

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
А К Ц И О Н Е Р Н О Е О Б Щ Е С Т В О
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А. И. Лейпунского

ФЭИ-3315

В. Н. Дельнов, М. А. Котов

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ГИДРОДИНАМИКИ СИММЕТРИЧНОЙ ПЛОСКОЙ НАПОРНОЙ
КАМЕРЫ С ДВУМЯ ПОДВОДЯЩИМИ И ДВУМЯ ОТВОДЯЩИМИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ КАНАЛАМИ**

Обнинск – 2025

Дельнов В.Н., Котов М.А.

Экспериментальное и аналитическое исследование гидродинамики симметричной плоской напорной камеры с двумя подводящими и двумя отводящими цилиндрическими каналами: Препринт ФЭИ-3315. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2025. — 34 с.

Ключевые слова: гидродинамика, проточная часть, напорная камера, гидравлическое сопротивление, массовый расход.

Предметом исследования является гидродинамика проточной части симметричной плоской напорной камеры с двумя подводящими и двумя отводящими цилиндрическими каналами.

Цель работы — определение гидродинамических характеристик проточной части напорной камеры плоского типа и выявление закономерности изменения коэффициентов гидравлического сопротивления отводящих каналов при различных параметрах набегающего на них потока жидкости.

Экспериментальные данные получены при определенном диапазоне соотношения размеров напорной камеры, турбулентном течении жидкости в напорной камере и идентичном массовом расходе жидкости через нее.

Дано полуэмпирическое соотношение по определению соотношения массовых расходов жидкости в отводящих каналах в зависимости от соотношения массовых расходов жидкости в подводящих каналах при различных конструкциях вставок в них.

Установлена неизвестная ранее закономерность изменения коэффициентов гидравлического сопротивления смежных отводящих каналов, подключенных к напорной камере, при изменении параметров набегающего на них потока.

Практическая значимость работы состоит в получении экспериментальных данных по коэффициентам гидравлических сопротивлений изолированных расходомерных каналов и смежных отводящих каналов, массовым расходам жидкости в подводящих и отводящих каналах и в определении закономерности изменения указанных коэффициентов от параметров набегающего на отводящие каналы.

Представленные данные по гидродинамике напорной камеры могут быть использованы в технических расчетах напорных камер данного типа применительно к теплообменному оборудованию ЯЭУ.

The subject of the study is hydrodynamics of the flow part of a symmetrical flat pressure chamber with fluid removal through two adjacent outlet cylindrical channels.

The purpose of the study is to determine hydrodynamic characteristics of the flow part in a flat-type pressure chamber and to identify regularities in the change of the hydraulic resistance coefficients of the outlet channels at various parameters of the fluid flow entering them.

The experimental data were obtained within a certain range of the ratio of flat pressure chamber dimensions, with a turbulent flow motion in the pressure chamber and an identical rate of mass flow through it.

A semi-empirical relationship is given for the determination of the ratio of mass flow rates in the outlet channels depending on the ratio of mass flow rates in the inlet channels for different designs of inserts in the outlet channels.

A previously unknown regularity has been established for the change in the hydraulic resistance coefficients of the adjacent outlet channels connected to the pressure chamber when the parameters of the fluid flow entering the outlet channels change.

The practical significance of the study consists in obtaining experimental data on the coefficients of hydraulic resistance of isolated flow-metering channels and adjacent outlet channels, mass flow rates in the inlet and outlet channels and in the determination of the regularity of these coefficients' change depending on the parameters of the fluid flow entering the outlet channels.

The presented data on the pressure chamber hydrodynamics can be used in the technical calculations of the pressure chambers of this type as applied to heat exchange equipment of nuclear power plants.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Обзор результатов экспериментальных и аналитических исследований гидродинамики напорных камер	7
2. Стендовое и контрольно-измерительное оборудование, экспериментальный участок.....	9
3. Методика проведения экспериментального исследования гидродинамики напорной камеры	19
4. Результаты экспериментального исследования гидродинамики напорной камеры	24
Выводы	31
Список литературы.....	32

ВВЕДЕНИЕ

Напорные камеры занимают важное место в современной инженерной практике, находя широкое применение в энергетике, химической промышленности, системах водоснабжения и других отраслях. Напорные камеры представляет собой систему трубопроводов или каналов, предназначенных для сбора, распределения или смешения потоков жидкости или газа между различными точками системы. Она играет ключевую роль в обеспечении эффективного и контролируемого движения сред в различных технических и технологических процессах.

Несмотря на прогресс методов вычислительной гидродинамики в решении трёхмерных задач сложной геометрии, подобные методы остаются довольно ресурсоёмкими и по-прежнему остаётся необходимость в проведении экспериментальных исследований для получения опытных данных.

Использование достоверных данных о гидродинамике проточных частей напорных камер при их проектировании напрямую влияет на работоспособность, надёжность, безопасность и экономичность систем, в которых они используются.

В симметричных плоских напорных камерах с двумя подводящими и двумя отводящими цилиндрическими каналами имеет место сложное течение с областями разделения и слияния, меняющимися скоростями и давлениями. Понимание этих процессов важно для оптимизации конструкции напорных камер, повышения эффективности их работы и предотвращения возможных аварийных ситуаций.

Актуальность исследования обусловлена потребностью в получении дополнительной информации о гидродинамике напорных камер.

Результаты работы могут быть применены при разработке новых технических решений, где используются распределительные системы для жидкостей и газов.

В настоящее время существует значительный объем работ по исследованию гидродинамики различных типов напорных камер. Однако большинство исследований концентрируется на напорных камерах с множеством отводов или асимметричным распределением потоков. Гидродинамика симметричных напорных камер с двумя подводящими и двумя отводящими каналами изучена недостаточно. Это создает определенные трудности при их проектировании и оптимизации, так как отсутствуют надежные данные о поведении потоков в таких системах и влиянии геометрических и режимных параметров на гидродинамические характеристики.

Целью работы является экспериментальное определение гидродинамических характеристик проточной части симметричной напорной камеры плоского типа с двумя подводящими и двумя отводящими цилиндрическими

каналами при различных условиях подвода жидкости в камеру при постоянном массовом расходе жидкости через нее и турбулентном режиме течения жидкости в ней.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проведен анализ известных экспериментальных и аналитических исследований гидродинамики напорных камер данного типа;
- разработан и изготовлен экспериментальный участок;
- выполнена градуировка расходомерных каналов;
- на экспериментальном участке проведены измерения массового расхода воздуха через напорную камеру, избыточных статических давлений и перепадов давления в подводящих и отводящих каналах, определены массовые расходы через подводящие и отводящие каналы, коэффициенты местного гидравлического сопротивления (далее — МГС) выходных частей отводящих каналов со вставками и без них и чисел Рейнольдса в подводящих и отводящих каналах;
- обработаны и проанализированы полученные экспериментальные данные, выявлены закономерности и особенности гидродинамики напорной камеры;
- сформулированы рекомендации по учету выявленных особенностей при проектировании и эксплуатации подобных напорных камер.

Практическая значимость работы состоит в получении новых экспериментальных данных по гидродинамике напорной камеры указанного типа, выявлении закономерности и особенностей гидродинамики в ней, выдаче практических рекомендаций по экспериментальному моделированию гидродинамики в напорных камерах.

Полученные экспериментальные данные позволят повысить эффективность энергетических и промышленных напорных камер и снизить энергозатраты при эксплуатации насосного и компрессорного оборудования.

Результаты работы имеют значительную практическую и научную ценность, отвечая актуальным потребностям атомной отрасли и способствуя развитию научно-технического прогресса.

1. Обзор результатов экспериментальных и аналитических исследований гидродинамики напорных камер

В наше время активно ведутся экспериментальные и аналитические исследования гидродинамики различных типов напорных камер.

Результаты экспериментального исследования распределений скорости жидкости на входе и выходе из раздающих и собирающих коллекторных систем ЯЭУ и теплообменников, коэффициенты МГС их проточной части в целом и отдельных ее участков представлены в работах [6], [7], [15].

Результаты исследования гидродинамических характеристик потока жидкости в напорной камере при подводе его через один центральный патрубок изложены в работах [20], [21].

В работах [13], [17] исследованы распределения расхода жидкости по системе параллельных каналов раздающего коллектора плоского типа.

Вопросы гидравлического профилирования потока жидкости путём установки диффузора на входе в топливную кассету рассмотрены в работах [12], [13]. В диффузоре, установленном на входе в кассету, имеет место течение типа затопленной струи в ограниченном объеме. Приведена зависимость распределения скорости потока на входе в кассету по её радиусу от гидравлического сопротивления диффузора.

Вопросы определения коэффициентов МГС элементов напорных камер и отношений распределений массовых расходов на выходе из них рассмотрены в работах [9], [11] — [13].

Результаты исследования коэффициентов гидравлического сопротивления при выходе из прямой трубы через шайбу или плоскую решетку представлены в работе [10], результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления модели корпусного реактора — в работе [2].

Результаты экспериментального исследования профиля скорости жидкости на выходе из различных типов одиночных плоских (тонкостенных) решеток при нерегулярной неравномерности падающего на них потока рассмотрены в работах [9], [19].

Взаимодействие двух плоских параллельно истекающих струй рассмотрено в работе [26]. В ней отмечено, что задача о взаимодействии двух одинаковых плоских струй (до точки застоя) эквивалентна задаче о присоединении одиночной струи к близлежащей стенке.

Аналитическое описание распространения системы плоских параллельных струй, вытекающих из плоских сопел, расположенных в один ряд параллельно друг другу длинными гранями, представлено в работе [22].

В работе [1] представлено аналитическое описание течения жидкости в канале за плохообтекаемым телом, в частности, на различных участках плоско-параллельной циркуляционной зоны.

Результаты изучения параллельно истекающих плоских струй с симметричными условиями на входе даны в работе [23], [25], [27], [28].

В работе [3] предложена модель для расчета взаимодействия двух плоских турбулентных параллельно истекающих струй при несимметричных условиях на входе (неодинаковые струи).

Схемы течения теплоносителя в раздающих коллекторных системах теплообменников и реакторов ЯЭУ рассмотрены в работах [6], [8].

Гидродинамика плоского раздающего коллектора рассмотрена в работе [16], а гидродинамика однорядных коллекторных систем – в работе [4].

Гидродинамика коллекторных теплообменных аппаратов рассмотрена в работе [5], гидравлика кругового раздаточного коллектора – в работе [18], гидродинамика коллекторных систем – в работе [14].

Результаты численного и экспериментального исследования гидродинамики плоского Z-образного коллектора представлены в работе [24].

Анализ результатов экспериментальных и аналитических исследований показал, что имеющаяся информация других авторов не может быть с достаточной точностью использована при оценке коэффициентов МГС в смежных отводящих каналах, сообщенных с напорной камерой, при наличии различий параметров набегающего на них потока.

Авторы допустили существование ранее неизученного специалистами гидродинамического эффекта, характеризующегося изменением отношения гидравлического сопротивления в смежных отводящих каналах при изменении отношения чисел Рейнольдса в них (наличием различий параметров набегающего на них потока) при определенном соотношении размеров напорной камеры, турбулентном течении жидкости в отводящих каналах и идентичном массовом расходе жидкости через напорную камеру.

