

УДК 621.039.58:681.78

В.В. Безлепкин¹, М.А. Затевахин¹, С.Е. Семашко¹, И.М. Ивков¹, Л.А. Матюшев¹,
Н.В. Семидетнов², С.Ф. Юрас²

¹ОАО "Санкт-Петербургский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ" (ОАО СПбАЭП), Россия
191036 Санкт-Петербург, ул. 2-я Советская, дом 9/2а E-mail: i_ivkov@nio.spbaep.ru
Государственный морской технический университет, Россия
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, E-mail: n.semidetnov@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОТОЧЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ЛДА ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ИССЛЕДОВАНИИ СИСТЕМЫ ОТВОДА ТЕПЛА ИЗ КОНТЕЙНМЕНТА

Для обоснования эффективности системы отвода тепла из защитной оболочки (СПОТ 30), реализованной в проекте АЭС-2006 для площадки второй очереди Ленинградской АЭС, применяются специализированные трехмерные коды и коды в сосредоточенных параметрах. Очень большое значение придается верификации этих кодов в части моделирования новой системы СПОТ 30. При верификации программных средств требуются экспериментальные данные, полученные в условиях, максимально приближенных к натурным. Такие условия реализуются на стенде для моделирования конвекции (СМК). Эксперимент предполагает получение картины установившегося конвективного течения и измерение расходов и температур. Учитывая высокую температуру внутри помещения, которая может превышать 100°C, измерение скорости потока воздуха представляет сложную измерительную задачу.

Для измерения поля потока разработана многоточечная система измерения скорости в 18 точках на основе лазерного доплеровского анемометра (ЛДА). Разработанный измерительный комплекс основан на применении лазерно-диодных ЛДА с обратным рассеянием и автогетеродинным приемом. Обработка сигнала датчиков производится с помощью аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего многоточечный прием сигналов и их обработку в спектральной области.

ЗАЩИТНАЯ ОБОЛОЧКА, ОТВОД ТЕПЛА, КОНВЕКЦИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ,
СКОРОСТЬ ПОТОКА, ЛДА, ЛАЗЕРНЫЙ ДИОД

ВВЕДЕНИЕ

Для отвода тепла из контейнента АЭС-2006 при авариях с разгерметизацией первого контура реакторной установки в ОАО «СПбАЭП» разработан проект пассивной системы отвода тепла из гермообъема защитной оболочки [1]. Эта система относится к техническим средствам преодоления запроектных аварий и предназначена для длительного отвода тепла к конечному поглотителю при авариях, связанных с течами теплоносителя и отказом спринклерной системы, включая аварии с тяжелым повреждением активной зоны.

Для обоснования характеристик этой системы используются коды в сосредоточенных параметрах, такие как КУПОЛ-М [2], и трехмерные гидродинамические коды, такие как ПГС-ТК. Код КУПОЛ-М разработан специалистами ГНЦ РФ ФЭИ и широко используется для анализа теплогидравлики контейнентов АЭС с ВВЭР. Код ПГС-ТК совместная

разработка сотрудников СПбГТУ и ОАО «СПБАЭП» и является специализированным гидродинамическим контейментным кодом, предназначенным для детального анализа процессов теплообмена в защитной оболочке с учетом поверхностной конденсации, код специально ориентирован на решение трехмерных задач гидродинамики и теплопереноса при функционировании пассивной системы отвода тепла.

В настоящее время эти гидродинамические коды проходят этап тестирования и верификации применяемых методик и замыкающих соотношений при моделировании процессов тепло- и массопереноса в контейментах масштаба АЭС ВВЭР с учетом функционирования системы СПОТ ЗО. На этом этапе экспериментальные данные, полученные в условиях, максимально приближенных к натурным, представляют очень большой интерес для тестирования и верификации разрабатываемых кодов.

Необходимость экспериментальных исследований обусловлена тем обстоятельством, что расчет характеристик теплообменника СПОТ ЗО связан с большим количеством неопределенностей. Во-первых, его работа проходит в условиях смешанной (свободной и частично вынужденной) конвекции. Причем свободная конвекция характеризуется большим числом Рэлея и имеет турбулентный характер. Кроме того, проведенные расчеты показали, что в определенных условиях возникает интенсивное течение через зазоры между труб, что приводит к интенсификации теплообмена. Все эти эффекты не поддаются оценкам с использованием простых формул, а для подтверждения результатов, получаемых на основании трехмерного гидродинамического моделирования нужны надежные экспериментальные данные.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА СМК

Стенд моделирования конвекции (СМК) представляет собой модель подкупольного пространства контеймента ЛАЭС-2, выполненную в масштабе 1:40 (рис. 1.), на которой процесс распространения парогазовой среды в натурном контейменте моделируется тепловой конвекцией. Основной целью проведения испытаний на стенде СМК является верификация зависимостей, используемых для расчета характеристик теплообменника СПОТ ЗО, поэтому параметры стенда были выбраны из условия достижения максимально высокого значения числа Рэлея, при котором большая часть модельного теплообменника-конденсатора будет работать в режиме турбулентной конвекции, характерной для натурального теплообменника. Для максимальной детализации получаемых данных на стенде необходимо контролировать протекание следующих процессов:

1. Общую картину развития конвекции в помещении стенда.
2. Параметры течения непосредственно в районе теплообменника.

