

*Тринадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 29 июня — 3 июля 2015 г.*

УДК 621.039.516: 532.574.7

А.А. Кандауров<sup>1</sup>, В.В. Пахолков<sup>2</sup>,  
С.А. Рогожкин<sup>2</sup>, Д.А. Сергеев<sup>1</sup>, Ю.И. Троицкая<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт прикладной физики РАН, Россия*  
603950, Нижний Новгород, Ульянова ул. 46, E-mail: [daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru](mailto:daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru)

<sup>2</sup> *АО «ОКБМ Африкантов», Россия*  
603074, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СТЕНДЕ  
"ТИСЕЙ" С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PIV-МЕТОДОВ**

**АННОТАЦИЯ**

В работе представлены результаты экспериментов по исследованию теплогидравлических процессов в модели реактора на быстрых нейтронах БН-1200, входящей в состав стенда ТИСЕЙ. С использованием PIV-методов проведены измерения полей скорости течений в различных режимах работы: принудительная циркуляция под действием насоса (с нагревом и без него), естественная циркуляция.

ПОЛЯ СКОРОСТИ, PIV, БЫСТРЫЙ РЕАКТОР С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в ОКБМ выполняется разработка реакторной установки (РУ) с реактором на быстрых нейтронах БН-1200. Одной из систем безопасности этой РУ является система аварийного отвода тепла (САОТ), предназначенная для отвода остаточных тепловыделений реактора (обусловленных радиоактивным распадом продуктов деления) к конечному поглотителю тепла – атмосферному воздуху.

С целью исследования теплогидравлических процессов в реакторе и САОТ в ОКБМ проводятся испытания на водяном стенде ТИСЕЙ [1]. Геометрический масштаб стенда 1:5, максимальная мощность имитатора активной зоны составляет 350 кВт. Вместо жидкого натрия в стенде в качестве теплоносителя используется вода под атмосферным давлением.

При исследовании теплогидравлических процессов одной из основных задач является получение пространственно-временной картины течений в широком диапазоне изменения характеристик потоков. В настоящей работе решается задача адаптации PIV-методик развитых ранее в работе [2] и их применения для изучения теплогидравлических процессов на стенде ТИСЕЙ.

**2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Общий вид модели реактора БН-1200, входящей в состав стенда ТИСЕЙ, приведен на рис.1.

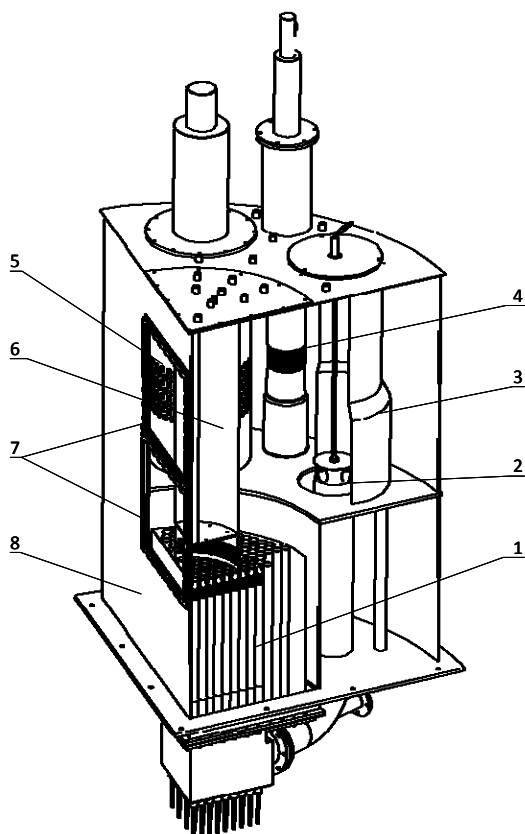


Рис. 1 – Модель сектора реактора БН-1200 стенда ТИСЕЙ. 1– модель активной зоны; 2 – клапан с ручным приводом; 3 – вытеснитель ГЦН-1 (показана часть вытеснителя); 4 – модель АТО; 5 – модель ПТО; 6 – вытеснитель центральной поворотной колонны; 7 – прозрачные окна; 8 – корпус

На стенде выполнена серия экспериментов по исследованию течений с помощью аппаратуры и методики проведения PIV-измерений, разработанной в ИПФ РАН. Для визуализации в воду первого контура через специальный бак загрузки трассеров были добавлены микрочастицы полиамида PSP-50 (диаметр частиц 50 мкм). В качестве источника подсветки использовался твердотельный лазер Nd Ylf непрерывного излучения с диодной накачкой LCS-DTL-413 (рис. 2, а). Длина волны излучения составляла 527 нм (зеленый свет), мощность лазера 1,5 Вт. Для создания лазерного ножа использовались дефокусирующие цилиндрические линзы различной кривизны (радиус 2 – 4 мм). Для видеосъемки применялась высокоскоростная высокочувствительная цифровая камера NAC Memrecam HX-3 (рис. 2, б).



