

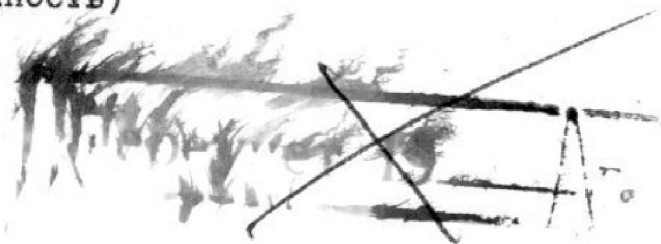
АВТОРЕФЕРАТ  
Щ 40  
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ЩЕТИНИН Леонид Михайлович

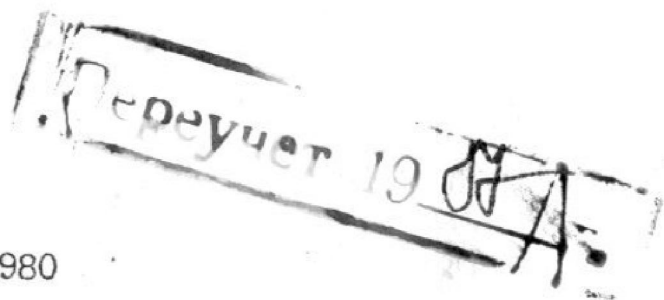
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ  
ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОТОКОВ  
(ВОДА, ВОЗДУХ, ГАЗ) В ТРУБОПРОВОДАХ БОЛЬШОГО  
Д И А М Е Т Р А

05.13.07 – автоматическое управление и регу-  
лирование, управление технологическими про-  
цессами (промышленность)



А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук



Одесса – 1980

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Принятые на XXV съезде КПСС "Основные направления развития народного хозяйства СССР на 1976-1980 годы" предусматривают меры по повышению эффективности производства. Одна из них заключается в существенном расширении масштабов автоматизации технологических процессов (ТП), агрегатов и производств в различных отраслях промышленности, в том числе и пищевой (ПП).

Автоматизация ТП, которая призвана обеспечить повышение производительности аппаратов и качество продукта, невозможна без точного знания действительных значений физических величин - параметров, характеризующих эти процессы. Измерения и измерительные приборы являются важнейшим средством получения первичной информации, необходимой для автоматизации ПП.

В настоящее время в качестве средств получения информации в АСУТП широко применяются общепромышленные преобразователи расхода. Однако их несовершенство во многих случаях не позволяет применять существующие расходомеры для целей автоматизации ТП.

Современные предприятия ПП являются сложными технологическими комплексами, оснащенными энергоемким и крупногабаритным оборудованием, отдельные технологические звенья которого соединены трубопроводами с поперечным сечением  $D_y \geq 500$  мм, а также коробами (квадратной и прямоугольной конфигурации). В системах трубопроводов большого диаметра и в коробах обычно трудно выполнить требование о длине прямолинейных участков, обеспечивающей стабилизацию потока, поэтому необходимы первичные преобразователи расхода, малочувствительные к деформации потока. Для трубопроводов квадратной и прямоугольной конфигураций в настоящее время отсутствуют стандартные расходомеры.

№. 0 13427 ✓

Одесский технологический институт пищевой промышленности

Представляется актуальным исследование и разработка первичного преобразователя расхода, применение которого на установках с технологическими линиями в виде трубопроводов большого диаметра и коробов позволит автоматизировать управление ТП в промышленности.

Цель работы заключается в исследовании и разработке методов и средств измерения расхода деформированных потоков в трубопроводах больших диаметров и в коробах, применительно к специфике ПШ.

Для достижения поставленной цели следовало решить следующие задачи:

- определить потребность промышленности в разработке специальных расходомеров и сформулировать требования к ним;
- изучить особенности гидродинамического взаимодействия наиболее распространенных стандартных преобразователей расхода (расходомеры переменного перепада, электромагнитные и турбинные расходомеры) с деформированными потоками;
- определить преобразователь расхода, наиболее перспективный для измерения потоков в трубопроводах большого диаметра с существенной неравномерностью распределения скоростей;
- разработать математическую модель взаимодействия исследуемого первичного преобразователя расхода с деформированными потоками;
- выполнить математическое моделирование взаимодействия предлагаемого расходомера с осесимметричными и асимметричными деформированными потоками для определения оптимальной структуры преобразователя расхода;
- оценить адекватность математической модели экспериментом в лабораторных и натуральных условиях, а также разработать и внедрить рекомендации по расчету, изготовлению, монтажу и эксплуатации расходомера.