2 Стендовое и контрольно-измерительное оборудование, экспериментальный участок

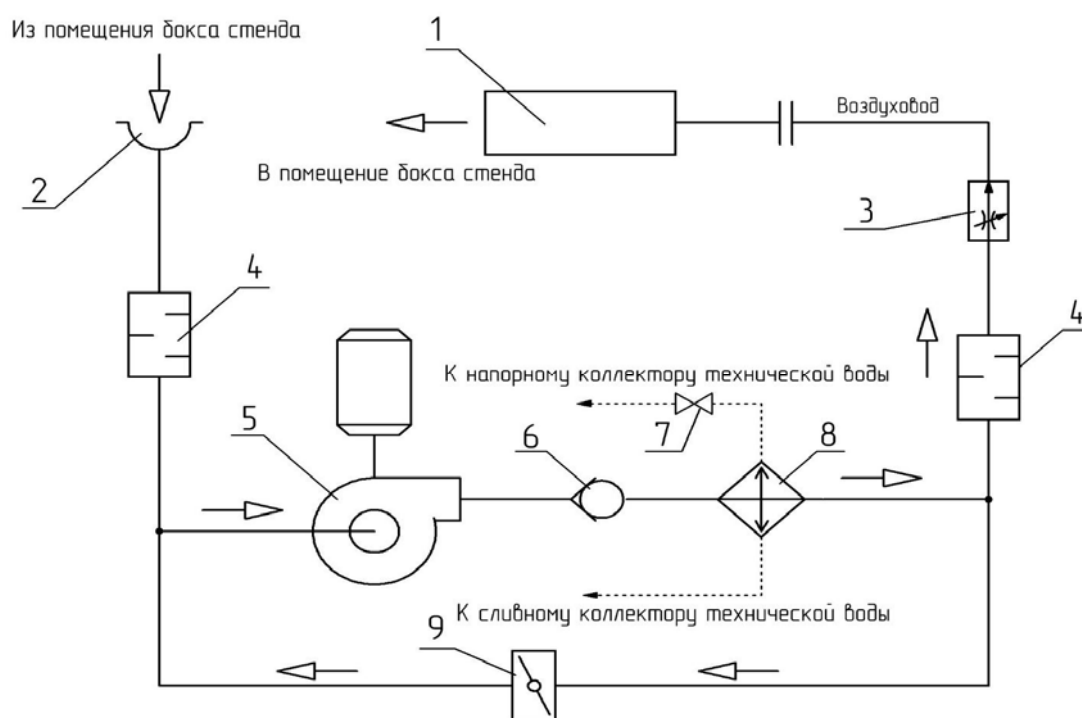
Стенд гидродинамических исследований

Экспериментальные исследования гидродинамики проточной части симметричной плоской напорной камеры с двумя подводящими и двумя отводящими цилиндрическими каналами выполнены на стенде аэродинамических исследований (СГДИ).

СГДИ предназначен для исследования гидродинамических характеристик проточных частей моделей ядерных реакторов, теплообменного оборудования и другого оборудования ЯЭУ. На стенде моделирование поведения теплоносителя осуществляется с помощью потока воздуха.

Принципиальная технологическая схема СГДИ с подключенным к нему экспериментальным участком представлена на рисунке 1.

В состав СГДИ входят следующие основные системы и оборудование: воздушная система, система электроснабжения, управления, контроля и сигнализации; система водяного охлаждения; контрольно-измерительные приборы.



1 – экспериментальный участок; 2 – заборник воздуха; 3 – регулятор расхода воздуха; 4 – шумоглушители; 5 – компрессор ВФ-37/1.5-СМ4УЗ; 6 – обратный клапан; 7 – вентиль технической воды; 8 – воздухоохладитель ВО-4Х13-1350-4; 9 – дисковый поворотный затвор

Рис. 1. Принципиальная схема СГДИ с подключенным к нему экспериментальным участком

Основой воздушной системы стенда является разомкнутый циркуляционный контур (система воздуховодов различного диаметра), к напорному или вытяжному воздуховоду которого подсоединяется исследуемое изделие. Забор воздуха производится непосредственно из стендового зала через воздуховод Ду 800 мм.

Циркуляционный контур включает оборудование, обеспечивающее, в соответствии с программой и методикой испытаний, давление, расход и температуру воздуха.

В состав воздушной системы стенда входит следующее оборудование:

Компрессор типа ВФ-37/1.5 СМ 4У3 предназначен для создания в циркуляционном контуре, с подсоединенным к нему исследуемым изделием расхода воздуха до 37 м³/мин и давлением до 50 кПа. Компрессор оснащен электродвигателем типа АМУ225 М4У2.

Частотно-регулируемый привод типа АП-140-А-45К предназначен для плавной регулировки числа оборотов двигателей вентилятора и компрессора.

Воздуховод имеет диаметр Ду300 мм.

Воздухоохладитель типа ВО-4ХЗ-1350-4 обеспечивает охлаждение нагретого в нем воздуха.

Шумоглушители установлены на напорном и вытяжном воздуховоде циркуляционного контура и обеспечивают снижение уровня шума во время работы стенда СГДИ.

Регулятор расхода диаметром Ду 300 мм предназначен для плавной регулировки расхода воздуха в циркуляционном контуре. Регулировка расхода воздуха осуществляется путем перемещения конуса регулятора относительно его проходного отверстия. Регулятор применяется для регулирования расхода воздуха небольшой величины.

Дисковый поворотный затвор типа FLN имеет диаметр Ду 300 мм.

Расходомеры предназначены для измерения величины расхода воздуха, подаваемого в экспериментальный участок.

Сетчатые фильтры служат для очистки воздуха в циркуляционном контуре от механических примесей.

Конструкция циркуляционного контура позволяет осуществлять работу воздушной системы в различных режимах.

Оборудование системы водяного охлаждения стенда СГДИ служит для поддержания требуемой величины температуры воздушного потока в циркуляционном контуре воздушной системы стенда, а также для обеспечения отвода тепла от подшипников воздушнонагнетателя и его электродвигателя, корпуса которых оборудованы для этой цели рубашками охлаждения.

Система водяного охлаждения стенда представляет собой коллектор, состоящий из напорной и сливной магистралей, оснащенных запорно-регулирующей арматурой (вентильями), а также линиями подачи и слива воды из теплообменных устройств охлаждаемого оборудования.

Охлаждаемыми элементами оборудования СГДИ являются воздухоохладители ВО-4Х13-1350-04, корпуса подшипников вала воздуходвигателя и его электродвигателя.

В качестве контрольно-измерительных приборов на СГДИ применяются приборы различных типов, видов и назначения, как прямо показывающие, установленные непосредственно в местах контроля параметров, так и электрические дистанционные, представляющие собой комплекты физических датчиков и регистрирующих их сигналы вторичных приборов.

Часть контрольно-измерительных приборов имеют электрическую связь и работают совместно с аппаратурой, обеспечивающей контроль рабочих параметров и сигнализацию о состоянии оборудования стенда.

Создание условий проведения экспериментальных исследований на СГДИ осуществляется с помощью воздушной системы, работу оборудования которой обеспечивают системы электроснабжения, управления, контроля и сигнализации, водяного охлаждения и контрольно-измерительные приборы стенда.

Для измерения гидродинамических параметров на СГДИ используются следующие приборы: расходомеры-счетчики струйные «Ирга-РС»; датчики давления Метран-150; термопреобразователи сопротивления; расходомерные каналы.

Расходомер-счетчик струйный «Ирга-РС»

Расходомер-счетчик струйный «Ирга-РС» (далее — «Ирга-РС») предназначен для измерения расхода плавно меняющихся, стационарных, непрерывных потоков газов методом переменного перепада давления с помощью стандартных сужающих устройств, входящих в состав первичного преобразователя расхода.

Расходомер в комплекте с вычислителем «Ирга-2» предназначен как для автономного применения, так и для применения в составе счетчиков, узлов учета и измерительных комплексов.

Расходомер осуществляет преобразование объемного расхода газа, пара или жидкости в частотный или токовый сигнал или цифровой код в зависимости от исполнения. При комплектации датчиком давления и термометром сопротивления расходомер преобразует сигналы первичных преобразователей в цифровой код для последующей их передачи по цифровым каналам к вычислителю или в различные системы автоматизированного управления технологическими процессами и диспетчеризации.

Конструктивно расходомер состоит из трех составных частей:

- первичного гидродинамического преобразователя расхода «Ирга-РСП» (далее — «Ирга-РСП»);
- электронного блока «ВР-100В» (далее — «ВР-100В»);
- блока питания «Ирга-БП» со встроенным барьером искрозащиты (далее — «Ирга-БП»).

«Ирга-РСП» состоит из струйного гидродинамического автогенератора (САГ) и сужающего устройства (СУ). САГ представляет собой струйный элемент, в котором находятся детекторы вихрей, входящие в состав «ВР-100В». САГ выполнен в монолитном стальном блоке.

Для расходомеров с внутренним диаметром измерительного трубопровода (далее ИТ) до 50 мм включительно САГ и СУ конструктивно выполнены в виде единого блока.

Для обработки сигналов от датчика давления и термометра сопротивления в составе расходомера устанавливаются блоки согласования с датчиками (БСД).

БСД устанавливается в «ВР-100В» и предназначен для преобразования сигнала от термометра сопротивления, датчика давления и «Ирга-РСП» в цифровой код и передачи цифрового кода через блок питания со встроенным барьером искрозащиты «Ирга-БП» на вход вычислителя «Ирга-2» или другого вычислителя (корректора) расхода газа (пара) с аналогичными характеристиками.

В основу работы расходомера положен принцип измерения расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления.

При прохождении измеряемой среды через СУ на нем создается перепад давления Δp . Объемный расход измеряемой среды, проходящий через СУ, пропорционален корню квадратному из произведения плотности среды на перепад давления на СУ.

Принцип действия САГ основан на использовании эффекта колебания струи измеряемой среды при протекании ее через САГ, который представляет собой бистабильный струйный элемент, охваченный обратными связями, обеспечивающими режим автоколебаний. Частота колебаний пневматических или гидравлических импульсов САГ пропорциональна корню квадратному от приложенного перепада давления, а значит и объемному расходу, проходящему через СУ.

Пульсации давления воспринимаются детекторами вихрей, входящими в состав «ВР-100В» и установленными в каналах обратной связи САГ, которые преобразуют пульсации в электрический сигнал. Электрический сигнал от детекторов вихрей с помощью «ВР-100В» преобразуется в унифицированный частотный, токовый или цифровой сигнал, который несет информацию о величине объемного расхода.

Расходомер передает на внешние устройства следующую информацию: мгновенный объемный расход измеряемой среды в рабочих условиях; температура измеряемой среды; давление измеряемой среды; нештатные ситуации по измерению расхода, температуры и давления.

Структурная схема подключения расходомера «Ирга-РС» приведена на рисунке 2.