(а)



(б)

Рис. 2. Лазер LCS-DTL-413 (а) и цифровая видеокамера NAC Memrecam HX-3 (б)

Основные параметры проведения PIV-измерений представлены в таблице 2. Во второй колонке указан цвет соответствующий цвету выбранных сечений для видеосъемки, которые схематично показаны на рис. 3. В таблице 3 указаны параметры соответствующих экспериментов. Нумерация экспериментов в таблицах 2 и 3 одинаковая.

Таблица 2. Основные параметры проведенных измерений

Номер эксперимента	Сечение, верхнее (в) или нижнее (н) окно / цвет обозначения сечений области съемки на рисунке 5.	Масштаб, мм/рх	Размеры поля измерения, см×см	Скорость съемки кадров/сек / Обратное время экспозиции, 1/с
1	в/ красный	0,32	51×57	50/250
2	в/ красный	0,32	51×57	50/250
3	н/ голубой	0,30	70×45	50/250
4	н/ голубой	0,30	70×45	250/250
5	н/ голубой	0,30	70×45	250/250
6	в/ красный	0,32	51×57	250/250
7	н/ фиолетовый	0,35	80×55	250/250
8	в/ зеленый	0,46	50×82	50/250
9	в/ зеленый	0,46	50×82	50/250
10	в/ зеленый	0,46	50×82	50/250
11	в/ оранжевый	0,44	74×63	50/250
12	н/ темно-синий	0,38	46×53	50/250

Таблица 3. Параметры стенда ТИСЕЙ при проведении PIV-измерений

Номер эксперимента	Параметры стенда*		
	Мощность имитатора активной зоны, кВт	Расход воды через имитатор реактора, м <sup>3</sup> /ч	Расход воды первого контура через АТО, м <sup>3</sup> /ч**
1	0	39,8	-2,0
2	0	39,4	-2,6
3	0	40,0	-2,6
4	0	39,2	-2,6
5	242,2	38,9	-2,7
6	245,0	41,5	-2,8
7	—	—	—
8	0	33,6	-2,7
9	246,8	32,5	-2,8
10	46,4	0	+0,73
11	46,0	0	+0,58
12	46,4	0	+0,48

\* – Осреднение параметров стенда выполнено на интервале времени 30 с.  
 \*\* – Знак указывает на направление циркуляции через АТО по первому контуру: плюс – сверху вниз, минус – снизу вверх.

В экспериментах 1 – 9 в модели реактора обеспечивается принудительная циркуляция воды за счет работы насоса. Вода первого контура циркулирует через ПТО сверху вниз, а через АТО - снизу вверх (обратный клапан АТО открыт).

В экспериментах 10 – 12 насос отключен и реализуется естественная циркуляция воды, обусловленная разностью плотностей в контуре. Циркуляция через ПТО отсутствует, через АТО вода циркулирует сверху вниз (обратный клапан АТО открыт).

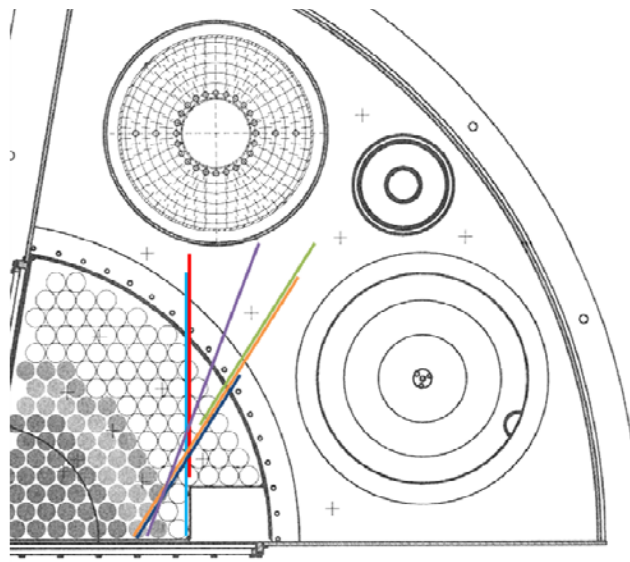


Рис. 3. Схематическое изображение сечений и областей видеосъемки. (цвета соответствуют параметрам эксперимента из таблицы 2). Сечение - вид сверху

### 3. ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ.

В экспериментах 1, 6 и 11 была проведена обработка изображений для нахождения полей скорости. Полное время длительности каждой записи составляло 12 секунд. Скорость съемки и время выдержки представлены в таблице 2. Использовался кросскорреляционный анализ с подпиксельной аппроксимацией пика.

