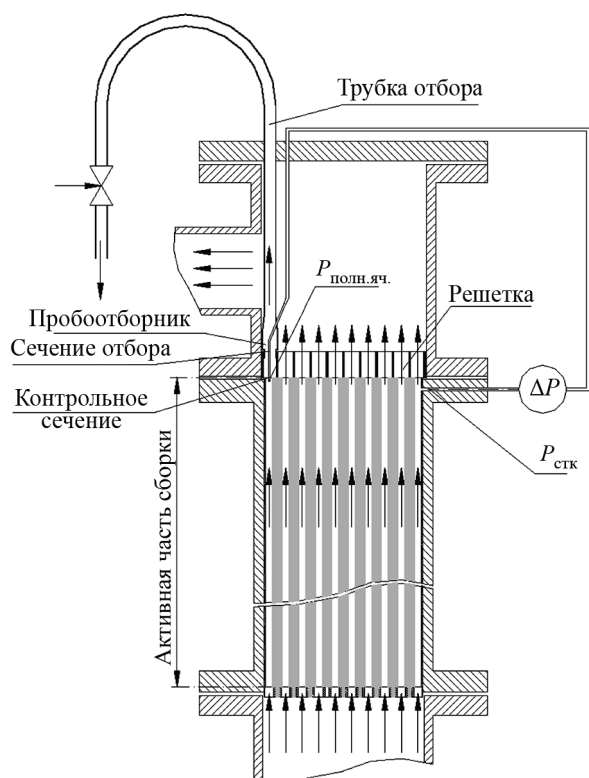


Рис. 10. Экспериментальный участок

Как сказано выше, выходная решетка служит для фиксации формы выходной части сборки и для фиксации внешних границ потоков, выходящих из ячеек, над имитаторами. Ячейки решетки совпадают по границам с ячейками сборки. Контрольное сечение сборки выбирается на выходе сборки вне ее активной части (рис. 10). В контрольном сечении с помощью выходной решетки формируются ячейки отбора.

Алгоритм определения теплогидравлических характеристик по сечению тепловыделяющей сборки заключается в следующем. Устанавливаются режимные параметры проведения опытов: расход и температура воды на входе в сборку, давление на выходе из сборки.

С помощью устройства перемещения пробоотборник устанавливается над исследуемой ячейкой (20 мм) (рис. 11, а – стартовое положение). Далее перемещают трубку статического давления в центр исследуемой ячейки (рис. 11, б). После фиксации трубки статического давления в центре ячейки проводят измерение разности статических давлений – статического давления в центре ячейки $P_{\text{яч ст}}$ и стати-

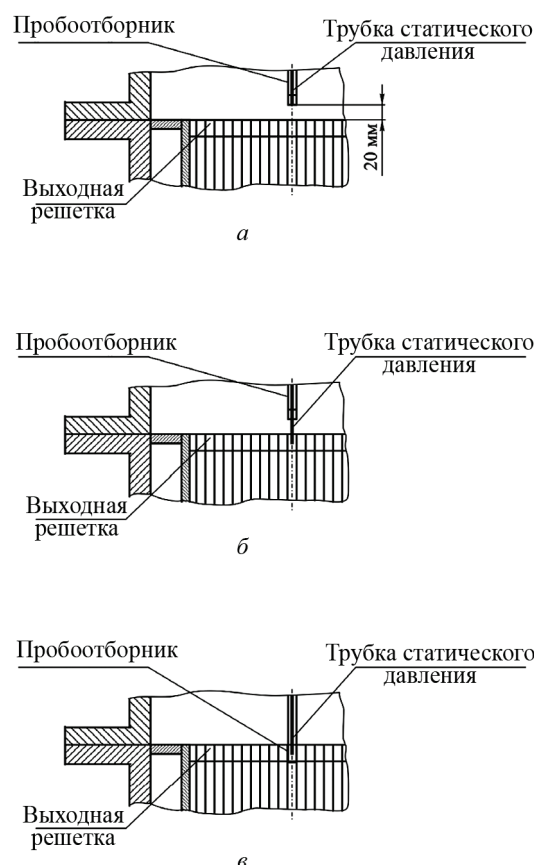


Рис. 11. Определение теплогидравлических характеристик по сечению тепловыделяющей сборки: а – стартовое положение, пробоотборник установлен над исследуемой ячейкой; б – трубка статического давления установлена в центр исследуемой ячейки; в – пробоотборник установлен в ячейку отбора