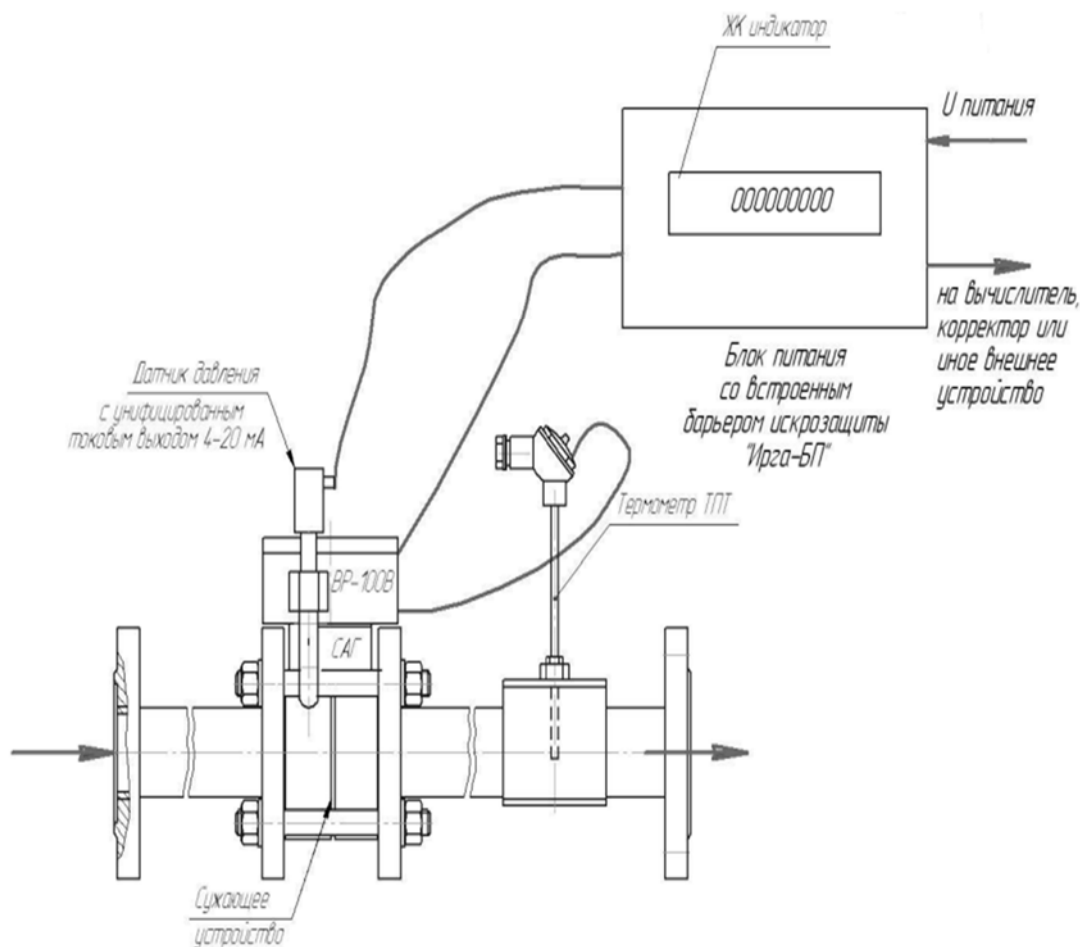


Рис. 2. Структурная схема подключения расходомера «Ирга-РС»

Метрологические характеристики нормируются для диапазона измерения расходов от 3% до 100 % относительно верхнего предела измерения.

Погрешности САГ и СУ приводятся в паспорте на средство измерения.

Погрешность расходомера в рабочем диапазоне температур окружающего воздуха и измеряемой среды не изменяется.

Датчики давления Метран-150

Датчики давления Метран-150 предназначены для измерения давления избыточного, абсолютного, разности давлений, гидростатического давления в зависимости от исполнения. Датчики обеспечивают непрерывное преобразование давления в аналоговый выходной сигнал постоянного тока и/или в цифровой выходной сигнал в стандарте протокола HART.

Датчики предназначены для измерения давления рабочих сред: жидкости, пара, газа.

Датчики с HART-протоколом могут передать информацию об измеряемой величине в цифровом виде по двухпроводной линии связи вместе с сигналом постоянного тока. Этот цифровой сигнал может приниматься и обра-

батываться любым устройством, поддерживающим протокол HART. Цифровой выход используется для связи датчика с персональным компьютером через стандартный последовательный порт и дополнительный HART-модем, при этом может выполняться чтение измеряемого давления, настройка датчика, выбор его основных параметров, перестройка диапазонов измерений, корректировка «нуля» и ряд других операций.

Таким образом, по двухпроводной связи передается два типа сигналов — аналоговый сигнал и цифровой сигнал на базе протокола HART, который накладывается на аналоговый выходной сигнал датчика, не оказывая на него влияния.

Датчики Метран-150 являются многопределными и могут настраиваться на верхний предел измерений или диапазон измерений.

В зависимости от измеряемого давления датчики имеют следующие коды исполнения: А — абсолютное давление; G — избыточное давление; D — разность давлений.

Датчик состоит из сенсора и электронного преобразователя.

Сенсор состоит из измерительного блока и платы аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Давление подается в камеру измерительного блока, преобразуется в деформацию чувствительного элемента и изменение электрического сигнала.

Электронный преобразователь преобразует электрический сигнал в соответствующий выходной сигнал.

Измерительный блок датчиков моделей 150CD, 150CG состоит из корпуса и емкостной измерительной ячейки. Емкостная ячейка изолирована механически, электрически и термически от технологической измеряемой среды и окружающей среды.

Измеряемое давление передается через разделительные мембраны и разделительную жидкость к измерительной мембране, расположенной в центре емкостной ячейки.

Воздействие давления вызывает изменение положения измерительной мембраны. Изменение положения мембраны приводит к появлению разности емкостей между измерительной мембраной и пластинами конденсатора, расположенным по обеим сторонам от измерительной мембраны.

Разность емкостей измеряется АЦП, преобразуется электронным преобразователем в соответствующий выходной сигнал.

В измерительных блоках моделей 150TG, 150ТА используется тензорезистивный тензомодуль на кремниевой подложке. Чувствительным элементом тензомодуля является пластина из кремния с пленочными тензорезисторами.

Давление через разделительную мембрану и разделительную жидкость передается на чувствительный элемент тензомодуля. Воздействие давления преобразуется в деформацию чувствительного элемента, вызывая при этом

изменение электрического сопротивления его тензорезисторов и разбаланс мостовой схемы. Электрический сигнал, образующийся при разбалансе мостовой схемы, измеряется АЦП и подается в электронный преобразователь.

Электронный преобразователь преобразует это изменение в соответствующий выходной сигнал.

В модели 150ТА полость над чувствительным элементом вакуумирована и герметизирована.

Функционально канал преобразования сигнала измерительного блока состоит из АЦП, блока памяти АЦП, микроконтроллера с блоком памяти, цифро-аналогового преобразователя, стабилизатора напряжения, фильтра радиопомех, блока защиты от переходных процессов, блока регулировки и установки параметров, HART-модема для датчиков с кодом выходного сигнала.

Для контроля, настройки параметров, выбора режимов работы и калибровки датчиков при помощи кнопочных переключателей блока управления и регулирования параметров используется индикаторное устройство.

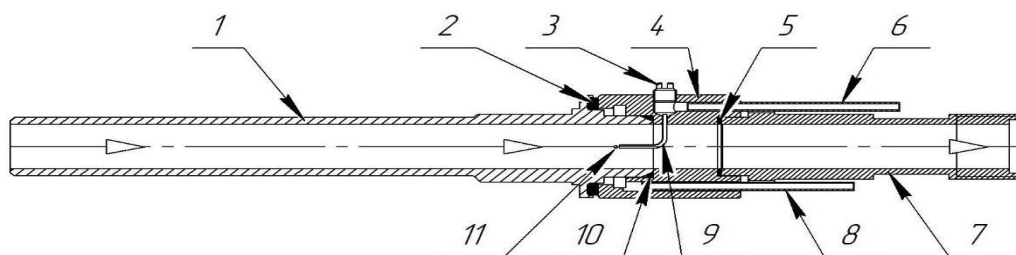
На дисплее индикатора датчика или HART-коммуникатора в режиме измерения давления отображается величина измеряемого давления в цифровом виде в установленных при настройке единицах измерения или в процентах от диапазона изменения выходного сигнала.

Расходомерные каналы

Расходомерные каналы осуществляют отбор статического давления и полного напора воздуха в каналах экспериментального участка для последующего определения массового расхода. Канал состоит из последовательно расположенных входной трубки, измерительной втулки и выходной трубки.

Конструкция расходомерного канала представлена на рисунке 3.

На входе в расходомерный канал расположена входная трубка (1) диаметром 20×1,5 мм длиной 170 мм с буртиком на конце и отверстием (11) диаметром 0,3 мм в стенке, через которое осуществляется отбор статического давления. Входная трубка также предназначена для гидродинамической стабилизации потока воздуха на входе расходомерного канала. Измерительная втулка (4) представляет собой втулку с внешним диаметром 35 мм, внутренним диаметром 15 мм и длиной 37,5 мм. Во внутренней стенке втулки со стороны входа потока сделана проточка, повторяющая форму ответной части входной трубки с кольцевой канавкой, сообщающейся с отбором статического давления из входной трубки. В середине внешней стенки втулки, перпендикулярно продольной оси, на половину толщины стенки просверлено резьбовое отверстие М6×0,5, в котором соосно просверлено сквозное отверстие диаметром 2 мм. В это отверстие установлена трубка Пито (9), представляющая из себя капилляр диаметром 2,0×0,2 мм, имеющий изгиб 90°. Свободный конец трубки Пито расположен в плоскости поперечного сечения отверстия для отбора статического давления входной трубки и установлен соосно навстречу потоку. В стенке втулки со стороны



1 – входная трубка; 2, 5, 10 – уплотняющие прокладки; 3 – винт М6×0,5; 4 – измерительная втулка; 6, 8 – капилляры для подключения импульсных линий; 7 – выходная трубка; 9 – трубка Пито; 11 – отбор статического давления

Рис. 3. Конструкция расходомерного канала

выхода потока на противоположных сторонах просверлены два отверстия диаметром 3 мм, параллельных оси втулки, сообщающихся с отборами статического давления и трубки Пито, в которые вставлены капилляры (6), (8), имеющие размеры 3,0×0,5 мм, для подключения импульсных линий. Во внутренней стенке втулки со стороны выхода потока сделана проточка, повторяющая форму ответной части выходной трубки.

Выходная трубка (7) имеет диаметр 22×3,5 мм с буртиком со стороны входа потока и резьбой М22×1,5 мм со стороны выхода потока. В выходной части трубки предусмотрена возможность установки диафрагмы, которая зажимается накидной гайкой.

Все элементы расходомерного канала (кроме прокладок) выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Сборка расходомерного канала осуществляется при помощи двух прижимных пластин, которые стягиваются между собой шпильками М5×0,8 и зажимают между собой буртик входной трубки, измерительную втулку и буртик выходной трубки.

