



УДК 621.039

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

EXPERIMENTAL STAND FOR RESEARCH OF THE COOLANT FLOW BY DIGITAL TRACER IMAGING (PIV)

Чиканцев Григорий Евгеньевич, студент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. chikancev@bk.ru

Никитин Александр Дмитриевич, аспирант каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Догарев Роман Сергеевич, студент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. dogarb@yandex.ru

Хоссейн Исмаил, университет Дакка, Бангладеш, аспирант, каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: durekothau309@gmail.com, Тел.: +7(905)800-84-67

Велькин Владимир Иванович, кан.-т. техн. наук, доцент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.i.velkin@urfu.ru . Тел.: +79221046248

Gregory E. Chikancev, student, DEP. "Nuclear power plants and renewable energy sources", Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira St., 19.

Alexander D. Nikitin, graduate student, DEP. "Nuclear power plants and renewable energy sources", Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira St., 19.

Roman S. Dogarev, student, DEP. "Nuclear power plants and renewable energy sources", Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira St., 19.

Ismail Hossain, University of Dhaka, Bangladesh, PhD student, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: durekothau309@gmail.com. Ph.: +7(905)800-84-67

Vladimir I. Velkin, Cand. Sci., Associate professor, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin,620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.i.velkin@urfu.ru . Ph.: +79221046248

Аннотация: Представлен экспериментальный стенд для исследований двухфазных течений методом цифровой трассерной визуализации с использованием генератора тумана Martin Magnum и лазерной установки. Система оптического измерения гидроаэродинамических характеристик потока теплоносителя (PIV-метод) позволит получить распределения скоростей в прямолинейных и различных поворотных участках трубопровода, достоверно определять условия вихреобразования и возникновения градиента давлений на внешние и внутренние стенки в поворотных участках.

Abstract: Experimental stand for research of two-phase flows by digital tracer visualization using a fog generator and a Martin Magnum laser system is presented. Optical measurement hydroaerodynamics characteristics of the coolant flow (PIV-method) allows to obtain the velocity distribution in straight and turning various parts of the pipeline in order to reliably define the conditions of vortex formation and the occurrence of the pressure gradient on the outer and inner walls of the turning portions.

Ключевые слова: цифровая велосиметрия; двухфазное течение; вибрации трубопроводов.

Key words: PIV; digital velocimetry; two-phase flow; vibration of pipelines.

Одним из направлений при решении проблемы снижения вибраций в трубопроводах являются исследования в области оптимизации геометрии пассивных устройств, воздействующих на гидродинамику двухфазного потока [1,2].

Для уменьшения или устранения вибраций трубопроводов используются различного рода активные и пассивные устройства, изменяющие гидродинамическую структуру потока [3]. Для исследований влияния пассивных устройств на снижение вибрации был создан экспериментальный стенд с принудительной циркуляцией теплоносителя и впрыском воздушной смеси для формирования различных режимов двухфазного потока (рис. 1). Стенд представляет собой контур циркуляции теплоносителя (воды), оснащен устройством засева потока трассерами (генератор тумана Martin Magnum 1800). Установка позволяет проводить исследования режимов течения при числе Рейнольдса 10^4 - 10^6 , что обеспечивает применимость полученных результатов для анализа аэродинамики установок реального масштаба [4].

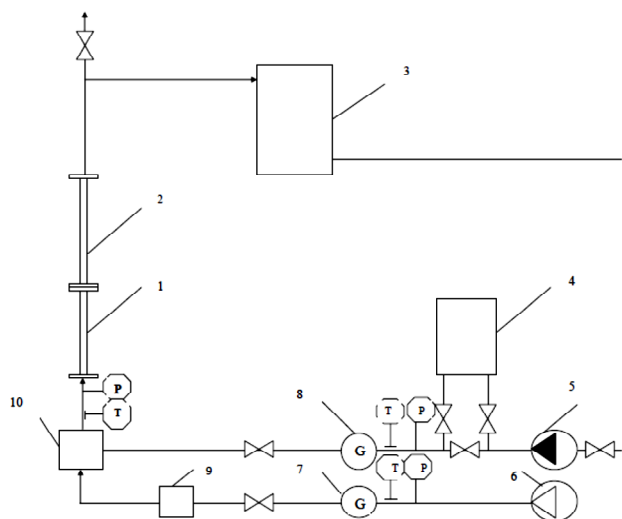


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 – вставка-завихритель; 2- рабочий участок канала; 3 – бак; 4 – панель управления; 5 – насос; 6 – компрессор; 7 – расходомер по воздуху; 8 – расходомер по воде; 9 – демпфер; 10-узел смешения.