Кроме того, очевидна необходимость контроля мощности, снимаемой теплообменниками. Следовательно, необходимо обеспечить следующие измерения:

1. Измерения температуры среды в объеме. Для контроля однородности ее распределения (на случай возможного возникновения температурной стратификации) такие измерения необходимо организовать минимум в 5 точках, разнесенных по высоте на оси симметрии объема.

2. Измерения температуры набегающего потока в нескольких точках поперек восходящей струи теплого воздуха.

3. Измерения температуры и скорости в нескольких точках поперек сечения холодной нисходящей струи под теплообменником.

4. Измерения расхода и перегрева воды в системе теплообменников.

5. Измерения температуры поверхности трубки теплообменника в нескольких точках, разнесенных по длине.

6. Измерение тепловых потоков (или разности температур) на теплоизоляционном слое.

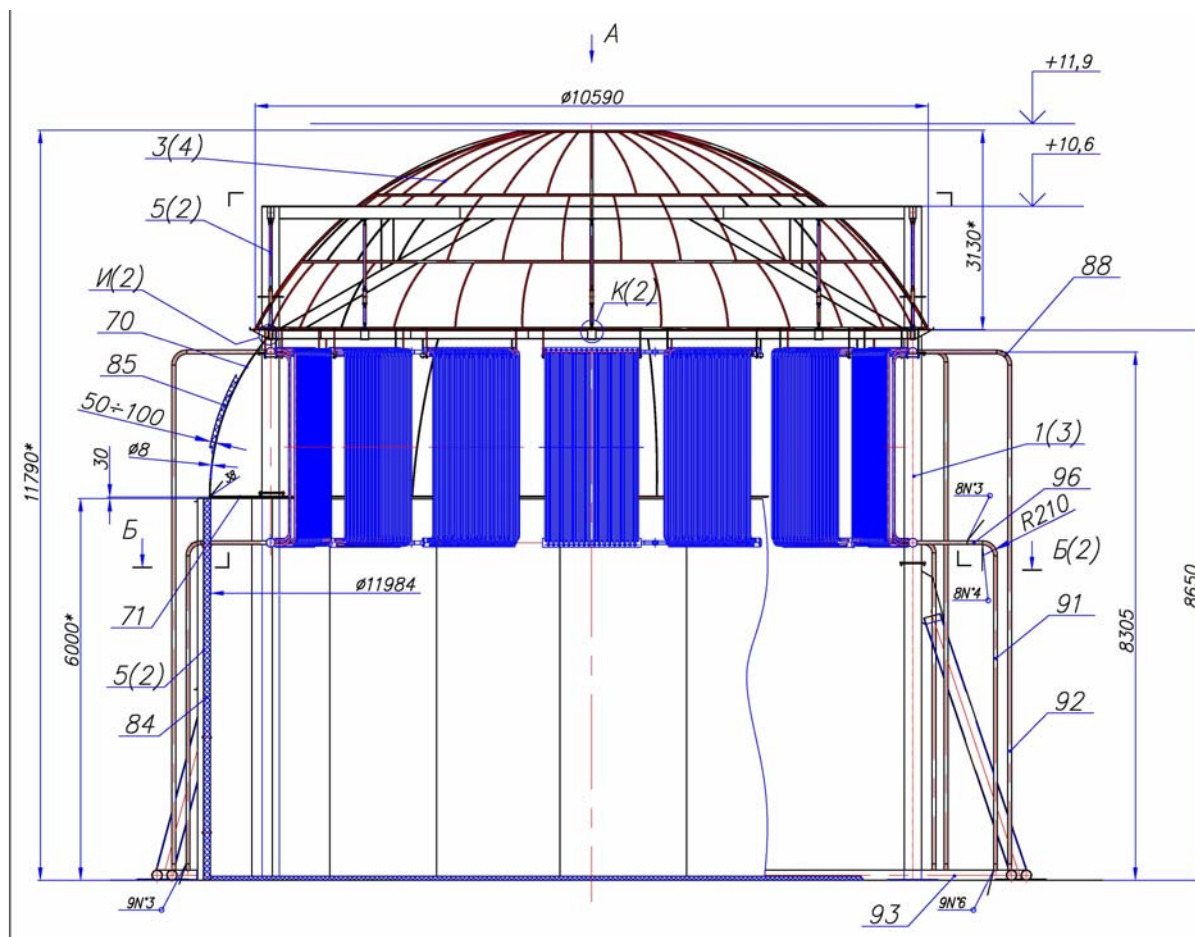


Рис. 1. Экспериментальный стенд для моделирования конвекции

Система измерения температур, расхода и электрической мощности

Для проведения экспериментов была использована следующая система датчиков, описанная в таблице 1. При этом датчики Tz1...Tz5 обеспечивали контроль равномерности распределения температуры по высоте стенда. Измерения температуры поверхности теплообменных трубок и температуры охлаждающей воды в различных сечениях по высоте и на различных трубках (датчики T11...T374) позволили оценить распределение снимаемой мощности на различных участках теплообменника-конденсатора.