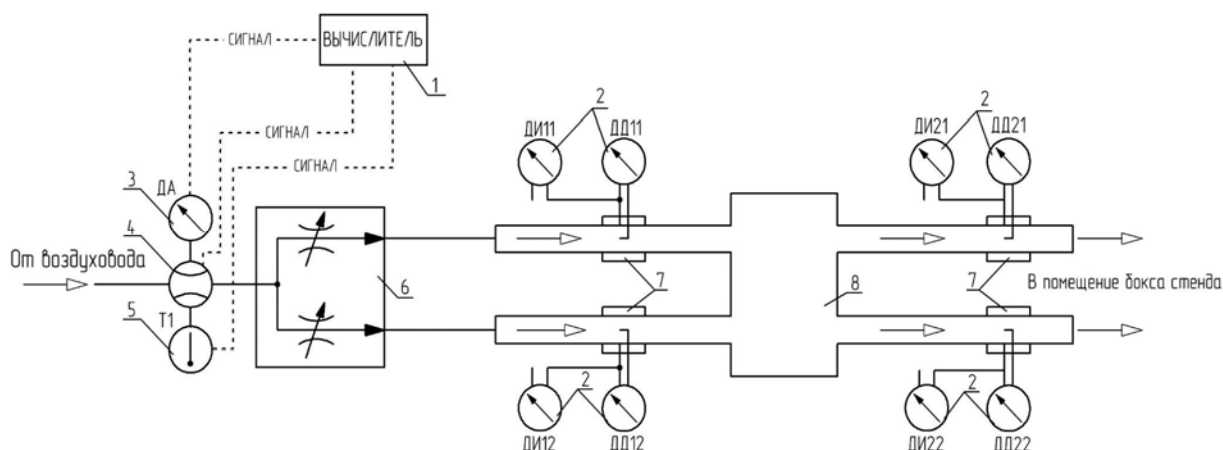
Герметизация расходомерного канала происходит за счет уплотняющих прокладок (2), (5), (10) и герметика, нанесенного на местах установки винта (3), капилляров для подключения импульсных линий и трубки Пито.

Экспериментальный участок

Экспериментальный участок представляет собой симметричную напорную камеру плоского типа с цилиндрическими подводящими и отводящими каналами, делителем потока и измерительной аппаратурой.

Принципиальная схема экспериментального участка представлена на рисунке 4.

Поток воздуха из воздуховода проходит через расходомер «Ирга-РС» (4), где измеряется его температура, абсолютное давление и объемный расход. Сигнал с расходомера «Ирга-РС» поступает на вычислитель «Ирга-2» (1), где происходит расчет массового расхода, после чего данные передаются в систему сбора данных.



1 – вычислитель «Ирга-2»; 2 – датчик разности давления Метран-150 модели 150CD; 3 – датчик абсолютного давления Метран-150 модели 150ТА; 4 – расходомер-счетчик струйный «Ирга-РС»; 5 – термопреобразователь сопротивления TSP-100; 6 – делитель потока; 7 – расходомерный канал; 8 – напорная камера

Рис. 4. Принципиальная схема экспериментальной установки

После прохождения расходомера-счетчика поток разделяется в делителе потока (5).

Делитель потока (5) представляет собой Y-образный раздающий коллектор с регулировкой потока, изготовленный при помощи технологии Fused Filament Fabrication (FFF) 3D-печати из полиэтилентерефталатгликоля. Регулировка расхода осуществляется двумя регулируемыми конусами путём плавного изменения площади проходного сечения каждого из каналов.

Из делителя потока (6) воздух попадает во входные трубки расходомерных каналов и проходит через них. Далее расходомерные каналы (7) будут обозначаться через номера, где первая цифра обозначает принадлежность ко входу (1) или выходу (2) из напорной камеры, а вторая цифра обозначает номер расходомерного канала, например, РК №12 – второй расположенный на входе в напорную камеру канал.

При градуировке используют понятие расходомерные каналы.

При проведении экспериментов те же расходомерные каналы, установленные на входе в напорную камеру, называются подводящими каналами, а те же расходомерные каналы, установленные на выходе из напорной камеры, называются отводящими каналами.

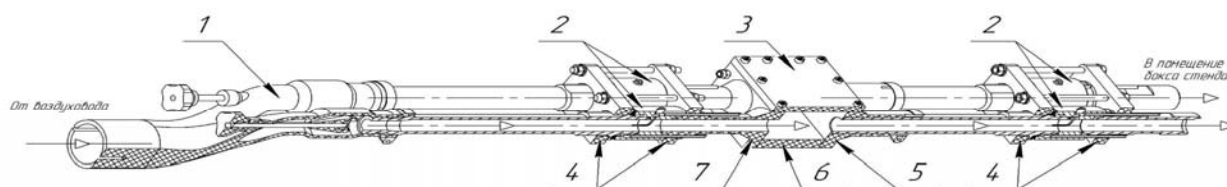
В расходомерных, подводящих и отводящих каналах происходит отбор статического давления и полного напора, после чего по импульсным линиям давление передается на датчики разности давления Метран-150 модели 150CD (2), сигнал с которых поступает на систему сбора данных.

Из подводящих каналов потоки жидкости последовательно попадают в рабочий объем напорной камеры (8), соединяются и перераспределенные потоки выходят через отводящие каналы № 21 и № 22.

Общий вид экспериментальной установки с продольным разрезом вдоль оси подводящих и отводящих каналов представлен на рисунке 5.

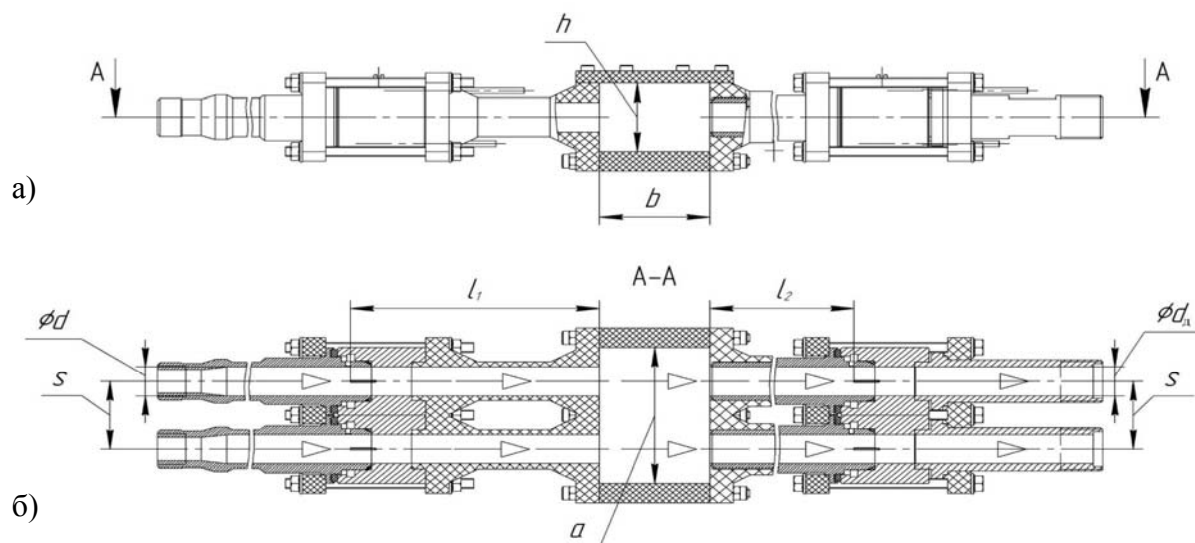
Напорная камера состоит из корпуса (6), входной (7) и выходной (5) стенок, смотровой крышки (3) и уплотнительной прокладки. Корпус, входная (7) и выходная (5) стенки изготовлены при помощи технологии FFF 3D-печати из полиэтилентерефталатгликоля, уплотнительная прокладка изготовлена из термопластичного полиуретана, а смотровая крышка из полиметилметакрилата (оргстекло).

Рабочая полость напорной камеры имеет вид прямоугольного параллелепипеда, его размеры согласно обозначениям, принятым на рисунке 6: $a = 70$ мм, $b = 47$ мм, $h = 35$ мм. Входные и выходные отверстия расположены в одной горизонтальной плоскости, проходящей через центры входной (7) и выходной (5) стенок и имеют межосевое расстояние $s = 35$ мм. Выбор данных размеров обусловлен геометрическими параметрами струи, истекающей из напорной камеры. При этом угол одностороннего расширения свободной круглой изотермической струи $\psi \approx 12^\circ$.



1 – делитель потока; 2 – РТ; 3 – смотровая крышка; 4 – прижимные пластины; 5 – выходная стенка; 6 – корпус коллектора; 7 – входная стенка

Рис. 5. Общий вид экспериментального участка с продольным разрезом вдоль оси канала



а) вид спереди с местным разрезом; б) вид сверху с осевым продольным разрезом

Рис. 6. Основные геометрические параметры экспериментального участка (без делителя потока)

Данная конфигурация геометрии рабочего объема напорной камеры интересна тем, что струи с одинаковыми массовыми расходами воздуха, истекающие из отводящих каналов, после расширения пересекаются только в критической точке, расположенной между центрами отводящих каналов в плоскости выходной стенки (5) напорной камеры.

Корпус напорной камеры стянут пятью шпильками М5×80 между входной (7) и выходной (5) стенками с предварительной герметизацией при помощи герметика. Смотровая крышка (3) закреплена через уплотнительную прокладку к корпусу напорной камеры двенадцатью винтами. Входные и выходные трубки расходомерных каналов зафиксированы в цанговых зажимах входных (7) и выходных (5) стенок, загерметизированы и стянуты хомутами.

Экспериментальный участок устанавливается в горизонтальном положении соосно напорному воздуховоду. Подключение экспериментального участка к расходомеру осуществляется через переходную втулку, в которую со стороны входа в ЭУ вставляется выходная трубка расходомера «Ирга-РС», а с другой стороны втулка вставляется во входное отверстие делителя потока.

В переходной втулке со стороны расходомера «Ирга-РС» в торце имеется прорезь, предназначенная для надёжной фиксации хомутом. Перед установкой переходной втулки на внешнюю поверхность выходной трубки расходомера наносится герметик для герметизации соединения, после чего соединение стягивается хомутом. Делитель потока также имеет прорезь на торце со стороны входа потока. Перед установкой делителя потока на внешнюю поверхность переходной втулки, в области контакта, наносится герметик, после чего на нее надевается делитель потока и соединение фиксируется хомутом.

3. Методика проведения экспериментального исследования гидродинамики напорной камеры

Градуировка расходомерных каналов

Для проведения измерений массового расхода воздушного потока через экспериментальный участок предварительно проводят градуировку расходомерного канала. При градуировке определяют зависимость массового расхода воздуха G_{ij} от динамического напора в расходомерном канале Δp_{ij} и плотности воздуха ρ_{ij} в нем.

Конструкция экспериментального участка позволяет производить градуировку каждого расходомерного канала по отдельности, не внося существенных изменений в его конструкцию.

Схема организации потока воздуха в экспериментальном участке при проведении градуировки расходомерного канала представлена на рисунке 7.