Методы исследования. При исследовании использовались методы:

математической физики (механики сплошных сред); моделирование на ЭЦВМ гидродинамического взаимодействия преобразователя расхода типа осредняющий крест с деформированными потоками; с помощью теории вероятностей и математической статистики экспериментально проверялась адекватность математической модели, а также анализировалась погрешность измерения расхода деформированных потоков.

Научная новизна. Обоснована возможность измерения расхода деформированных потоков по методу "площадь-скорость" с применением осредняющей напорной трубки. Разработана математическая модель взаимодействия первичного преобразователя с деформированными потоками, позволяющая получить характеристики расходомера, установленного в потоки с произвольным распределением скоростей.

Усовершенствован чувствительный элемент расходомера, позволяющий реализовать метод "площадь-скорость" применительно к измерению расхода деформированных потоков с асимметричным распределением скоростей. Определена конструкция первичного преобразователя расхода типа осредняющий крест с учетом влияния различных факторов на характеристики расходомера для деформированных потоков.

Исследован объект измерения - деформированные потоки в сечениях за местными сопротивлениями часто встречающимися в практике.

Изучено взаимодействие осредняющей трубки и осредняющего креста с различными деформированными потоками. Установлены границы применимости этих преобразователей расхода для измерения потоков с неравномерным распределением скоростей. Получены метрологические характеристики расходомеров.

Практическое значение результатов работы заключается в разработке методики расчета осредняющего креста, выполненной в виде руководящих технических материалов "Рекомендации по расчету, изготовлению и монтажу первичных преобразователей расхода типа

осредняющая трубка и осредняющий крест" (пособие для проектирования). РТМ переданы для внедрения в проекты Одесского филиала Укр-гипропищепрома. Разработаны временные методические указания по измерению расхода природного газа осредняющими трубкой и крестом.

Подготовлены и апробированы алгоритмы расчета взаимодействия осредняющего креста с деформированными потоками, необходимые для получения расчетных характеристик преобразователей расхода для неизученных потоков.

Реализация в промышленности. Применение осредняющего креста в технологических установках III позволяет получить информацию, необходимую для создания АСУТП.

Первичный преобразователь расхода типа осредняющий крест применяется на Славянском солевыварочном комбинате для реализации системы автоматического управления ТП сушки соли в сушилке кипящего слоя.

По линии сотрудничества в рамках СЭВ осредняющим крестом оснащены семь коробов машины для сушки магнитной ленты на народном предприятии кинофабрике *VEB ORWO* г. Вольфен, ГДР. Установка расходомера в комплекте со вторичными приборами и управляющей вычислительной машиной позволила создать АСУТП сушки магнитной ленты.

Система автоматического измерения расхода деформированных потоков с первичным преобразователем типа осредняющий крест внедрена на семи предприятиях СССР и на одном предприятии ГДР. Подтвержденный экономический эффект от внедрения систем составляет 150,8 тыс.руб. в год. Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов исследования составляет 188,4 тыс.руб. в год.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение на Всесоюзной научно-технической конференции "Развитие систем метрологического обеспечения

измерения расхода и количества веществ" (г. Казань, 1975 г.), десятой научно-технической конференции молодых исследователей ОПИ (г. Одесса, 1975 г.), XXXIII и XXXIX отчетных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ОПИ (г. Одесса, 1975 и 1976 гг.), научно-технических семинарах сотрудников кафедр измерительной техники и автоматизации, а также технической гидромеханики технического университета г. Дрездена (г. Дрезден, ГДР, 1977 и 1978 гг.), конференции "Измерительная техника" (г. Дрезден, 1977 г.) и конференции Госстандарта ГДР "Нормали для расходомеров с высокой точностью измерения расхода" (г. Берлин, 1978 г.).