Подведенная к нагревателям электрическая мощность регистрировалась с помощью образцовых амперметров и вольтметров классом точности 0,5.

Таблица 1. Точки контроля

Наименование измеряемого параметра	Маркировка позиции измерения	Количество	Контролируемая среда	Место измерения	Параметры контролируемой среды	Параметры окружающей среды
Температура	T11...T374	10	вода	Температура охлаждающей воды внутри трубок теплообменника-конденсатора	15...130 °С	15...100 °С, 0,1 МПа, воздух
Температура	Tz1...Tz5	6	воздух	Температура воздуха внутри защитной оболочки	15...130 °С	15...100 °С, 0,1 МПа, воздух

Наименование измеряемого параметра	Маркировка позиции измерения	Количество	Контролируемая среда	Место измерения	Параметры контролируемой среды	Параметры окружающей среды
Расход	GOUT	1	вода	Расход охлаждающей воды после теплообменников-конденсаторов	0...0.250 л/с	15...40 °С, 0,1 МПа, воздух
Расход	GIN	1	вода	Расход охлаждающей воды в подводящем коллекторе	0...2 л/с	15...40 °С, 0,1 МПа, воздух
Давление	P1	1	вода	Давление в подводящем коллекторе	0...0.6 МПа	15...40 °С, 0,1 МПа, воздух
Сила тока	I1-3	3	Эл. ток	Клеммы нагревателей	0-1500 А	15...40 °С, 0,1 МПа, воздух
Напряжение	V1-3	3	Эл. ток	Клеммы нагревателей	0-50 В	15...40 °С, 0,1 МПа, воздух

Для регистрации результатов экспериментов был использован специально разработанный измерительно-вычислительный комплекс ТЕРМ, который хорошо зарекомендовал себя на других экспериментальных стендах [3].

Измерительно-вычислительный комплекс предназначен для выполнения следующих функций

- прием информации от датчиков и преобразование ее в цифровой вид;
- регистрация информации на магнитных носителях (жесткий диск).

ИВК "ТЕРМ" предназначен для сбора, первичной обработки, вывода на дисплей и регистрации информации, поступающей с датчиков теплофизических стендов, имеющих сигналы в виде напряжения или постоянного тока.

ИВК "ТЕРМ" состоит из двух основных частей: вычислительного комплекса и модульной системы сбора данных (МССД). Вычислительный комплекс, в свою очередь, состоит из персонального компьютера (ПК) и установленного в ПК модуля внутрисистемной связи (МВС), который обеспечивает обмен информацией МССД с ПК.

МССД, которая осуществляет сбор, измерение, преобразование и передачу данных в ПК, конструктивно выполнена в виде шкафа АСВТ, в котором расположены три каркаса типа 2КБФ-6А с модулями МССД, система вторичного электропитания, блок вентиляторов, помехоподавляющий сетевой фильтр и кроссовые зажимы для подключения датчиков стенда.

Основные технические данные ИВК "ТЕРМ":

- количество каркасов МССД - от 1 до 3;
- число измеряемых параметров при помощи ИПТП с диапазоном входного сигнала
 - 1) 0...50 °С – 4;
 - 2) 0...100 °С – 4;
- частота опроса каналов - до 50 Гц;
- минимальный период опроса аналоговых датчиков - 10 мс;
- напряжение питания - +5В, ±15В;
- потребляемая мощность - 500 В А;
- габаритные размеры 500×200×1500мм³;
- масса - 50 кг.

Предел приведенной погрешности измерения в рабочих условиях (температура окружающего воздуха 10...35 °С; относительная влажность воздуха при 30 °С до 75%, при

более низких температурах – без конденсации влаги; атмосферное давление от 67,3 кПа до 106,7 кПа) – не более $\pm 0,5\%$.

Метрологические характеристики ИВК "ТЕРМ" подтверждены результатами метрологической аттестации комплекса в НИТИ.