В ходе экспериментов исследовалось влияние вставок с различным количеством эвольвентных канавок на устойчивость и продолжительность завихряющего потока.

На рис. 2 представлены вставки-завихрители с различной геометрией внутренней поверхности.



Рис. 2. Фото вставок- завихрителей:

а) с тремя канавками, б) с двенадцатью канавками; в)- набор исследуемых образцов вставок-завихрителей с различной геометрией внутренней поверхности

Исследования влияния закрутки двухфазного потока с помощью вставок-завихрителей с эвольвентными канавками проводились на гидродинамическом стенде с воздушно-водяным потоком, циркулирующем в замкнутом контуре из труб диаметром 45 мм с прозрачными секциями из оргстекла для визуализации течения [5].

Анализ результатов проведенных измерений и их статистическая обработка показали, что эвольвентные вставки-завихрители являются достаточно эффективными пассивными устройствами, позволяющими при сравнительно малом гидравлическом сопротивлении снизить уровень виброперемещения трубопроводов с двухфазными потоками в 1,5-2 раза.

Расчетно-теоретические и экспериментальные данные, полученные на стенде, необходимо было проанализировать с помощью более совершенных методов и инструментов исследований микропотоков.

Для верификации результатов математического моделирования в рамках данной задачи рассматривалось несколько методик с точки зрения возможности получения требуемого объема и точности результатов. Это:

- метод теневых исследований Теплера;
- фотографический метод стробоскопической визуализации;
- метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА);
- метод цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry, PIV).

Из рассмотренных методов только последний удовлетворял требованиям поставленной задачи.

Он позволяет измерять поля скорости в каналах субмиллиметрового размера с разрешением векторного поля до 2-5 мкм/вектор в сечении, толщиной всего несколько микрон. Метод PIV (цифровая трассерная визуализация) – оптический метод измерения мгновенных полей скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока. Импульсный лазер создает тонкий световой нож и освещает мелкие частицы, взвешенные в исследуемом потоке. Положение частиц в момент двух последовательных вспышек лазера регистрируются на два кадра цифровой камеры. Скорость потока определяется расчетом перемещения, которое совершают частицы за время между вспышками лазера. Определение перемещения основано на применении корреляционных методов к трассерным картинкам с использованием регулярного разбиения на элементарные области.

Для проведения экспериментов по исследованию потока жидкости в оптическом диапазоне была использована измерительная система «Полис», позволяющая измерять пространственные распределения двух и трех компонент мгновенной скорости потока, рассчитывать пространственные производные скорости, а также рассчитывать целый набор смешанных статистических моментов (до четвертого порядка, в том числе напряжения и потоки Рейнольдса) флуктуаций различных величин: скорости, градиентов скорости, температуры, концентрации дисперсной фазы и др.

Источником световых импульсов в данной схеме является лазер, который состоит из излучателя и системного блока [6]. В излучателе расположены: 2 лазерных резонатора, 2 квантрона с активным веществом и лампой накачки, система сведения лучей, преобразователь частоты лазерного излучения и оптический аттенуатор. В системном блоке расположены: источник питания импульсных ламп накачки лазера, система охлаждения лазера и блок управления работой лазера. Излучатель и системный блок через разъем соединены между собой гибким рукавом, в котором размещены шланги системы охлаждения, кабели силового питания и сигнальные кабели.

Локализация светового импульса в измерительную область осуществляется с помощью оптической насадки (создания лазерного ножа и системы регулирования его толщины). Фокусное расстояние оптической системы может меняться от 0,3 до 0,6 м. При этом толщина лазерного ножа меняется от 0,5 до 3 мм.