Перед градуировкой расходомерного канала на делителе потока полностью открывается один из каналов, при этом оставшийся канал перекрывается, вследствие чего весь воздушный поток входит в рабочий объем

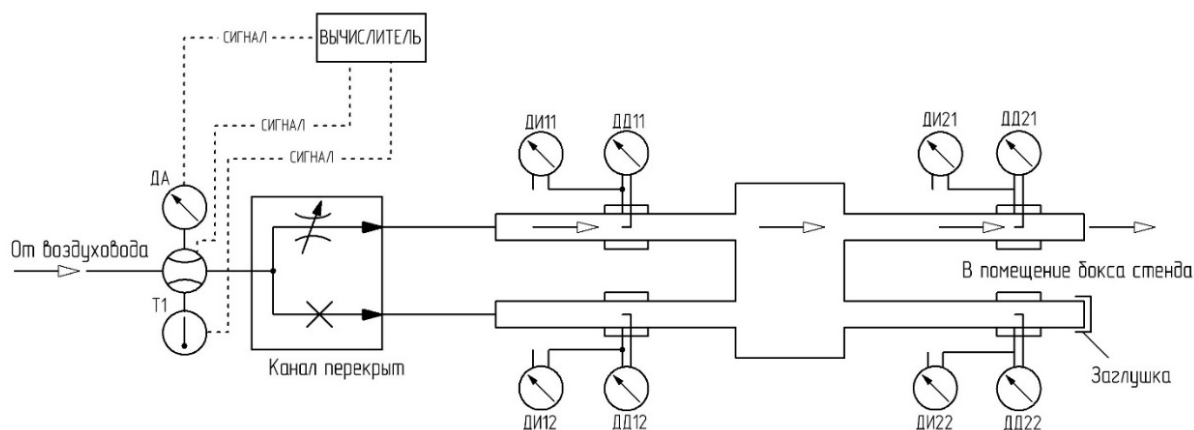


Рис. 7. Схема организации потока воздуха в экспериментальном участке при проведении градуировки расходомерного канала

коллектора только через один РК. На выходе из перекрытого канала, на место установки диафрагмы, устанавливается заглушка, которая препятствует разделению потока в коллекторе. Таким образом, весь поток воздуха проходит через один из каналов. При выключенном компрессоре, перед началом градуировки каждого расходомерного канала, по датчику абсолютного давления Метран-150 модели 150ТА измеряется атмосферное давление $P_{\text{атм}}$ и вносится в систему сбора данных.

После проведения мероприятий по подготовке экспериментального участка к градуировке производится пуск компрессора и выход на режим с максимальным объемным расходом воздуха через канал с градуируемыми расходомерными каналами. Перед проведением измерений необходимо дождаться стабилизации температурного режима потока.

При прохождении потока через расходомер-счетчик струйный «Ирга-РС» со встроенным термопреобразователем сопротивления TSP-100 и датчиком абсолютного давления, сигнал с данными об объемном расходе $Q_{\text{расх}}$, температуре $T_{\text{расх}}$ и полном статическом давлении в расходомере $P_{\text{расх}}$ поступает на вычислитель, где преобразуется в массовый расход $G_{\text{расх}}$, после чего все полученные данные поступают в систему сбора данных. Поскольку оставшийся канал перекрыт, массовый расход, рассчитываемый на вычислителе, является полным массовым расходом через градуируемые расходомерные каналы.

С отборов расходомерного канала давление по импульсным линиям передается на датчики разности давления, которые измеряют перепад между полным и статическим давлениями в потоке (динамический напор) Δp_{ij} , а также статическим и атмосферным давлениями (избыточное статическое давление) p_{ij} , после чего передают значения в систему сбора данных.

Зависимость массового расхода воздуха от динамического напора и плотности воздуха в поперечном сечении расходомерного канала № ij , где производится отбор давлений, имеет следующий вид:

$$G_{ij} = \sqrt{\rho_{ij} \cdot (k_{ij} \cdot \Delta p_{ij} + b_{ij})}, \quad (1)$$

где k_{ij} — коэффициент наклона градуировочной характеристики расходомерного канала № ij , м^4 ; b_{ij} — смещение «нуля» градуировочной характеристики расходомерного канала № ij , $(\text{кг м}^3)/\text{с}^2$.

Для удобства построения градуировочной характеристики расходомерного канала вводится дополнительная переменная A_{ij} , которая равна

$$A_{ij} = \frac{G_{ij}^2}{\rho_{ij}}. \quad (2)$$

При подстановке этой переменной в уравнение (1) зависимость принимает вид линейной характеристики:

$$A_{ij} = k_{ij} \cdot \Delta p_{ij} + b_{ij}. \quad (3)$$

Поскольку массовый расход вычисляется в вычислителе на основании данных расходомера «Ирга-РСП», то для определения градуировочных коэффициентов необходимо определить плотность воздуха в расходомерном канале. Плотность воздуха в расходомерном канале № ij рассчитывают по формуле

$$\rho_{ij} = \frac{P_{ij}}{R' \cdot T_{\text{расх}}}, \quad (4)$$

где $R' = 287,1 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ — газовая постоянная воздуха; P_{ij} — полное статическое давление в расходомерном канале, Па.

Полное статическое давление определяется как сумма атмосферного и избыточного статического давления расходомерного канала № ij :

$$P_{ij} = P_{\text{атм}} + p_{ij}. \quad (5)$$

Для определения градуировочных коэффициентов используется метод наименьших квадратов (МНК):

$$k_{ij} = \frac{\langle \Delta p_{ij} \cdot A_{ij} \rangle - \langle \Delta p_{ij} \rangle \cdot \langle A_{ij} \rangle}{\langle \Delta p_{ij}^2 \rangle - \langle \Delta p_{ij} \rangle^2}, \quad (6)$$

$$b_{ij} = \langle A_{ij} \rangle - k_{ij} \cdot \langle \Delta p_{ij} \rangle. \quad (7)$$

Выражение в угловых скобках означает среднее арифметическое от набора значений экспериментальных данных $\{x_i\}$ и определяется как

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (8)$$

При градуировке расходомерного канала получают зависимость коэффициента МГС участка на выходе из расходомерного канала от логарифма числа Рейнольдса в нем.

Коэффициент МГС на выходе из расходомерного канала определяется по формуле

$$\zeta_{ij} = 1 + \frac{2 \cdot R' \cdot T_{\text{расх}}}{\bar{w}_{ij}^2} \cdot \ln \left(1 + \frac{p_{ij}}{P_{\text{атм}}} \right), \quad (9)$$

где ζ_{ij} — коэффициент МГС; $\bar{w}_{ij}$ — средняя скорость потока на выходном участке расходомерного канала, м/с.

Средняя скорость потока определяется по формуле

$$\bar{w}_{ij} = \frac{G_{\text{расх}}}{\bar{\rho}_{ij} \cdot f_{\text{рк}}}, \quad (10)$$

где $\bar{\rho}_{ij}$ — средняя плотность воздуха на выходном участке расходомерного канала, кг/м³; $f_{\text{рк}}$ — площадь проходного сечения расходомерного канала, м².

Средняя плотность воздуха рассчитывается как среднеарифметическое между плотностью воздуха в сечении расходомерного канала № ij , где проводится измерение, и плотностью воздуха при атмосферном давлении ($\rho_{\text{атм}}$) по формуле:

$$\bar{\rho}_{ij} = \frac{\rho_{ij} + \rho_{\text{атм}}}{2}. \quad (11)$$

Плотность воздуха при атмосферном давлении вычисляется по формуле (4).

Число Рейнольдса вычисляется по формуле

$$\text{Re}_{ij} = \frac{\bar{w}_{ij} \cdot d_{\text{рк}}}{\nu_{ij}}, \quad (12)$$

где $\bar{w}_{ij}$ — средняя скорость потока в расходомерном канале № ij , м/с; $d_{\text{рк}}$ — диаметр проходного сечения расходомерного канала № ij , м; ν_{ij} — коэффициент кинематической вязкости воздуха в расходомерном канале № ij , м²/с.

Средняя скорость потока в сечении расходомерного канала № ij определяется по формуле, аналогичной формуле (10).

Коэффициент кинематической вязкости воздуха рассчитывается по формуле

$$\nu_{ij} = \frac{1,717 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{\text{расх}} / 273,15)^{0,683}}{\rho_{ij}}. \quad (13)$$

По полученным в результате градуировки данным находят зависимости переменной A_{ij} от динамического напора в расходомерном канале № ij , а

также зависимости коэффициента МГС от десятичного логарифма числа Рейнольдса.

Эксперименты на экспериментальном участке

Для определения влияния параметров набегающего на отводящие каналы потока необходимо получить зависимости отношения массовых расходов воздуха через отводящие каналы от отношения массовых расходов через подводящие каналы при постоянном суммарном массовом расходе через рабочий объем напорной камеры и наличии на отводящих каналах № 21 и № 22 двух одинаковых диафрагм.

Перед проведением эксперимента на выходные трубки отводящих каналов устанавливаются и зажимаются накидными гайками или снимаются две вставки. После чего на делителе потока перекрывается канал, ведущий в расходомерный канал № 12. Далее, как и во время градуировки расходомерного канала, с датчика абсолютного давления, установленного на расходомере, снимаются показания атмосферного давления и вносятся в систему сбора данных.

При этом важно поддерживать стабильный массовый расход воздуха через рабочий объем напорной камеры. В рамках данной работы был выбран режим, при котором через напорную камеру подаётся максимально возможный для данной конструкции массовый расход воздуха. Для определения этого расхода перед проведением основного эксперимента проводится предварительный запуск компрессора с выходом на стационарный режим потока, и по показаниям расходомера определяется полный расход через систему с перекрытым каналом.

Данные с расходомера и датчиков давления, полученные путём регулирования отношения потоков в подводящих каналах при помощи делителя потока, записываются в систему сбора данных.

Для получения массовых расходов воздуха, проходящих через каждый расходомерный канал, используется формула (1).

Относительные массовые расходы воздуха в подводящих и отводящих каналах определены по формулам

$$q_1 = G_{12}/G_{11}, \quad (14)$$

где q_1 — относительный массовый расход воздуха в подводящих каналах; G_{12} — массовый расход воздуха в подводящем канале № 12; G_{11} — массовый расход воздуха в подводящем канале № 11

$$q_2 = G_{22}/G_{21}, \quad (15)$$

где q_2 — относительный массовый расход воздуха в отводящих каналах; G_{22} — массовый расход воздуха в отводящем канале № 22; G_{21} — массовый расход воздуха в отводящем канале № 21.

Коэффициенты МГС, средняя скорость потока и число Рейнольдса в подводящих и отводящих каналах вычисляются соответственно по формулам, аналогичным формулам (9), (10) и (12).

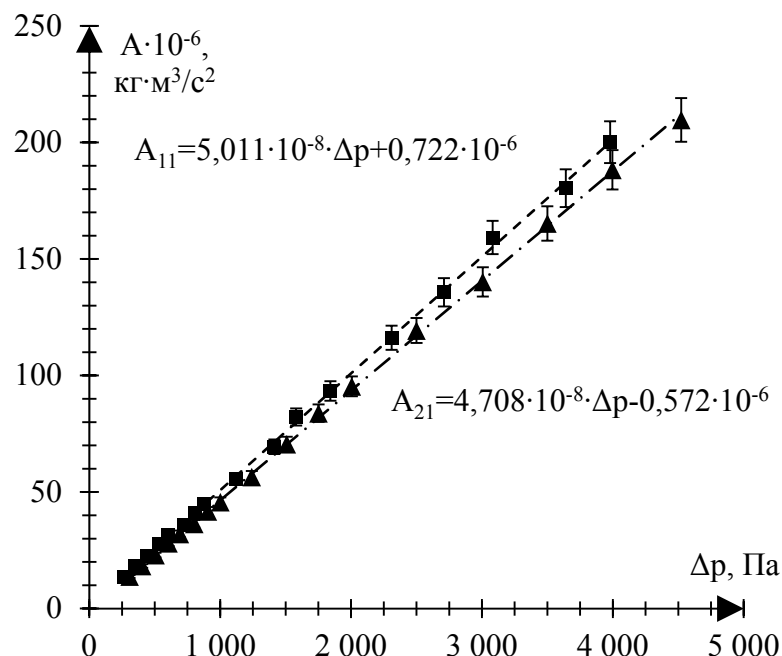
Данная методика проведения эксперимента позволяет получить зависимости отношений массовых расходов в отводящих каналах от отношений массовых расходов в подводящих каналах, а также зависимости коэффициентов МГС отводящих каналов от десятичного логарифма числа Рейнольдса в отводящих каналах со вставками и без них при постоянном значении полного массового расхода через напорную камеру.