Результаты численного моделирования

Полученные результаты трехмерного численного моделирования процессов теплообмена были использованы для подробного анализа процессов теплообмена на стенде СМК. В качестве примера полученных результатов приведем рис. 2 – 4, которые иллюстрируют характер циркуляции в контейнменте СМК и сильную неоднородность распределения тепловых потоков по поверхности теплообменника. На последнем рисунке особенно хорошо видно влияние восходящего потока, приводящего к увеличению теплоотдачи обтекаемых поперечным потоком коллекторах и изогнутых участках труб теплообменников, которые в сумме дают большой (порядка 42%) вклад в общий отвод тепла.

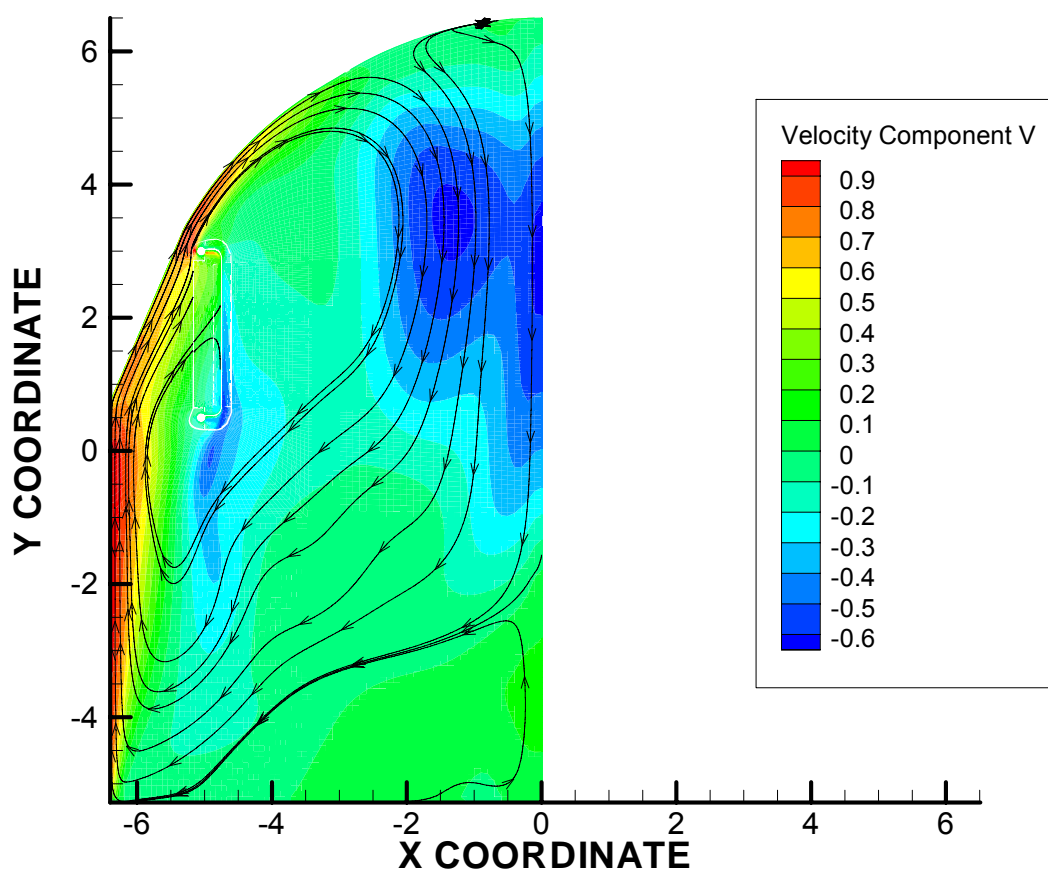


Рис. 2. Поле скорости в помещении СМК

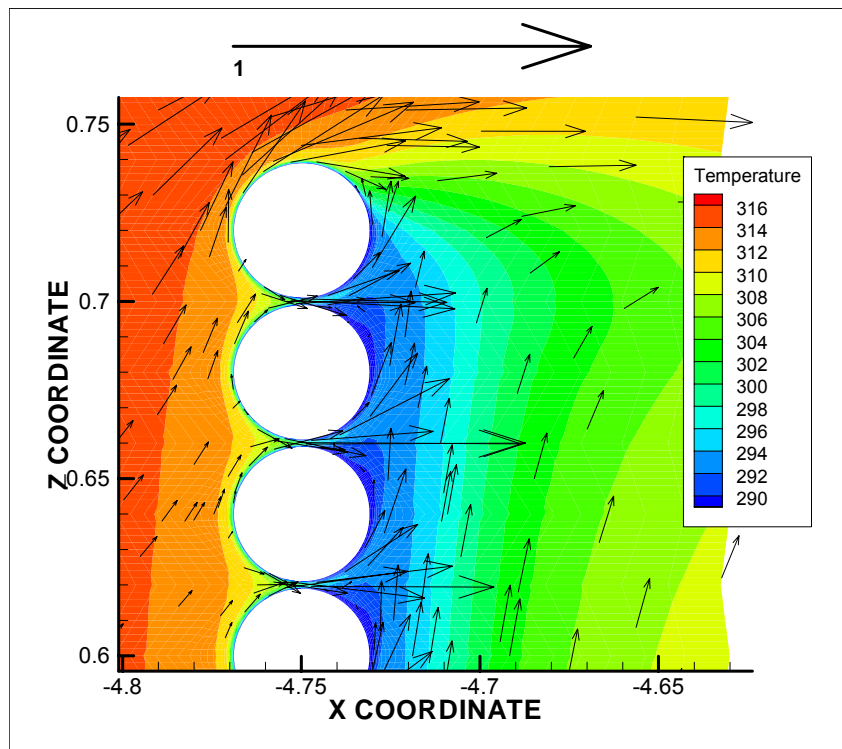


Рис. 3. Распределение температуры в горизонтальном сечении

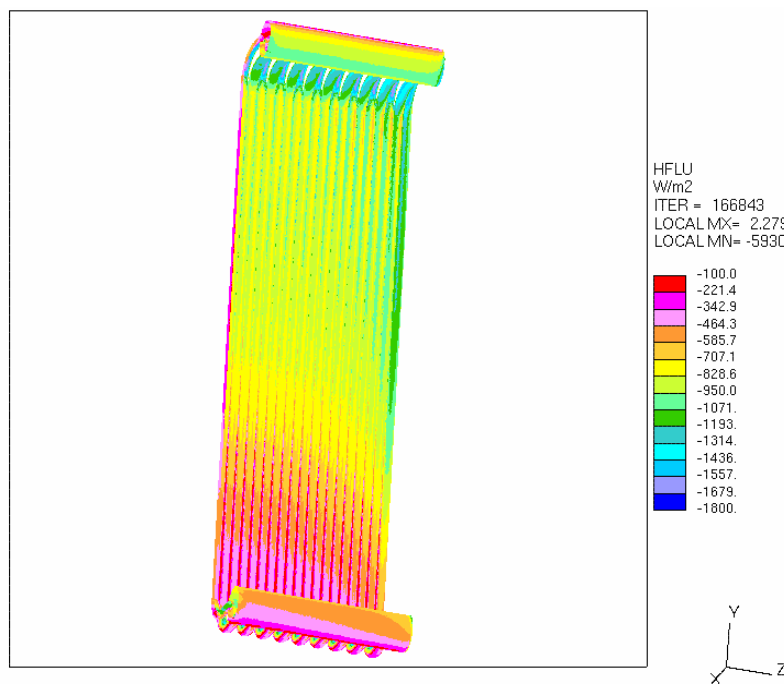


Рис. 4. Распределение тепловых потоков по внешней стороне теплообменника

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ

Работами по стенду СМК предусмотрено создание измерительной системы для регистрации скорости потока воздуха внутри помещения. В основу разработки измерительной системы скорости положены следующие исходные данные:

- измерение вертикальной и радиальной проекций вектора скорости;

- диапазон изменения вертикальной компоненты вектора (по среднему значению) - $0,04 \div 1,0$ м/сек;
- диапазон изменения радиальной компоненты вектора (по среднему значению) - $\pm(0,04 \div 1,0)$ м/сек;