Публикации. По результатам исследований и разработок опубликовано 12 работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 142 страницах машинописного текста, иллюстрируется 131 рисунком и фотографиями на 70 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии из 89 наименований на 10 страницах и приложений на 12 страницах.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводятся результаты анализа проблем измерения расхода в некоторых отраслях народного хозяйства. На примерах дрожжевой, консервной, пивоваренной и сахарной промышленности определена потребность III в разработке и реализации специальных расходомеров. Показано, что трудности создания систем автоматического регулирования ряда ТП этих отраслей часто связаны с отсутствием расходомерных устройств, удовлетворяющих следующим требованиям: а) минимальные гидравлические сопротивления при измерении расхода в трубопроводах большого диаметра  $D_y > 1000$  мм; б) малая чувствительность к деформации потока, обеспечивающая возможность измерения расхода потоков в непосредственной близос-

ти от местных (сопротивлений; в) надежность и долговечность, простота обслуживания и монтажа, невысокая стоимость; г) возможность измерения в технологических линиях некруглого сечения (типа коробов квадратной и прямоугольной формы больших размеров).

Анализируются особенности взаимодействия наиболее распространенных преобразователей расхода с деформированными потоками для выявления наиболее перспективного, с целью его дальнейшего совершенствования.

Показано, что расходомеры с сужающими устройствами, несмотря на их известные достоинства, не могут быть рекомендованы для трубопроводов больших диаметров вследствие громоздкости конструкции и, следовательно, трудности монтажа и больших потерь напора.

Приведены данные об электромагнитных расходомерах (ЭМР) с неоднородным магнитным полем, разработанных в НИИ теплоэнергетического приборостроения. Показано, что возможности ЭМР с неоднородным магнитным полем имеют определенные ограничения и что получение магнитного поля, строго удовлетворяющего соотношению  $BW = const$  принципиально невозможно. Такое магнитное поле может быть осуществлено лишь приближенно и нельзя создать прибор, не реагирующий на профиль скорости. Кроме того, трудности связаны с дороговизной ЭМР, с большим расходом энергии для питания магнитных систем ЭМР и сложностью их эксплуатации.

Отмечены трудности и недостатки, связанные с применением турбинных, ультразвуковых и вихревых расходомеров для измерения деформированных потоков в трубопроводах большого диаметра.

Приведены результаты исследований, выполненных на кафедре гидравлики и гидравлических машин ОПИ, свидетельствующие, что измерение расхода деформированных потоков методом "площадь-скорость" с использованием осредняющих напорных трубок, является перспективным и что для совершенствования данного метода применительно

к специфике деформированных потоков с асимметричным распределением скоростей необходимы специальные исследования.

Во второй главе на основании представления о гидродинамическом взаимодействии осредняющей трубки с осесимметричными потоками разрабатывается математическая модель для ее расчета. Выполняется математическое моделирование взаимодействия осредняющих трубок, установленных в деформированные потоки с осесимметричным и асимметричным распределением скоростей. Движение жидкости внутри осредняющей трубки происходит под воздействием натекающего на нее потока. Характер движения, расход и давление вдоль трубки зависят от распределения скоростей в основном (контролируемом) потоке и от конструктивных размеров трубки.

В зависимости от соотношения давлений внутри осредняющей трубки ( $p$ ) и в потоке ( $p_{вн}$ ) происходит втекание жидкости через отверстия из потока в трубку ( $p_{вн} > p$ ), либо вытекание ее из трубки в поток ( $p_{вн} < p$ ). Вблизи оси трубы ( $p_{вн} > p$ ) происходит втекание жидкости в осредняющую трубку, а в зоне, примыкающей к стенкам трубы ( $p_{вн} < p$ ), жидкость из трубки вытекает в трубопровод (рис. I).

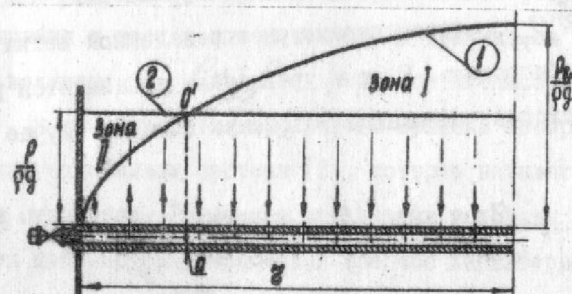


Рис. I. Схема распределения давления внутри трубки и внешнего давления, создаваемого натекающим потоком

Таким образом, в трубке происходит движение с переменной

вдоль потока массой, отличающееся от обычных задач такого рода тем, что противодействие во внешней среде переменное.