ческого давления на стенке сборки $P_{\text{ст сб}}$, $\Delta P_{\text{изм}} = P_{\text{яч ст}} - P_{\text{ст сб}}$. Далее пробоотборник перемещается вниз до образования плотного соединения с ячейкой отбора (рис. 11, в). Вода через пробоотборник и трубку отбора подается в систему отбора и далее в дренаж. $\Delta P_{\text{изм}}$ изменяется с помощью регулировочных вентилях. Устанавливают такой перепад давления между точкой отбора $P_{\text{отб}}$ и атмосферным давлением $P_{\text{атм}}$, при котором будет скомпенсировано дополнительное гидравлическое сопротивление, возникшее в результате подсоединения пробоотборника к ячейке. При этом с помощью регулировочных вентилях добиваются выхода на прежнее значение $\Delta P_{\text{изм}}$. Условие изокINETИЧНОСТИ отбора будет достигнуто, когда $\Delta P_{\text{изм}}$ вернется к исходному значению. В процессе достижения условий изокINETИЧНОСТИ вода, отбираемая через пробоотборник, подается в дре-

наж через сливной трубопровод. После достижения условий изокINETичности трубка отбора переключается на подачу воды в измерительную емкость.

На рис. 12 показан пробоотборник с трубкой статического давления.

Внутри пробоотборника (см. рис. 12) установлена трубка статического давления 4 с выходным участком трубки статического давления (рис. 13).

Для герметизации трубки статического давления используется сальниковое уплотнение. В нижней части пробоотборника трубка статического давления дистанционируется относительно стенок пробоотборника с помощью спирально закрученной проволоки, приваренной к стенке трубки статического давления. Трубка статического давления имеет возможность перемещаться относительно пробоотборника – при этом она дистанционирована относительно внутренней поверхности пробоотборника. По-

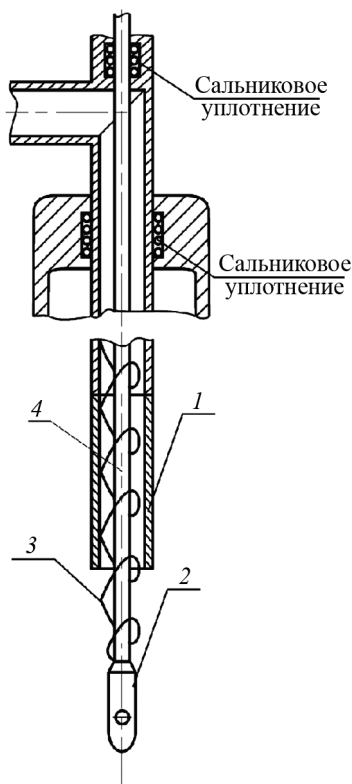


Рис. 12. Пробоотборник с трубкой статического давления: 1 – корпус пробоотборника, в котором установлена трубка статического давления; 2 – выходной участок трубки статического давления; 3 – дистанционатор – спиральная проволока, приваренная к наружной поверхности трубки статического давления; 4 – трубка статического давления

следнее позволяет устанавливать трубку в центр ячейки и фиксировать это положение при перемещении пробоотборника и установки его в ячейку. Общий вид пробоотборника показан на рис. 14.

Расход воды через ячейку определяется измерением веса воды, заполнившей измерительную емкость, и времени заполнения емкости: $G_{\text{яч}} = (G_{\text{к}} - G_{\text{н}})/t$, где $G_{\text{яч}}$ – расход воды через ячейку, кг/с; $G_{\text{к}}$ – конечный вес воды в измерительной емкости, кг; $G_{\text{н}}$ – начальный вес воды в измерительной емкости, кг; t – время заполнения определенного объема измерительной емкости, с.