- степень турбулентности потока до 50%;
- 18 точек измерения скорости в заданной зоне потока размером 2 м по радиусу и 2 м по высоте;
- рабочая температура в помещении до 120 °С.

В настоящее время для измерения скоростей потоков газов и жидкостей широкое применение получили бесконтактные оптические методы измерения скорости. Наиболее отработанными и широко распространенными методами измерения в потоках газа являются лазерная доплеровская анемометрия [4] и анемометрия изображений частиц PIV [5]. Учитывая необходимость измерения поля скорости, применение анемометрии изображений частиц представляется на первый взгляд предпочтительным. В то же время в условиях стенда СМК применение этого метода весьма проблематично. Проблемы практической реализации связаны, прежде всего, с большими размерами самого стенда и зоны измерения, а также высокой температуры внутри него. Это требует применения импульсного лазера большой мощности, расположенного за пределами помещения и системы доставки излучения внутрь. При этом осветить всю требуемую зону потока и получить достаточную интенсивность изображения на камере, расположенной за пределами помещения, весьма проблематично. Измерение же поля скорости последовательно в нескольких перекрывающихся участках общей зоны приведет к появлению еще более сложных задач организации траверсирования зоны измерения, устройства окна оптического доступа большого размера и других. Это делает реализацию практически неосуществимой или, по крайней мере, чрезвычайно трудоемкой и дорогой.