На рис. 4 – 7 на примере эксперимента 1 подробно показаны стадии предобработки изображений. На рис. 6 показан исходный кадр. На рис. 5 показана вырезанная часть кадра с областью течения. На рис. 7 показано изображение, полученное после вычитания фона – среднего изображения за всю последовательность (рис. 6). Полученное изображение проходило кросскорреляционную обработку с подпиксельной аппроксимацией нахождения координаты максимума кросскорреляционной функции. Размер окна поиска скорости (шаг сетки) выбирался  $128 \times 128$  пикс, что соответствовало области с размерами  $4 \times 4$  см. Перекрытие окна было 50%. На рис. 8 показан пример пары фрагментов на последовательных кадрах, над которыми проводилась кросскорреляционная обработка. На рис. 9 приведено мгновенное поле скорости, наложенное на изображение с предыдущего рисунка. Видно, что для мгновенного поля скорости сетка заполнена не полностью. Это связано с отсутствием частиц в этот момент усреднения, а также ошибками при определении скорости, которые были отфильтрованы. Для получения полной картины течения необходимо усреднение по ансамблю реализаций. Полученное таким образом векторное поле представлено на рис. 10, а; на Рис. 10 б показано распределение модуля скорости. Полученный минимальный ансамбль усреднения для одной точки составлял 50. Эти картины наглядно демонстрируют характер течения в исследуемой области. По аналогии была выполнена обработка изображений для экспериментов 6 и 11, результаты приведены на рисунках рис. 11, 12.