3 Результаты экспериментальных и аналитических исследований гидродинамики напорной камеры

Результаты градуировки расходомерных каналов

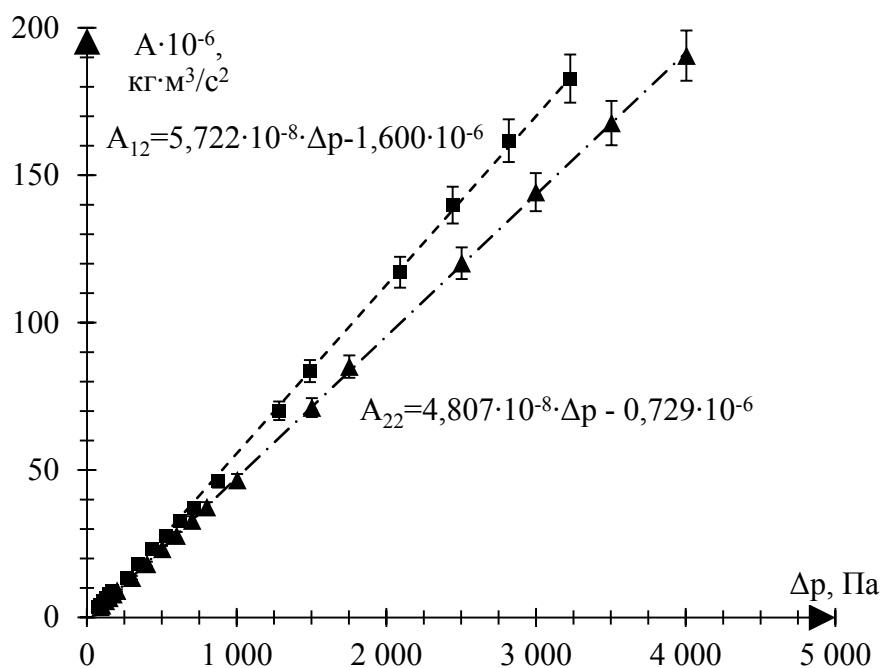
Градуировочные характеристики расходомерных каналов № 11, № 12, № 21, № 22 при наличии и отсутствии вставок представлены на рисунках 8 — 11. На указанных рисунках приведены погрешности определения полученных данных.

При установке вставок градуировочные коэффициенты, связанные с углом наклона градуировочной характеристики, увеличиваются. Из этого можно сделать вывод, что коэффициенты МГС зависят от коэффициентов МГС на выходе из расходомерного канала.



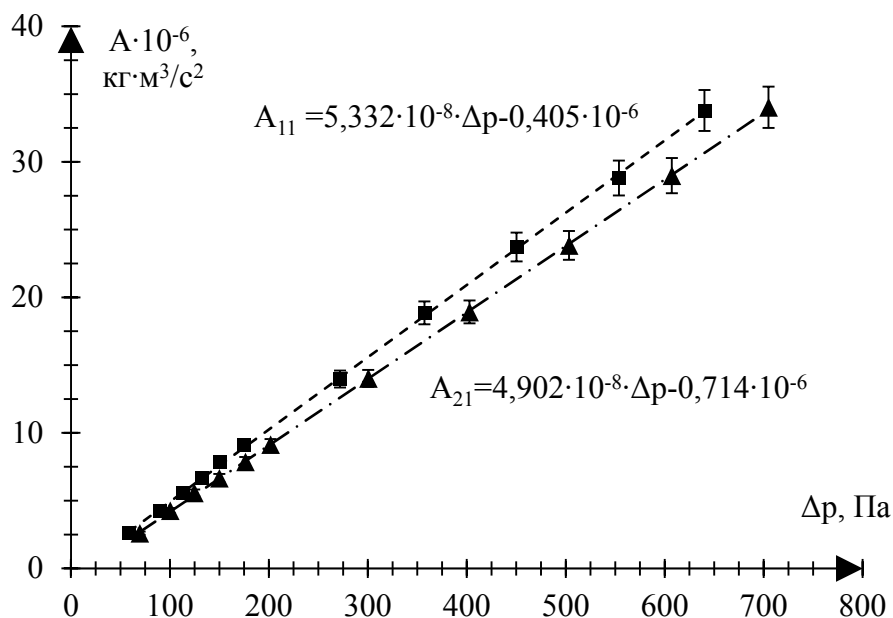
■ — расходомерный канал № 11; ▲ — расходомерный канал № 21

Рис. 8. Градуировочные характеристики расходомерных каналов № 11 и № 21 при отсутствии в них вставок



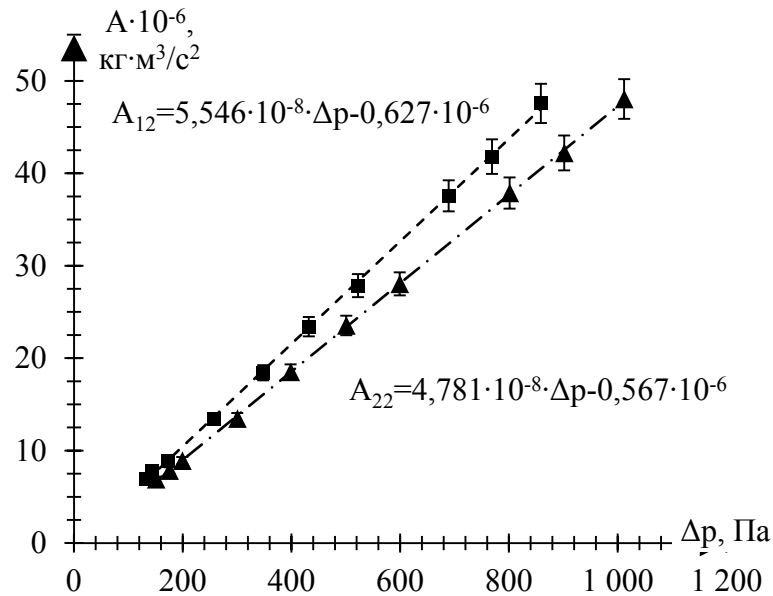
■ — расходомерный канал № 12; ▲ — расходомерный канал № 22

Рис. 9. Градуировочные характеристики расходомерных каналов № 12 и № 22 при отсутствии в них вставок



■ — расходомерный канал № 11; ▲ — расходомерный канал № 21

Рис. 10. Градуировочные характеристики расходомерного канала № 11 без вставки и расходомерного канала № 21 при наличии в нём вставки диаметром проходного сечения 8,5 мм



■ — расходомерный канал № 12; ▲ — расходомерный канал № 22

Рис. 11. Градуировочные характеристики расходомерного канала № 12 без вставки и расходомерного канала № 22 при наличии в нём вставки диаметром проходного сечения 8,5 мм

Показано, что для всех расходомерных каналов зависимость отношения квадрата массового расхода воздуха к его плотности в расходомерном канале от динамического напора в нём имеет линейный характер.

Результаты экспериментального исследования гидродинамики напорной камеры

Результаты экспериментального исследования гидродинамики напорной камеры представлены на рисунках 12 — 15.

В экспериментах измерялись следующие параметры: p_{ij} — избыточное статическое давление в расходомерном канале, Па; Δp_{ij} — динамический напор на трубке Пито, Па; T — температура воздушного потока, К; $G_{\text{расх}}$ — массовый расход воздуха через расходомерное устройство / экспериментальный участок, кг/с; $P_{\text{атм}}$ — атмосферное давление, Па.

В экспериментах получены следующие гидродинамические характеристики проточной части экспериментального участка: массовые расходы воздушного потока в подводящих (G_{11} и G_{12}) и отводящих (G_{21} и G_{22}) каналах, средние скорости воздушного потока в подводящих ($\bar{w}_{11}$ и $\bar{w}_{12}$) и отводящих ($\bar{w}_{21}$ и $\bar{w}_{22}$) каналах, плотности воздушного потока в подводящих (ρ_{11} и ρ_{12}) и отводящих (ρ_{21} и ρ_{22}) каналах и помещении стендового зала ($\rho_{\text{атм}}$), числа Рейнольдса в подводящих (Re_{11} и Re_{12}) и отводящих (Re_{21} и Re_{22}) каналах, коэффициенты МГС выходных частей отводящих каналов (ζ_{21} и ζ_{22}),

отношения коэффициентов МГС в отводящих каналах (ζ_{21}/ζ_{22}), отношения чисел Рейнольдса в отводящих каналах (Re_{21}/Re_{22}).

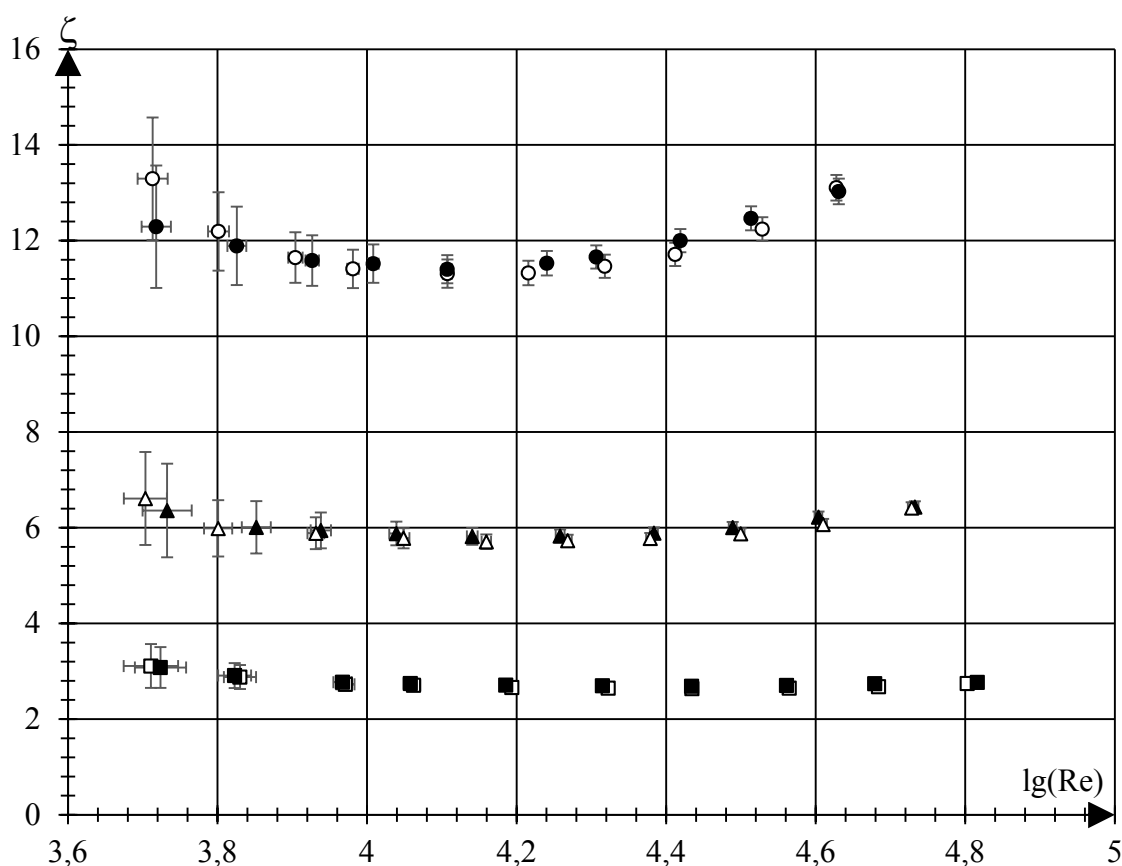
В опытах массовый расход воздуха G_0 составляет 0,01 кг/с.