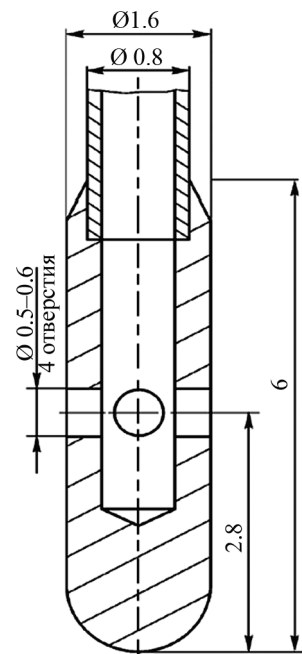


Рис. 13. Выходной участок трубки статического давления

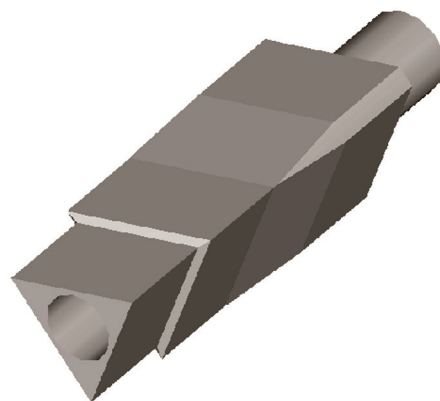


Рис. 14. Общий вид пробоотборника

Средняя скорость через ячейку равна:

$$W_{\text{ср.яч}} = m/(\rho F_{\text{яч}}),$$

где m – масса воды в емкости; $F_{\text{яч}}$ – проходное сечение ячейки, м^2 . Измерение проводится 3–5 раз. Далее находится среднее значение $G_{\text{яч ср}}$ и, соответственно, средняя скорость в ячейке $W_{\text{яч ср}}$. Измерение расходов (скоростей) выполнено во всех ячейках сборки. Относительный небаланс расхода воды через сборку $\Delta = (\Sigma G_{\text{яч}} - G_{\text{сб}})/G_{\text{сб}} = (6 \div 10)\%$.

Относительные средние скорости в ячейках сборки показаны на рис. 15.

Как видно из рисунка, отличие средних скоростей в ячейках от среднего значения скорости в сборке значительно (30–50)%.

2. Исследования на обогреваемых моделях

При определении запасов до кризиса теплоотдачи в сборках используют эмпирические зависимости $q_{\text{кр}}$ от среднего паросодержания. Известны методики, позволяющие определить наступление кризиса теплоотдачи на основе расходов жидкости на поверхностях твэлов [5]. Исходные данные для определения расходов жидкости на поверхностях твэлов (массовое паросодержание, давление, массовая скорость) определяются на основе расчетов по межъячейковой программе или экспериментов.

Для разработки и верификации межъячейковых программ необходимы экспериментальные данные по локальным характеристикам и структуре потока в одно-двухфазных областях течения теплоносителя. Данные такого рода,

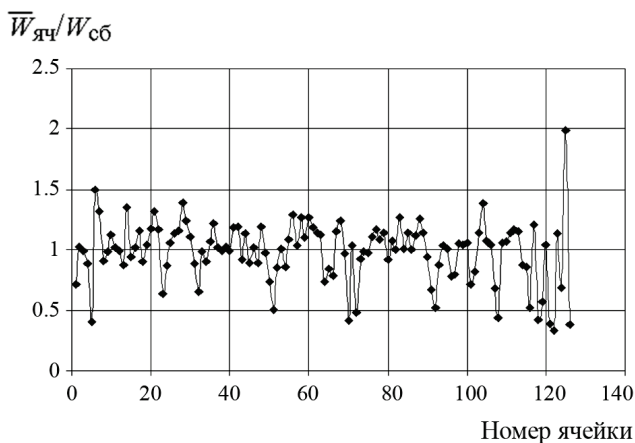


Рис. 15. Относительные средние скорости в ячейках сборки

позволяющие получить зависимости, описывающие массотеплоперенос между ячейками сборки, немногочисленны [6–8]. Для получения данных такого рода выполнены исследования на 19-стержневой электрообогреваемой модели ТВС РБМК [9]. На рис. 16 показана полномасштабная электрообогреваемая модель РУ РБМК.