Лазерный доплеровский анемометр (ЛДА), как правило, используется для измерения скорости в одной точке или последовательно в нескольких точках потоках с использованием системы траверсирования. Он обладает высоким пространственным и временным разрешением, является бесконтактным и обеспечивает высокую точность измерения скорости. Однако поставленная измерительная задача является нетривиальной, и использовать коммерчески выпускаемый прибор не представляется возможным из-за специфических условий измерения. К наиболее существенным ограничениям относятся:

- высокая температура воздуха внутри помещения,
- высокие требования к уровню потерь тепла и, соответственно к термоизоляции помещения,
- наличие сплошного слоя изоляции поверхности объекта, который затрудняет организацию оптического доступа в помещение,
- большое число точек измерения, расположенных на значительном расстоянии друг от друга и от стенки,
- большое расстояние от точек измерения аппаратуры обработки сигнала;
- высокая степень турбулентности, характерная для конвективных потоков.

Решением проблемы может быть разработка нестандартной аппаратуры измерения скорости воздуха, основанной на принципах лазерной доплеровской анемометрии. Можно допустить некоторое ухудшение метрологических характеристик аппаратуры, относительно классического ЛДА, в угоду реальности практической реализации измерений. Анализ возможных технических решений выявил ряд преимуществ измерительной системы в обратном рассеянии на основе полупроводникового лазерного излучателя. Наиболее компактной измерительной системой на основе лазерного диода является ЛДА с автогомодинным приемом сигнала. Такую систему также называют системой с внутрилазерной регистрацией, с автосмещением, или интерферометром с оптической обратной связью [6]. В этом случае становится возможным создание многоточечной измерительной системы в виде набора малогабаритных ЛДА на основе лазерно-диодных

модулей. Их можно расположить внутри помещения непосредственно в зоне измерения, так как при малых габаритах искажениями скорости крупномасштабного потока можно пренебречь.

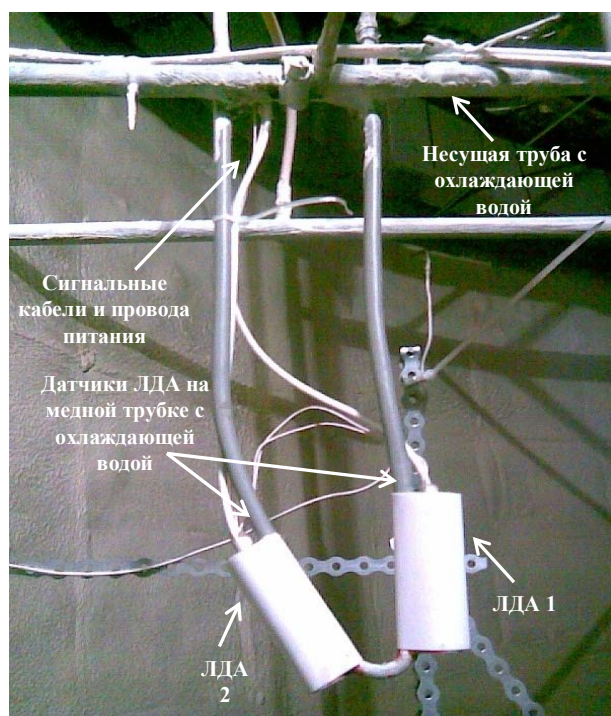


Рис. 5. Двухканальный датчик скорости

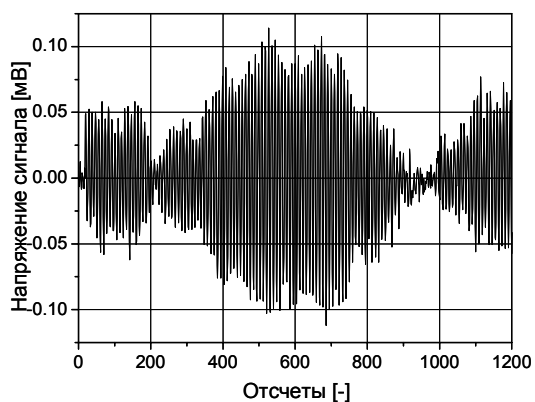


Рис. 6. Сигнал ЛДА от частицы дыма

трассеров в экспериментах использовались частицы дыма, полученные при нагреве вазелинового масла. На рис. 6 показан экспериментальный сигнал, полученный от частиц дыма.

Общая структура комплекса измерительной аппаратуры приведена на рис. 7.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Посттестовые расчеты по условиям экспериментов показали, что характерное число Рэлея для условий этих экспериментов составило величину порядка $5 \cdot 10^{10}$. Это позволяет сделать вывод о том, что большая часть длины теплообменников работала в режиме свободной конвекции, и, таким образом, в условиях, соответствующих натурным. Значения средней температуры в помещении стенда СМК, полученные в этих расчетах, были близки к экспериментальным, что дает возможность заключить, что полученное значение среднего

Заданием предусмотрено измерение двух компонент скорости – вертикальной и радиальной. Средняя тангенциальная компонента полагается равной нулю. Определение компонент скорости последовательным их измерением в случае конвективных течений нагретого газа может привести к значительным погрешностям [7]. Поэтому использовано одновременное измерение компонент двухканальным датчиком скорости. Рабочий диапазон температур лазерного диода (также и фотодиода) обычно не превышает 60° , поэтому необходимо обеспечить охлаждение компонент, их теплоизоляцию и отвод тепла. Воздушное охлаждение в данном случае невозможно, поэтому разработана конструкция модуля с водяным охлаждением. На рис. 5 приведена фотография датчика. Вся система измерения скоростей потока в 18 локальных точках в этом случае включает в общей сложности 36-ти измерительных каналов.