Зависимости коэффициентов МГС изолированных отводящих каналов № 21 и № 22 для участков между сечением отбора давления в каналах и выходом в открытый объём от десятичного логарифма числа Re при наличии вставок в отводящих каналах представлены на рисунке 12.

Коэффициент МГС для отводящих каналов № 21 и № 22 без вставок слабо убывает с увеличением десятичного логарифма числа Re в них.

Коэффициент МГС для расходомерных каналов № 21 и № 22 со вставками увеличиваются с увеличением десятичного логарифма числа Re от 4,0 до 4,9 (рис. 12).

Показано, что коэффициенты МГС отдельных (расходомерных) каналов больше коэффициентов МГС каждого из смежных отводящих каналов (рис. 13).



●, ○ – вставки с $d_{\text{вст}} = 8,5$ мм; ▲, △ – вставки с $d_{\text{вст}} = 10$ мм; ■, □ – вставки с $d_{\text{вст}} = 12,5$ мм; ○, △, □ – отводящий канал № 21; ●, ▲, ■ – отводящий канал № 22

Рис. 12. Зависимость коэффициентов МГС отдельных отводящих каналов от десятичного логарифма числа Re в них при наличии вставок

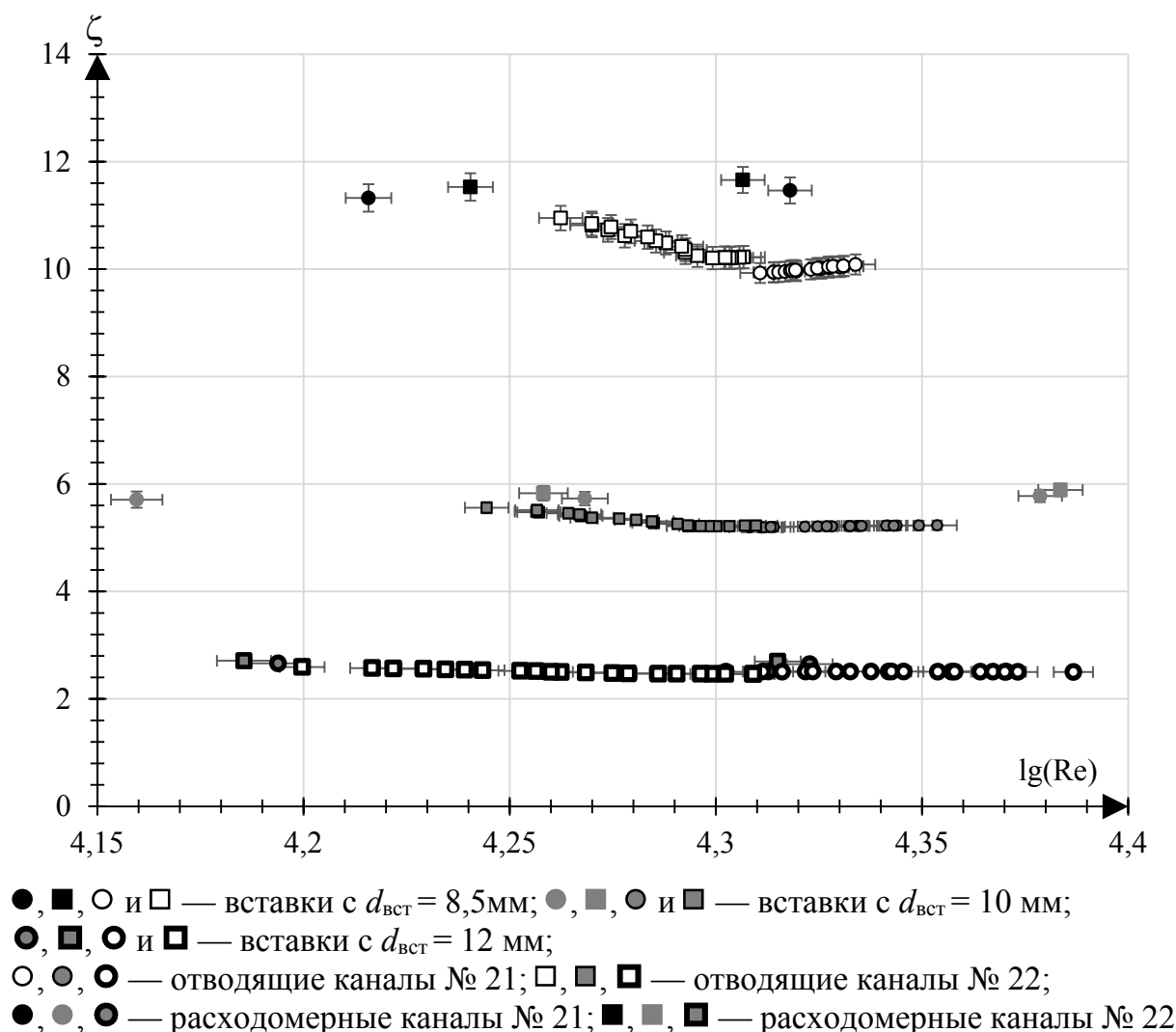


Рис. 13. Зависимости коэффициентов МГС смежных отводящих и изолированных каналов от десятичного логарифма числа Re в них при наличии вставок

При увеличении отношения чисел Рейнольдса в отводящих каналах Re_{21}/Re_{22} уменьшается отношение коэффициентов МГС отводящих каналов ζ_{21}/ζ_{22} (рис. 14).

Указанное изменение обусловлено уменьшением угла входа набегающего на отводящие каналы потока воздуха и уменьшением отношения массовых расходов воздуха, поступающих в них.

На рисунке 15 приведены зависимости отношения массовых расходов воздуха в отводящих каналах от отношения массовых расходов в подводящих каналах для конструкций экспериментального участка со вставками и без них.

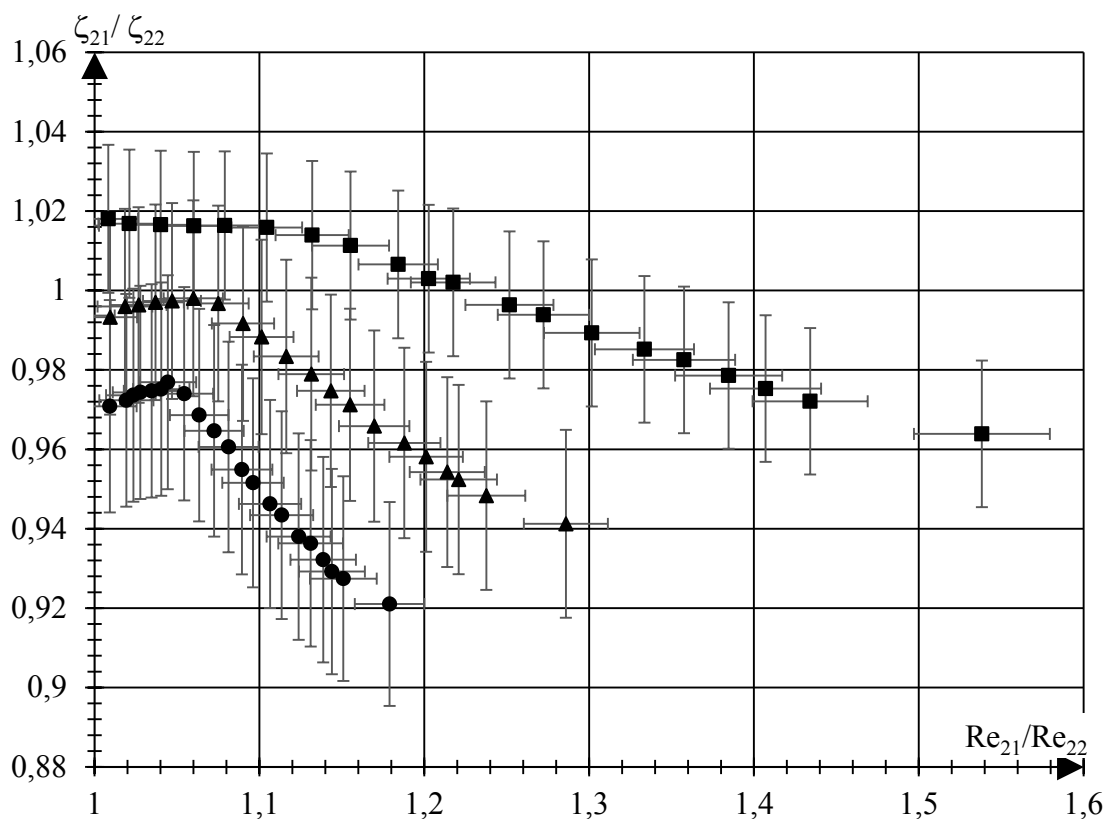
Установлено влияние гидродинамических характеристик подводящих каналов на гидродинамические характеристики отводящих каналов при постоянном массовом расходе воздуха через экспериментальный участок и турбулентном течении воздуха в напорной камере.

Показано, что при даже при работе одного подводящего канала массовый расход воздуха присутствует в обоих отводящих каналах. Причем, при отсутствии массового расхода воздуха через один из подводящих каналов со вставками, минимальное значение относительного массового расхода воздуха в отводящих каналах выше, чем в отводящих каналах без вставок. Уменьшение отношения массового расхода воздуха в подводящих каналах сопровождается уменьшением отношения массового расхода воздуха в отводящих каналах.

Для осесимметричной напорной камеры с двумя подводящими и двумя отводящими каналами полуэмпирическое соотношение по определению отношения массовых расходов воздуха в отводящих каналах в зависимости от отношения массового расхода воздуха в подводящих каналах имеет вид:

$$q_2 = 1 + 0,598 \cdot \zeta^{-0,598} \cdot (q_1^{0,745} - 1), \quad (16)$$

где q_1 — относительный массовый расход воздуха в подводящих каналах; q_2 — относительный массовый расход воздуха в отводящих каналах; ζ — коэффициент МГС изолированного расходомерного канала.