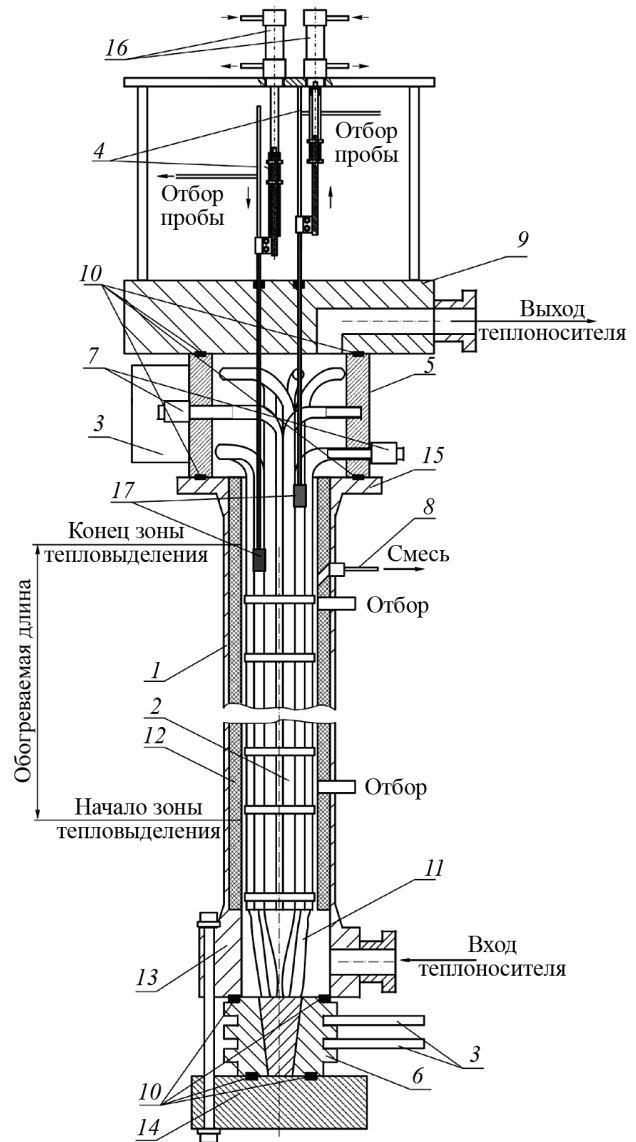


Рис. 16. Экспериментальный участок: 1 – канальная труба (корпус ЭУ); 2 – стержневая сборка имитаторов; 3 – шина; 4 – трубки отбора проб; 5 – верхний токоподвод; 6 – нижний токоподвод; 7 – отбор статического давления; 8 – отбор смеси (отбор пленки с корпуса сборки); 9 – верхняя крышка; 10 – электроизолирующие прокладки; 11 – гибкие медные жгуты; 12 – талькохлоритовые втулки; 13 – нижний фланец корпуса; 14 – нижний фланец; 15 – верхний фланец корпуса; 16 – маслоцилиндры; 17 – пробоборотник

На рис. 17 показано поперечное сечение пучка.

На рис. 18 показаны примеры распределения массовой скорости (а) и относительной энтальпии (б) по ячейкам пучка в неизотермическом режиме.

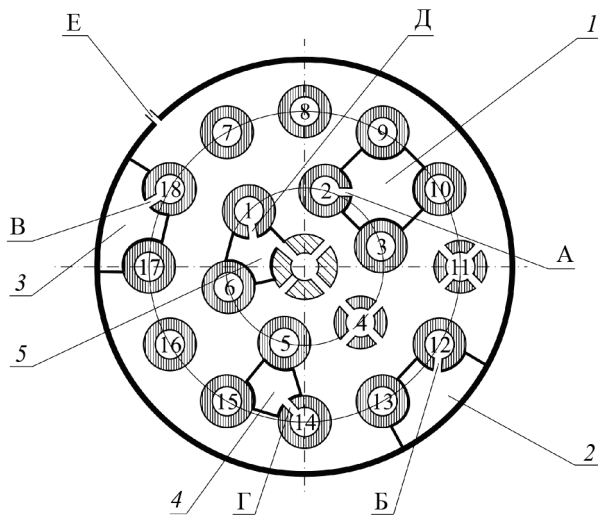


Рис. 17. Поперечное сечение пучка: 1–5 – характерные ячейки сборки, из которых проводится отбор проб; А, Б, В, Г, Д – точки отбора статического давления; Е – отбор статического давления из корпуса