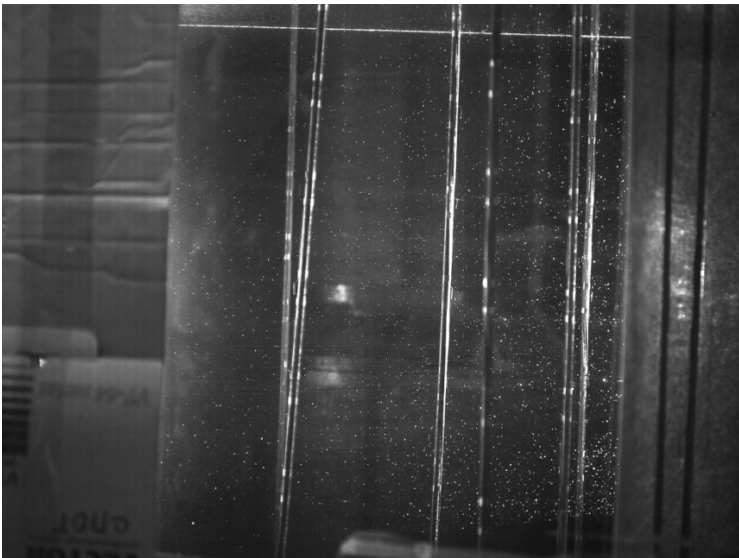


Рис. 4. Исходное изображение

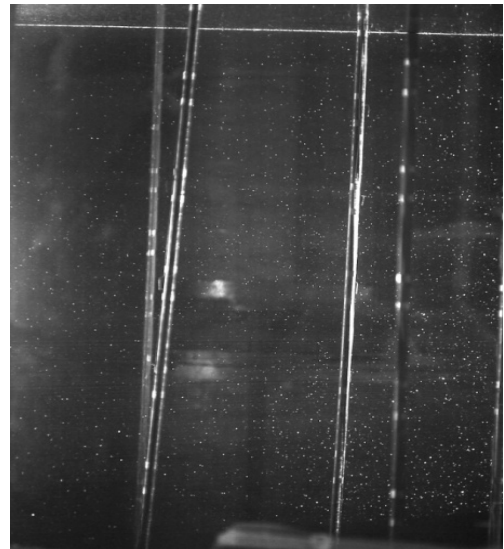


Рис. 5. Часть кадра, показанного на рис. 6

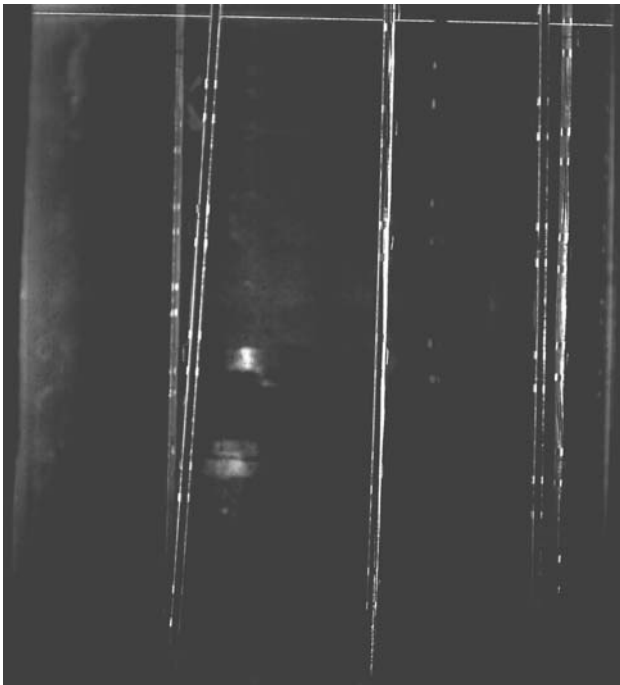


Рис. 6. Фоновое изображение.

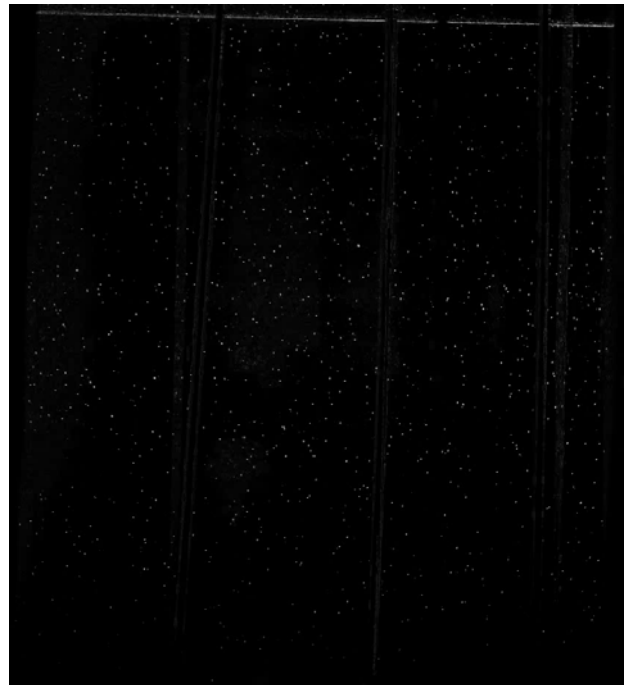


Рис. 7. Изображение после вычитания фона

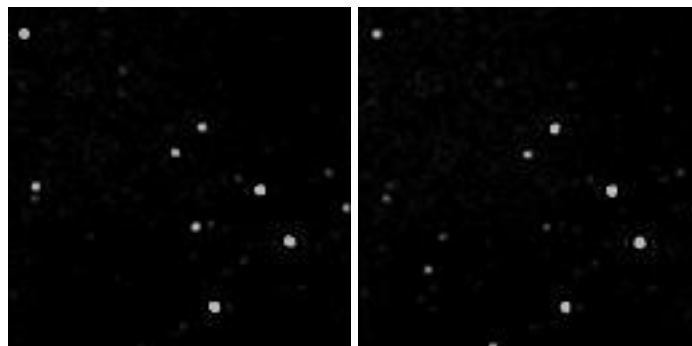


Рис. 8. Пример пары фрагментов на последовательных кадрах  $128 \times 128$  пикс, по которым проводилась кросскорреляционная обработка

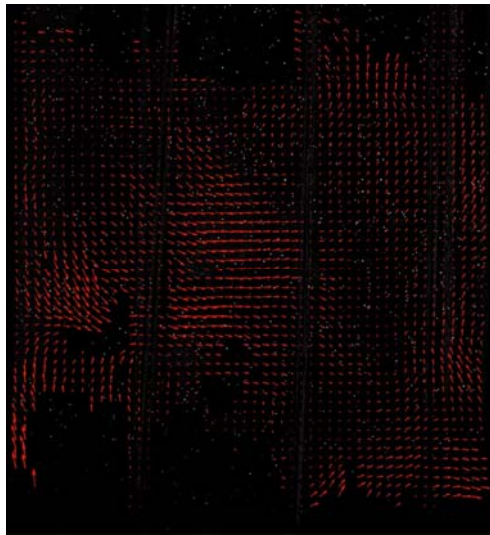


Рис. 9. На изображение из эксперимента 1 наложено полученное мгновенное поле скорости (красные стрелки)