● — вставки с $d_{\text{вст}} = 8,5$ мм; ▲ — вставки с $d_{\text{вст}} = 10$ мм; ■ — вставки с $d_{\text{вст}} = 12$ мм

Рис. 14. Зависимость отношения коэффициентов МГС смежных отводящих каналов от отношения чисел Re в них при $G_0 = 0,01$ кг/с и наличии различных типов вставок

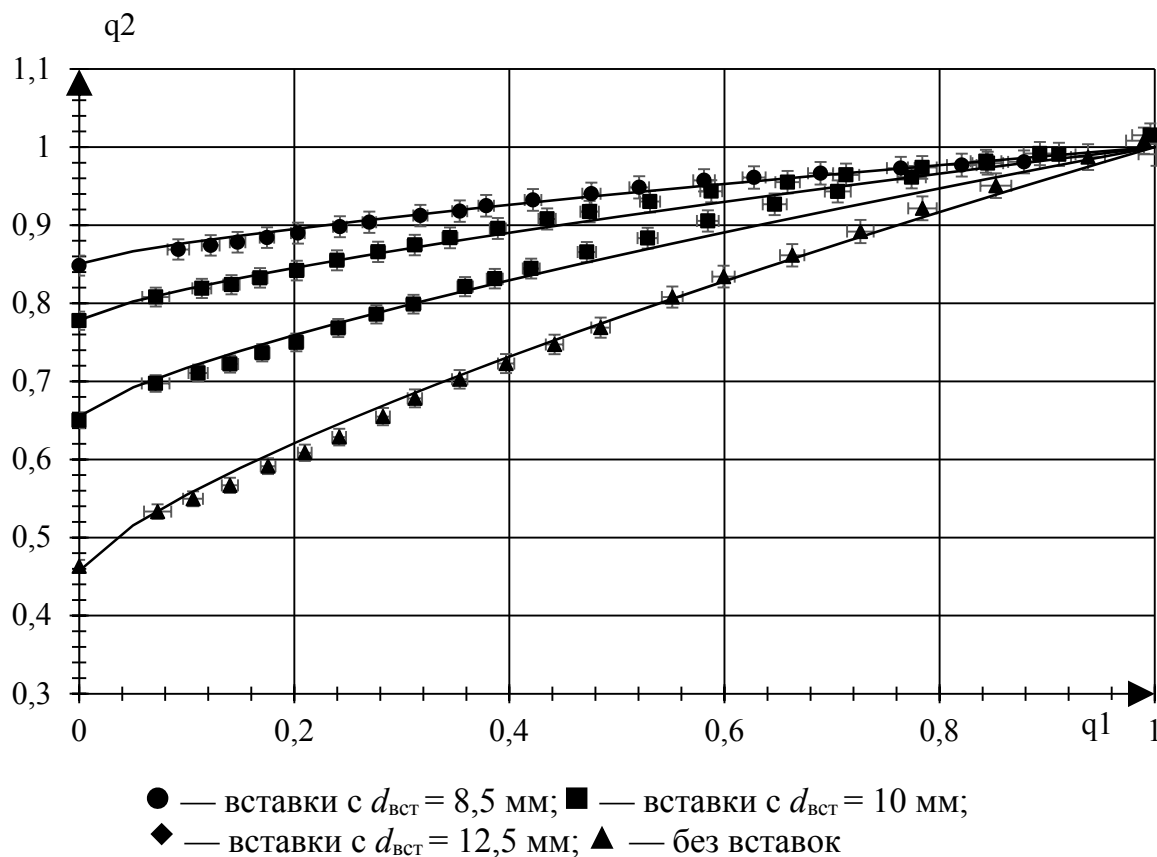


Рис. 15. Зависимость отношений массовых расходов воздуха в отводящих каналах от отношения массовых расходов воздуха в подводящих канала при наличии и отсутствии вставок

Полученные с использованием соотношения (16) значения отношения расходов q_2 отличаются от аналогичных значений, полученных экспериментальным путем, не более чем на $\pm 3,0$ %.

Достоверность рассматриваемой методики подтверждена сравнением с многочисленными опытными данными.

Краткое описание сущности установленной закономерности

Установлена неизвестная ранее закономерность изменения коэффициентов гидравлического сопротивления смежных отводящих каналов, подключенных к напорной камере, при изменении параметров набегающего на них потока.

Отмеченные изменения отношения коэффициентов гидравлического сопротивления отводящих каналов обусловлены уменьшением отношения углов входа потоков в каналы и отношения массовых расходов потоков перед отводящими каналами.

Закономерность получена при определенном диапазоне соотношений размеров напорной камеры, турбулентном течении жидкости в отводящих каналах и идентичном массовом расходе жидкости через напорную камеру.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что экспериментальное исследование гидродинамики проточной части напорной камеры по-прежнему является актуальным, т. к. остаются вопросы относительно перераспределения потоков воздуха между отводящими каналами в зависимости от ее гидродинамических и конструктивных характеристик.

2. Разработан и изготовлен экспериментальный участок, состоящий из симметричной плоской напорной камеры с двумя подводящими и двумя отводящими цилиндрическими каналами, позволяющий производить определение массового расхода воздуха через экспериментальный участок и массовых расходов воздуха через каждый подводящий и отводящий канал.

3. Экспериментально определены градуировочные характеристики расходомерных каналов. Показано, что для расходомерных каналов зависимость отношения квадрата массового расхода воздуха к его плотности в расходомерном канале от динамического напора в них имеет линейный характер.

4. Представлены результаты измерения массового расхода воздуха через напорную камеру, избыточных статических давлений и перепадов давления в подводящих и отводящих каналах, определены массовые расходы через подводящие и отводящие каналы, коэффициенты местного гидравлического сопротивления выходных частей отводящих каналов со вставками и без них и чисел Рейнольдса в подводящих и отводящих каналах.

5. Установлено влияние параметров набегающего на отводящие каналы потока воздуха на коэффициенты местного гидравлического сопротивления отводящих каналов при постоянном массовом расходе воздуха через экспериментальный участок.

6. Показано, что при работе одного подводящего канала массовый расход воздуха имеет место в обоих отводящих каналах. При этом относительный массовый расход воздуха в отводящих каналах со вставками выше, чем в отводящих каналах без них. Уменьшение отношения массового расхода воздуха в подводящих каналах сопровождается уменьшением отношения массовых расходов в соответствующих им отводящих каналах.

7. Полученные результаты работы имеют значительную практическую и научную ценность, отвечают актуальным потребностям атомной отрасли. Использование результатов позволит повысить эффективность и надежность работы реакторов и теплообменников ядерных энергетических установок, усовершенствовать расчетные методики и провести верификацию расчетных программ в области гидродинамики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович Г.Н.* Теория турбулентных струй – М.: Физматгиз, 1960. – 716 с.
2. *Авдеев Е.Ф., Чусов И.А., Левченко В.А. и др.* Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления модели корпусного реактора // Известия ВУЗов. Сер. Ядерная энергетика. – 2005. – №4. – С. 77–85.
3. *Алексеев С.В.* Аэродинамические эффекты в энергетике // Препринт. 216 ИТ СО АН СССР. Новосибирск. – 1990. – С. 58.
4. *Анофриев Г.И., Быстров П.И., Крапивин А.М. и др.* Гидравлические характеристики однорядных коллекторных систем // Теплоэнергетика. – 1971. – № 9. – С. 32–35.
5. *Быстров П.И., Михайлов В.С.* Гидродинамика коллекторных теплообменных аппаратов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
6. *Габрианович Б.Н. Дельнов В.Н.* Особенности гидродинамики проточных частей коллекторных систем теплообменников и реакторов ЯЭУ. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. – 215 с.
7. *Дельнов В.Н.* Гидродинамика типичных раздающих коллекторных систем ЯЭУ: современные представления и перспективы исследования // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2020. – №. 4. – С. 116-128.
8. *Дельнов В.Н.* Уточнение и применение схем течения теплоносителя в раздающих коллекторных системах теплообменников и реакторов ЯЭУ // Избранные труды АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» / Отв. ред. А.А. Говердовский. – Обнинск, 2021. – С. 175 – 196.
9. *Идельчик И.Е.* Аэродинамика технологических аппаратов (подвод, отвод и распределение потоков по сечению аппаратов). – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.
10. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
11. *Идельчик И.Е.* Некоторые интересные эффекты и парадоксы в аэродинамике и гидравлике. – Машиностроение, 1982. – 96 с.
12. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.* Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы); под общ. ред. П.Л. Кириллова. – Изд. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
13. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С.* Гидродинамические расчеты : справочное учебное пособие. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2007. – 184 с.
14. *Меерович И.Г., Мучник Г.Ф.* Гидродинамика коллекторных систем. – М.: Наука, 1986.
15. *Митенков Ф.М., Головкин В.Ф., Ушаков П.А., Юрьев Ю.С.* Проектирование теплообменных аппаратов АЭС: Монография – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 296 с.

16. Олейник В.Н., Лимарь Н.Н. Определение параметров потока в плоском раздаточном коллекторе // Тр. Ленингр. института водного транспорта. – Вып. 162. – Л.: Транспорт, 1978.

17. РБ-040-09. Расчеты соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования водоохлаждаемых ядерных энергетических установок: руководство по безопасности: дата внедрения 2009-09-01 / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор). Изд. Официальное. – М.: Издательство стандартов, 2009. – 252 с.

18. Решетов В.А., Смирнов В.П., Пикулева Т.А. Гидравлика кругового раздаточного коллектора // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Реакторостроение. – 1976. – Вып. 13, № 2. – С. 65–74.

19. Таганов Г.И. Выравнивающее действие сеток в потоках жидкостей и газов. – Труды ЦАГИ, № 604, 1947. – 14 с.

20. Фомичев М.С. Исследование гидродинамических характеристик потока теплоносителя при подводе его в реактор через один центральный патрубок // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Реакторостроение. – 1972. – Вып. 1. – С. 19–32.

21. Фомичев М.С. Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 248 с.

22. Юренев В. Н., Лебедев П. Д. Теплотехнический справочник: в 2-х т. – Энергия, 1975. – 896 с.

23. Hong Z.C., Chuang S.H. Kinetic theory approach to twin plan jet turbulent mixing analysis // AIAA J. 1988. V. 26. – P/ 303 – 310.

24. Karvounis P. et al. Numerical and experimental study of flow characteristics in solar collector manifolds // Energies. – 2019. – T. 12. – №. 8. – С. 1431.

25. Masters G.F. Interaction of two plan, parallel jets AIAA J. 1977. V. 15. P. 1756-1762.

26. Miller D.R., Comings E.W. Force-momentum fields in a dual-jet flow // J. Fluid Mech. 1960. V. 7. P.237-265.

27. Tanaka E. The interference two-dimensional parallel jets // Bull. JSME. 1970. V. 13. P. 272-280.

28. Tanaka E. The interference two-dimensional parallel jets // Bull. JSME. 1974. V. 17. P. 920-927.

Подписано к печати 22.10.2025.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 1,2. Уч.-изд. л. 1,4.
Тираж 40 экз. Заказ № 296.

Отпечатано в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» методом прямого репродуцирования
с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.