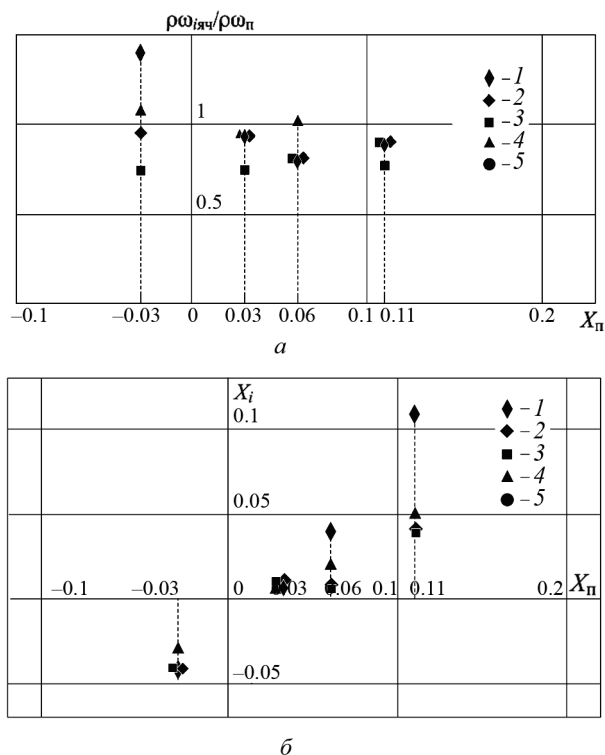


Рис. 18. Распределение массовой скорости (а) и относительной энтальпии (б) по ячейкам пучка в неизотермическом режиме. 1–5 – характерные ячейки пучка (см. рис. 3). $P = 6.87$ МПа, $\rho W_n = 1000$ кг/(м²с).

Как видно из рис. 18, при изотермическом режиме течения поле скоростей по пучку характеризуется значительной неравномерностью. С повышением массовой скорости расслоение скоростей по сечению пучка снижается. Распределение приведенной массовой скорости по ячейкам при однофазном течении в изотермическом режиме и в неизотермическом режиме при $x_n < x_{нк}$ качественно подобны ($x_n, x_{нк}$ – относительная энтальпия на выходе пучка и в начале кипения соответственно).

Заключение

1. Представлены исследования структуры потока при изотермическом и неизотермическом течениях теплоносителя в моделях реакторных установок различных типов. Измерения выполнены методом изокинетического отбора. Описаны особенности методики изокинетического отбора для различных типов сборок.

2. Для определения средних скоростей в сборках с закрученными по высоте имитаторами тепловыделяющих элементов метод изокинетического отбора модифицирован [3, 4]. Для выполнения измерений в сборках сложного профиля предварительно сформированы ячейки отбора путем продления стенок имитаторов и замещения жидких границ исследуемых ячеек непроницаемыми стенками в пределах формируемых ячеек от выхода активной части сборки до контрольного сечения. Ячейки отбора сформированы путем установки в контрольном сечении выходной решетки.

3. Выполнены измерения расходов воды (скоростей) во всех ячейках сборки с закрученными имитаторами ТВЭЛ (в сборке 138 ячеек). Относительный небаланс расхода воды через сборку $\Delta = (\sum G_{яч} - G_{сб}) / G_{сб} = 6-10\%$. Различие средних скоростей в ячейках от среднего значения скорости в сборке значительно (30–50%).

4. Выполнены измерения средних скоростей воды в характерных ячейках модели РУ ВВЭР (127 стержней) с дистанционирующей решеткой без перемешивающих устройств. Относительный небаланс расходов воды в ячейках и расходов воды в сборке $\Delta = 2.5-15\%$

$\left(\Delta = \frac{\sum G_{яч} - G_{сб}}{G_{сб}} \right)$. Перемешивание воды по сечению сборки практически отсутствует.