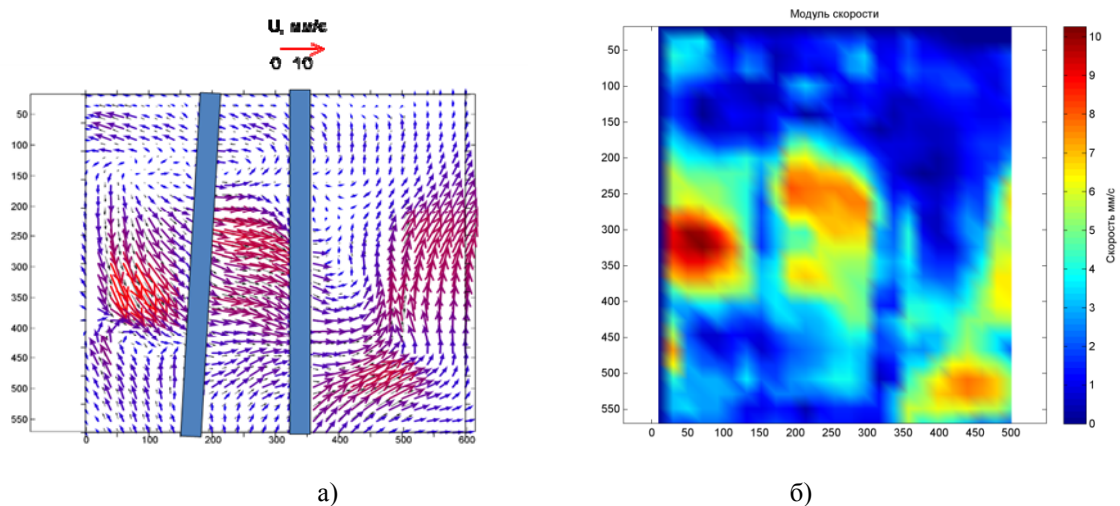


Рис 10. Векторное поле скорости (а) и поле модуля скорости (б) в эксперименте. Режим принудительной циркуляции без нагрева

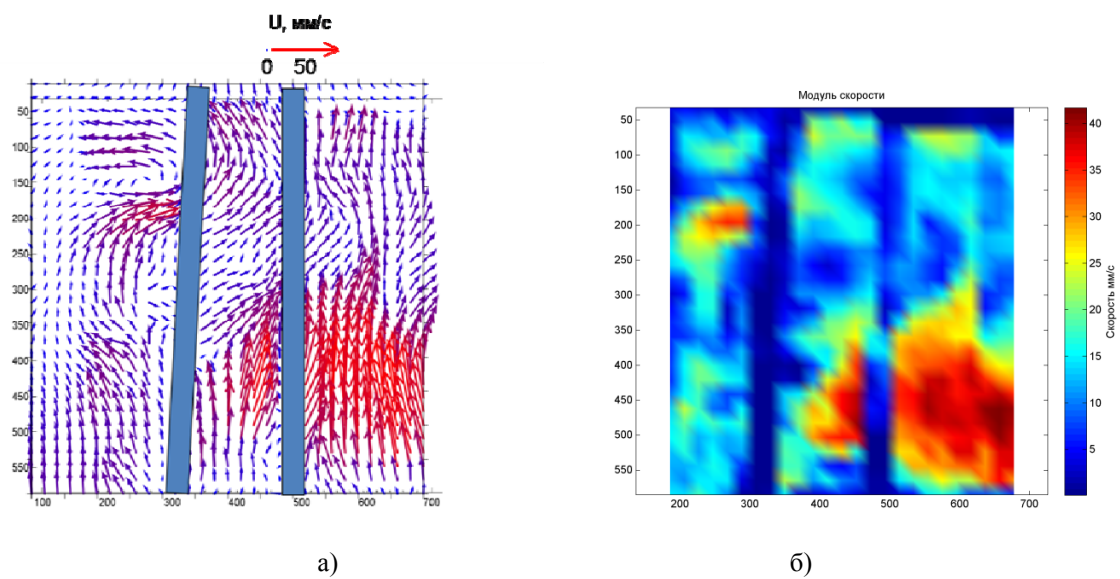


Рис. 11. Векторное поле скорости (а) и поле модуля скорости (б) в эксперименте. Режим принудительной циркуляции с нагревом (240 кВт)