Сигналы ЛДА оцифровываются быстродействующими АЦП, установленными на шине PCI персонального компьютера. Всего использовано три карты двухканальных 16-входовых АЦП с буферной памятью. Разработанное программное обеспечение осуществляет управление сбором данных путем опроса установленного числа каналов в определенной последовательности. Сигналы записываются в буферную память и после накопления заданного объема информации передаются в память ПК для обработки и вычислений. В качестве

коэффициента теплоотдачи (порядка $11 \text{ Вт/м}^2/\text{К}$) соответствует реальной его величине. Отметим, что практически такое же значение было получено при расчетах этих экспериментов по коду КУПОЛ–М, использованному для обоснования проектного решения по параметрам натурального теплообменника.

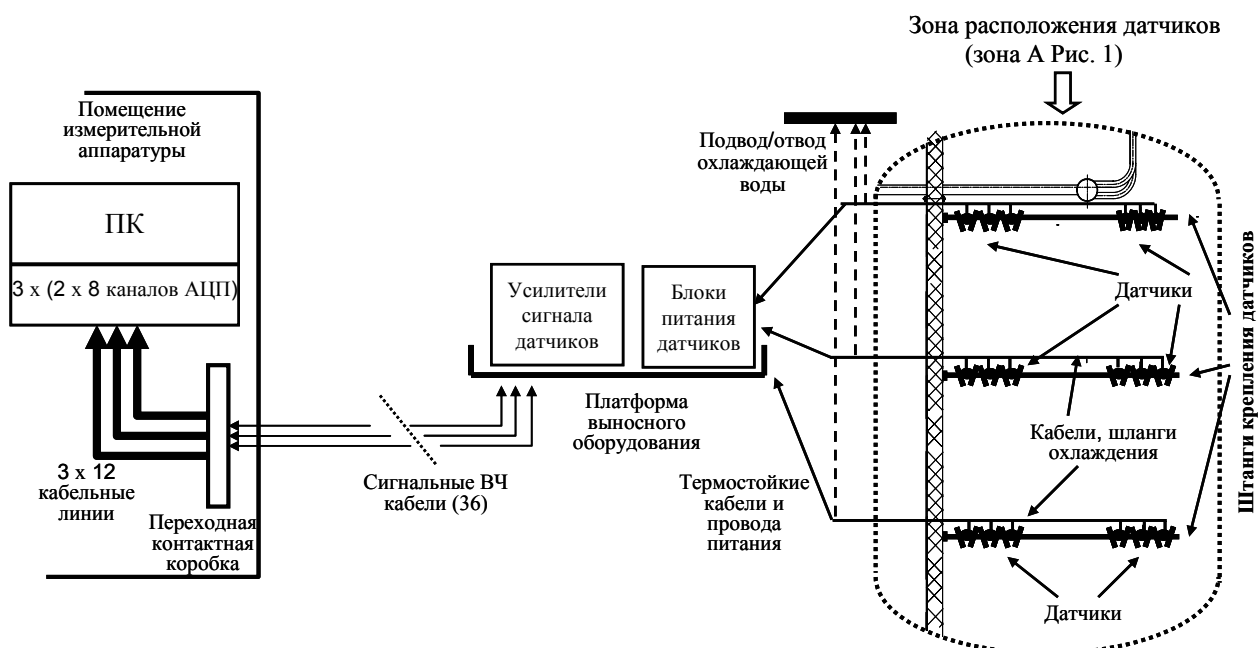


Рис. 7. Общая структура системы измерения скорости

Результаты экспериментов также использовались для верификации кода ПГС-ТК. В таблице приведены расчетные и экспериментальные значения средней стационарной температуры, а также дополнительные расчетные параметры: процент тепловых потерь, коэффициент теплоотдачи к теплообменнику, числа Нуссельта и Рейля. Из таблицы 2 видно, что имеет место хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений средних температур внутри помещения СМК.