Напор, под которым происходит истечение через отверстия осредняющей трубки, может быть выражен следующими уравнениями:

при истечении из основного потока в трубку

$$H = \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} - \frac{p_{cp}}{\rho g}, \quad (1)$$

и при истечении из трубки в основной поток

$$H = \frac{p_{cp}}{\rho g} - \left( \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \right), \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2)  $p_{cp}$  - давление внутри осредняющей трубки в сечении, где расположено отверстие;  $p$  - статическое давление в основном потоке перед отверстием;  $V$  - скорость в основном потоке перед отверстием.

Давление внутри осредняющей трубки можно определить методом решения задачи о трех резервуарах, принимая, что пространство внутри трубки соответствует общей точке между подводящими и отводящими участками воображаемого трубопровода, т.е. считая, что пьезометрическая линия вдоль трубки горизонтальна. Как известно, эта методика сводится к составлению системы уравнений, каждое из которых выражает  $p_{cp}$  через параметры определенной ветви, рассматриваемого трубопровода. К этим уравнениям добавляется уравнение баланса расходов, замыкающее систему. В нашем случае система имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{p_{cp1}}{\rho g} - \frac{p_1}{\rho g} &= \frac{V_1^2}{2g} - \frac{Q_1^2}{\mu_{вх1}^2 \omega_0^2 2g}, \\ \frac{p_{cp2}}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} &= \frac{V_2^2}{2g} - \frac{Q_2^2}{\mu_{вх2}^2 \omega_0^2 2g}, \\ \frac{p_{cpk}}{\rho g} - \frac{p_k}{\rho g} &= \frac{V_k^2}{2g} - \frac{Q_k^2}{\mu_{вхk}^2 \omega_0^2 2g}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{p_{cpk+1}}{\rho g} - \frac{p_{k+1}}{\rho g} = \frac{V_{k+1}^2}{2g} - \frac{Q_{k+1}^2}{\mu_{вхk+1}^2 \omega_0^2 2g},$$

$$Q_1 + Q_2 + \dots = Q_k + Q_{k+1} + \dots$$

где индексы при  $p, V, \mu$  и  $Q$  соответствуют отверстиям от I до K, через которые жидкость втекает в трубку, и от K и далее - отверстиям, через которые жидкость вытекает из трубки. Согласно предполагаемому направлению движения жидкости через соответствующие отверстия в системе (3)  $Q$  - объемный расход жидкости через отверстия;  $\omega_0$  - площадь отверстия;  $\mu_{вх}$  - коэффициент расхода отверстия в зоне сбора;  $\mu_{вых}$  - коэффициент расхода отверстия в зоне раздачи.

Система (3) может быть решена графически, причем в ходе такого решения легко исправить неправильное первоначальное предположение о границе между зоной сбора и раздачи расхода в трубке. Тогда при заданном распределении скорости по сечению основного потока жидкости и при заданном расположении отверстий на образующей осредняющей трубки однозначно определяется давление  $p_{cp}$  внутри трубки. На рис. 2 приведено графическое решение системы (3) для трубки с шестью отверстиями. На графике по оси ординат отложена величина  $\frac{p_{cp} - p}{\rho g}$ ; по оси абсцисс - расход жидкости  $Q$  через отверстия трубки. На графике изображены кривые, выраженные уравнениями системы (3), которые называются характеристиками отверстий. Возможное при данных условиях значение  $p_{cp}$  может быть найдено путем сложения абсцисс характеристик отверстий, через которые происходит сбор, и отверстий, через которые происходит раздача жидкости, после чего находят ординату точки пересечения "суммарных" характеристик сбора и раздачи. Решение правильно, если пересечение происходит на последней ветви сум-

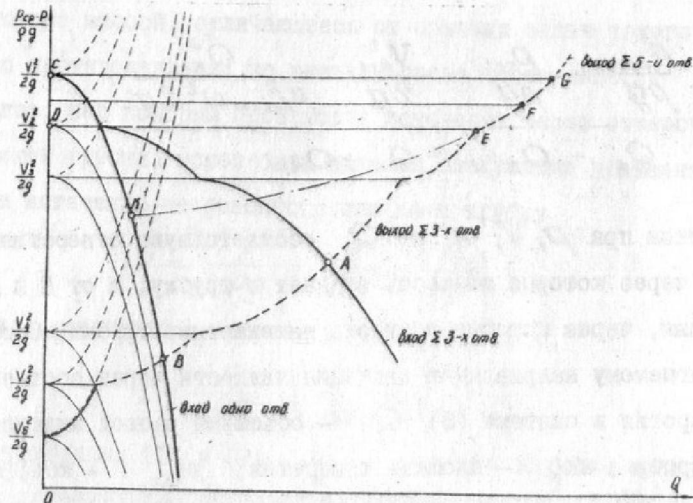


Рис. 2. Графическое решение системы уравнений (3)

марных характеристик (точка А). В противном случае (например, точка В) следует выбрать другое распределение сбора и раздачи между отверстиями и повторить суммирование характеристик. Указанный подбор продолжают до получения правильного решения.