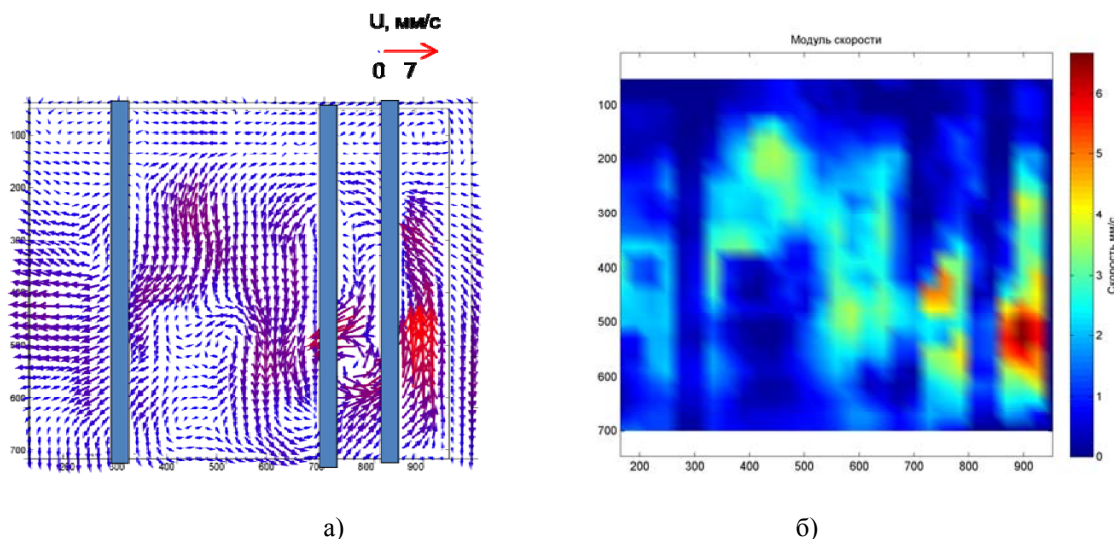


Рис. 12. Векторное поле скорости (а) и поле модуля скорости (б) в эксперименте. Режим естественной циркуляции (46 кВт)

Продemonстрировано, что включение нагрева в режиме принудительной циркуляции увеличило скорость в 4 раза, при этом произошло изменение направления течения в области АТО. При отключении нагрева максимальная скорость падает до 6 мм/с и формируется слабое течение в направлении на ПТО.

Планируется продолжение исследований с помощью рассмотренного PIV-метода. Для повышения качества измерений внутренняя поверхность камеры имитатора реактора покрыта антибликовым материалом, в непрозрачных элементах стенда установлены дополнительные окна. С целью увеличения исследуемой области съемку планируется осуществлять на две HD-камеры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесова Ю.А., Масалов Д.Г., Осипов С.Л., Пахолков В.В., Рогожкин С.А., Шепелев С.Ф. Разработка стенда “ТИСЕЙ” для обоснования теплогидравлических характеристик реактора БН-1200 // Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2012). Сборник докладов. Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 2012.
2. Сергеев Д.А. Измерительный комплекс для исследования течений жидкости методом Particle Image Velocimetry (PIV) на основе твердотельного лазера с диодной накачкой // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 3, С.138-144.

A.A. Kandaurov<sup>1</sup>, V.V Pakholkov<sup>2</sup>,  
S.A. Rogozhkin<sup>2</sup>, D. A. Sergeev<sup>1</sup>, Yu. I. Troitskaya<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>*Institute of applied physics RAS, Russia,  
603950, Nizhny Novgorod, Uliyanova st, 46, E-mail: daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru*

<sup>2</sup>*JSC «Afrikantov OKBM», Russia,  
603074, Burnakovsky proezd, 15, Nizhny Novgorod*

## **STUDY OF THE THERMAL-HYDRAULIC PHENOMENON AT THE TEST FACILITY “TISEY” USING PIV-METHODS**

The paper presents the results of experiments on the study of thermal-hydraulic phenomenon at the model of the sodium fast reactor BN-1200, which is the component of test facility TISEY. Using PIV-methods measured velocity fields of flows in different modes: forced (with and without heating) and natural circulations.

VELOCITY FIELDS, PIV, SODIUM FAST REACTOR