Регистрация отраженных оптических импульсов осуществляется кросскорреляционной камерой, которая предназначена для двукратной регистрации

трассерных картин в потоке и может работать как в двухкадровом, так и в однокадровом режиме. Временная задержка между вспышками лазера при двухкадровом режиме регистрации кадров может варьироваться от 10 мкс до 259 мс. Диагностика закрученного потока осуществлялась методом цифровой трассерной визуализации (PIV). Метод PIV – полевой оптический метод измерения полей скорости жидкости и газа. Для измерения полей скорости в интересующих сечениях модели применялась PIV-система Полис, разработанная в ИТ СО РАН [7, 8].

Система позволяет измерять две компоненты вектора скорости одновременно во всем заданном сечении трубопровода (D 50 мм).

Турбулентность двухфазного и однофазного потоков представляет собой чрезвычайно сложный объект для исследования с очень большим количеством степеней свободы и обычно характеризуется широкополосным набором различных компонент движения внутренних сил, среди которых существенную роль играют мелкомасштабные и высокочастотные составляющие, измерение которых подразумевает высокое пространственное и частотное разрешение используемого метода. Преимуществом оптических методов является невозмущающий характер измерений, а также возможность регистрации мгновенных картин течения. Это позволяет не только визуализировать вихревую структуру потоков различных масштабов и конфигураций, но и получать количественную информацию о турбулентных пульсациях и завихрениях. После небольшой обработки изображения средствами прикладной программы получают картинку векторов скоростей закрученного потока жидкости.

Указанный эффект демонстрирует возможность пассивного управления виброперемещением за счет диссипации давления на наружную стенку в поворотных участках трубопроводов посредством вставок, установленных перед входом в поворот.

ВЫВОДЫ

1. Для верификации результатов моделирования разработан экспериментальный стенд и введена в эксплуатацию оптическая лазерная система, основанная на технологии импульсной визуализации частиц микротрассеров (PIV-система), позволяющая проводить исследование гидродинамической микроструктуры жидкостного потока после прохождения вставки-завихрителя.
2. Система оптического измерения гидроаэродинамических характеристик потока теплоносителя (PIV-метод) позволит получить распределения скоростей в прямолинейных и различных поворотных участках трубопровода, достоверно определять условия вихреобразования и возникнове-

ния градиента давлений на внешние и внутренние стенки в поворотных участках, что даст возможность провести верификацию расчетных моделей при решении задачи пассивного управления (снижения) виброперемещением трубопроводов энергетического оборудования и повышения надежности и безопасности эксплуатации его в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бараненко В.И., Олейник С.Г., Беляков О.А., Истомин Р.С., Кумов А.В.: «Эрозионно-коррозионный износ оборудования и трубопроводов на АЭС с РWR и ВВЭР и его влияние на надежность и безопасность АЭС», Четвертая международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 2005г., г.Подольск, ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС».
2. Федорович Е.Д., Фокин Б.С., Аксельрод А.Ф. и др. Вибрация элементов оборудования ЯЭУ.-М: Энергоатомиздат 1989.-168 с.
3. Беленький М.Я., Готовский М.А, Фокин Б.С. Устранение вибраций трубопроводов, транспортирующих вскипающие и двухфазные потоки// Теплоэнергетика.-1996.-№3, с.41-46
4. Касина В.И., Леонтьев А.И. Гидравлическое сопротивление закрученных потоков воды и паровой смеси в трубах.//Теплоэнергетика -2005.-№3, с.40-47.
5. Велькин В.И., Комоза Д.С., Крутиков А.Ю., Хныкина В.В. Микропроцессорный блок управления комплексным диагностическим стендом для исследований вибраций трубопроводов АЭС// Известия ВУЗов «Атомная энергия», 2009 г. С.4-7.
6. Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Маркович Д.М., Маслов А. А., Поливанов П. А., Цырюльников И.С., Ярославцев М.И. Применение лазерного измерительного комплекса «ПОЛИС» для измерений полей скоростей в сверхзвуковом потоке в аэродинамических трубах // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 3. С. 343-352.
7. Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 109131.
8. Алексеенко С.В., Бильский А.В., Маркович Д. М. Применение метода цифровой трассерной визуализации для анализа турбулентных потоков с периодической составляющей // Приборы и техника эксперимента. 2004. Т. 47. № 5. С. 703-710.