Таблица 2. Результаты расчетов

Вариант	$T_{\text{средняя}},$ °С		Потери, %	$\alpha_T,$ Вт/м ² /К	Nu	Ra
	Расчет	Эксперимент				
1	68.1	68	4.7	11.2	1041	$4.8 \cdot 10^{10}$
2	62.17	58	4.4	11.3	1065	$5.3 \cdot 10^{10}$

Измерения вертикальной и радиальной компонент вектора скорости показали, что конвективное течение воздуха в помещении СМК характеризуется очень высокой степенью турбулентности и имеет вихревой характер. Отмечаются как крупномасштабные турбулентные вихри с относительно редким периодом возникновения, так и более мелкие высокочастотные вихри. На Рис. 8 приведена экспериментальная зависимость вертикальной компоненты скорости воздуха на верхнем уровне измерения во второй точке измерения.

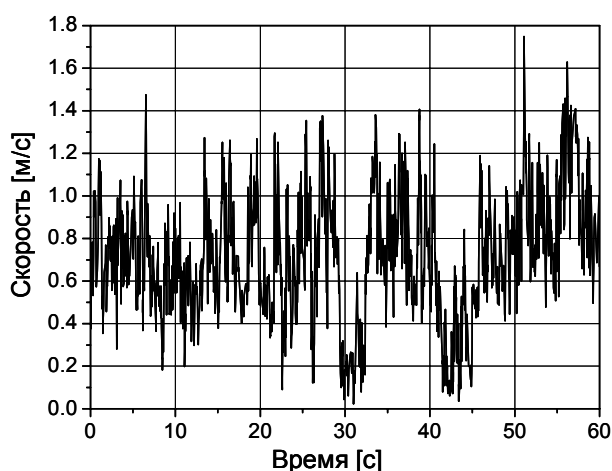


Рис. 8. Вертикальная компонента скорости воздуха

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты, проведенные на стенде СМК, позволили получить данные, необходимые для верификации кода КУПОЛ-М и для тестирования и верификации разрабатываемого трехмерных гидродинамического кода ПГС-ТК. Применение для моделирования течения многокомпонентной сжимаемой среды трехмерных кодов -3D позволило объяснить характерные особенности глобальной циркуляции среды в объеме всего стенда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Расчетно-экспериментальное** моделирование процессов в защитной оболочке при наличии пассивного конденсатора в системе пассивного отвода тепла / Семашко С.Е., Безлепкин В.В., Затевахин М.А. и др. // Атомная энергия, том 108, выпуск 5, май 2010 г., Москва, С. 308–312.
2. Код КУПОЛ-М. Версия 1.1. Методика расчета // *Отчет о научно-исследовательской работе ГНЦ РФ ФЭИ. № 82.005/5-1, 2001.*
3. **Критическая** мощность парогенерирующих каналов при низких скоростях циркуляции теплоносителя / Алексеев С.Б., Илюхин Ю.Н., Кухтевич В.О. и др. // Материалы конференции «Теплофизика-98», Обнинск, 1998г.
4. **Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С.** Методы лазерной доплеровской анемометрии. – М: Наука. – 1982. 304 с.
5. **Дулин В.М., Маркович Д.М.** Измерение характеристик мелкомасштабной турбулентности в свободных и ограниченных струйных потоках при помощи PIV метода // Труды конференции ОМИП-2007. С. 126-129
6. **Двухканальный** интерферометр на основе внутрилазерной регистрации отраженного излучения / Козин Г.И., Кузнецов А.П., Башутин О.А. и др. // Измерительная техника, №7, 36-39, (1999)
7. **Оптические методы исследования потоков.** Дубнищев Ю.Н. и др. Новосибирск: Сибирское университетское из-во, 2003. – 418с.

V.V. Bezlepkin¹, M.A. Zatevahin¹, S.E. Semashko¹, I.M. Ivkov¹, L.A. Matjushev¹,
N.V. Semidetnov², S.F. Juras²

¹ Joint Stock Company "Saint Petersburg Research and Design Institute
"ATOMENERGOPROEKT" ",
191036 Saint-Petersburg, 2-nd Sovetskaja, 9/2a, E-mail: i_ivkov@nio.spbaep.ru
²State Marine Technology University,
190008, Saint-Petersburg, ul. Lotsmanskaja,, E-mail: n.semidetnov@mail.ru

THE APPLICATION OF MULTIPOINT LDA TO EXPERIMENTAL STUDY OF THE CONTAINMENT HEAT EVACUATION SYSTEM

To estimate the efficiency of the heat evacuation system designed for the new nuclear power plant special 3D codes are used. It is very important to verify the codes in concern with the modeling of new safety measures. Therefore the experimental data obtained at the conditions similar to actual ones are needed. Such conditions are realized at the specially constructed test rig. Measurement of the air velocity, cooling water flow rates and temperatures has to be carried out. For the measurement of the velocity field the multipoint LDA system is build, which uses laser diode and self-mixing receiving technique.

HEAT EVACUATION, CONVECTION, HEAT EXCHANGER, AIR VELOCITY, LDA, SELF-MIXING TECHNIQUE