5. Представлены некоторые результаты распределения массовой скорости и энтальпии однофазного и двухфазного потоков в необогреваемой модели и полномасштабной электрообогреваемой модели 19-стержневого пучка ТВС РБМК-1000. При изотермическом режиме течения поле скоростей по пучку характеризуется значительной неравномерностью. С повышением массовой скорости расслоение скоростей по сечению пучка снижается. Распределение приведенной массовой скорости по ячейкам при однофазном течении в изотермическом режиме и в неизотермическом режиме при $x_{II} < x_{НК}$ качественно подобны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стырикович М.А., Резников М.И. Методы экспериментального изучения процессов генерации пара. М.: Энергия, 1976. 279 с.
2. Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения. М.: Энергия, 1974. 408 с.
3. Басов А.В., Болтенко Э.А., Жилко В.Н., Марцинюк Д.Е. Измерение средних и локальных скоростей жидкости в ячейках моделей тепловыделяющих сборок с закруткой потока // Тезисы Третьей Международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». М.: Изд-во МЭИ, 2008. С. 215–216.
4. Болтенко Э.А., Жилко В.Н., Басов А.В. Способ определения теплогидравлических характеристик по сечению тепловыделяющей сборки / Патент России 2390061 МПКЗ G21C 17/022,(2006.01). Заявка № 2008144521/06 от 12.11.2008. Бюл. № 14. 2010.
5. Болтенко Э.А., Давыдов М.В. Кризис теплоотдачи и распределение жидкости в пучках стержней в области дисперсно-кольцевого режима течения // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. № 4. С. 146–154.
6. Лахи Р.Т., Ширалкар Б.С., Радклиф Д.В. Распределение массовой скорости и энтальпии в пучке стержней для однофазного и двухфазного потоков // Труды американского общества инженеров-механиков. Теплопередача. Серия С. 1971. Т. 93. № 2. С. 64–78. <https://doi.org/10.1115/1.3449786>
7. Архипов А.П., Орнатский А.П., Маевский Е.М. Исследование распределения массовой скорости и энтальпии потока по сечению семистержневого пучка // Теплоэнергетика. 1981. № 10. С. 64–66.
8. Смолин В.Н. Исследование теплогидравлики активных зон ядерных реакторов на модельных стендах. М.: ФГУП НИКИЭТ, 2005. 154 с.
9. Афремов Д.А., Басов А.В., Болтенко Э.А., Давыдов М.В., Емельянов А.И., Кононенко И.В., Столпник А.В. Исследование распределения массовой скорости и энтальпии однофазного и двухфазного потоков по сечению 19-стержневого пучка в электрообогреваемой модели тепловыделяющей сборки РБМК-1000 // Теплоэнергетика. 2020. № 6. С. 104–112. DOI: 10.1134/S0040363620060016

Experimental determination of a flow's mass velocity and enthalpy by the section of water-cooled nuclear reactors models

A.V. Basov, E.A. Boltenko, M.V. Davydov, I.V. Kononenko

*Electrogorsk Research and Engineering Center on NPP safety,
Electrogorsk, Moscow region, 142530, Russia
e-mail: boltenko@erec.ru*

The article presents a review of the works carried out in EREC on the study of the flow structure in the models of fuel assemblies by the isokinetic sampling method. The experiments were performed on models of fuel assemblies related to the RBMK, VVER reactors and assemblies with twisted simulators. The article presents the studies of the flow structure at isothermal and non-isothermal coolant flows in various types of models, and describes the features of the isokinetic sampling method for various types of assemblies. A modified method of isokinetic sampling is presented. To perform measurements in complex profile assemblies sampling cells were preliminary being formed by lengthening the simulators' walls and replacing liquid boundaries of the cells under study by the impenetrable walls within the limits of the cells, being formed, from the assembly active outlet to the controlling section. The sampling cells were being formed by installing output grid in the controlling section. The results of water flow rates (velocities) measuring in all cells of the assembly with swirled simulators are described. Relative unbalance of water flow through the assembly, defined as $\Delta = (\sum G_{cell} - G_{assembly}) / G_{assembly}$, was of 6–10%. The difference of 30–50% between the average velocities in the cells and the average velocity in the assembly is quite significant. The article presents some results of the mass velocity and enthalpy of single-phase and two-phase flows distribution in both unheated and full-scale electrically heated model of nineteen-rod bundle of the RBMK-1000 fuel assemblies.

Keywords: isokinetic sampling, models of fuel assemblies, output grid.

REFERENCES

1. **Styrikovich M.A., Reznikov M.I.** *Metody ehksperimental'nogo izucheniya protsessov generatsii para* [Methods of experimental study of steam generation processes]. Moscow: Energiya, 1976, 279 p. In Russ.
2. **Hewitt J., Hall-Taylor N.** *Annular Two-Phase Flow*. Pergamon, 1970, 310 p.
3. **Basov A.V., Boltenko E.A., Zhilko V.N., Martsinyuk D.E.** Izmerenie srednikh i lokal'nykh skorostej zhidkosti v yachejkakh modelej teplovydelyayushhikh sborok s zakrutkoj potoka [Measurement of average and local fluid velocities in the cells of models of fuel assemblies with flow swirl]. *Tezisy Tre'tej Mezhdunarodnoj konferentsii «Teplo-massoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh» – Abstracts of the Third International Conference “Heat and Mass Transfer and Hydrodynamics in Swirling Flows”*. Moscow, Publ. house MPEI, 2008, pp. 215–216. In Russ.
4. **Boltenko E.A., Zhilko V.N., Basov A.V.** *Sposob opredele-niya teplogidravlicheskih kharakteristik po secheniyu teplovydelyayushhej sborki* [Method for determining the thermal-hydraulic characteristics of the cross-section of the fuel assembly]. Patent RF no. 2390061, 2008, 12 p.
5. **Boltenko E.A., Davydov M.V.** Krizis teplotdachi i raspredelenie zhidkosti v puchkakh sterzhnej v oblasti dispersno-kol'tsevogo rezhima techeniya [Heat transfer crisis and fluid distribution in bundles of rods in the area of dispersed-annular flow mode]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2020, vol. 12, no. 4 pp. 146–154. In Russ.
6. **Lahey R.T. Jr., Shiralkar B.S., Radcliffe D.W.** Mass flux and enthalpy distribution in a rod bundle for single- and two-phase flow conditions. *Transactions of the ASME. Ser. C J. Heat Transfer*. 1971, vol. 93, no. 2, pp. 197–206. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3449786>
7. **Arkipov A.P., Ornatsky A.P., Mayevsky E.M.** Issledovanie raspredeleniya massovoj skorosti i ehntal'pii potoka po secheniyu semisterzhnevoogo puchka [Investigation of the distribution of mass velocity and enthalpy of flow over the cross section of a seven-rod beam]. *Teploenergetika*, 1981, no. 10, pp. 64–66. In Russ.
8. **Smolin V.N.** *Issledovanie teplogidravliki aktivnykh zon yadernykh reaktorov na model'nykh standakh* [Research of thermohydraulics of active zones of nuclear reactors on model stands]. Moscow: Publ. house NIKIET, 2005. 154 p. In Russ.
9. **Afremov D.A., Basov A.V., Boltenko E.A., Davydov M.V., Emelyanov A.I., Kononenko I.V., Stolpnik A.V.** Study into the distribution of mass speed and enthalpy of single-phase and two-phase flows in the cross section of a 19-rod beam in a model of an electrically heated RBMK-1000 fuel assembly. *Teploenergetika*, 2020, no. 6, pp. 104–112. DOI: 10.1134/S0040363620060016

Уважаемые читатели!

В №5, 2020 журнала в CONTENTS и на с. 206 вместо

V.S. Zarubin, O.V. Novozhilova, I.G. Sergeeva, E.S. Soldatenko

следует читать:

V.S. Zarubin, O.V. Novozhilova, E.S. Sergeeva, I.G. Soldatenko