Математическая модель взаимодействия осредняющей трубки с потоком позволяет рассчитывать давление внутри преобразователя расхода и дает возможность определять показания дифференциального манометра, подключенного к осредняющей трубке и штуцеру отбора статического давления.

С помощью алгоритма рассмотренной математической модели нами были составлены программы расчета на ЭЦМ "Минск-32" давления внутри трубки, перепада, создаваемого преобразователем расхода и коэффициента скорости осредняющей напорной трубки ( $\varphi_{тр}$ ).

По программам были рассчитаны характеристики осредняющих трубок, установленных в потоки со следующими осесимметричными и асимметричными распределениями скоростей: ламинарное движение жидкости, турбулентное течение жидкости в трубе с большой шерохо-

ватостью; движение потока в гладкой трубе при трех значениях числа Рейнольдса -  $3 \cdot 10^6$ ,  $4 \cdot 10^4$ ,  $4 \cdot 10^3$ ; движение жидкости в сечениях за отводами 90 и 60°.

На основании математического моделирования:

1. Определена зависимость коэффициента  $\varphi_{тр}$  от расхода и степени неравномерности потока. Коэффициент скорости осредняющей трубки, установленной в деформированном потоке с осесимметричным распределением скоростей, имеет стабильное значение, близкое к единице, при  $U_i/U_0 \leq 1,5$  ( $U_i$  - местная скорость,  $U_0$  - скорость на оси потока), т.е. во всем диапазоне турбулентного течения.

2. Уточнены конструктивные параметры расходомера. Показано, что осредняющая трубка с разбивкой отверстий в центрах равновеликих колец в осесимметричных потоках имеет более стабильное значение коэффициента скорости, чем трубка с равномерным расположением отверстий.

3. Установлена необходимость совершенствования чувствительного элемента расходомера, позволяющего реализовать метод "площадь-скорость" для измерения деформированных потоков с асимметричным распределением скоростей. Коэффициент  $\varphi$  осредняющей трубки, установленной непосредственно за отводами 90 и 60°, зависит от ее положения относительно плоскости поворота отвода.

4. Усовершенствован чувствительный элемент расходомера, позволяющий реализовать метод "площадь-скорость" применительно к измерению расхода потоков с асимметричным распределением скоростей. Коэффициент скорости первичного преобразователя, состоящего из двух взаимно перпендикулярных осредняющих трубок - осредняющего креста, установленного за отводами 90 и 60°, в сечениях  $L/D \geq 3,5$  не зависит от его положения относительно отводов.

5. Установлена зависимость коэффициента скорости осредняюще-

го креста от степени неравномерности поля скорости.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что осредняющий крест может применяться для измерения расхода потоков с асимметричным распределением скоростей.

При разработке математической модели, являющейся аналогом гидродинамического взаимодействия осредняющих преобразователей с деформированными потоками, потребовалось ввести ряд допущений. Поэтому только после проверки адекватности модели экспериментам в лабораторных и производственных условиях можно рекомендовать результаты исследования для широкого внедрения.

В третьей главе приведены результаты лабораторного исследования осредняющей трубки и осредняющего креста, установленных в деформированных потоках с различным характером неравномерного распределения скоростей. Осредняющие преобразователи устанавливались за следующими местными сопротивлениями: отвод на  $90^\circ$  при  $\bar{R} = 1,4$ ; отводящие части диагонального насоса, стоящие из отвода на  $60^\circ$  с  $\bar{R} = 1,7$  и диффузора; задвижка, степень открытия которой ( $h/D$ ) изменялась от 0,2 до 1,0; комплекс - регулирующая задвижка с обратным клапаном.

На этом этапе исследования проверялась достоверность данных, полученных в результате математического моделирования, оценивалась адекватность математической модели экспериментам.

Изучался объект измерения - деформированные потоки и оценивались особенности взаимодействия осредняющих преобразователей расхода с такими потоками. Определялись гидравлические и метрологические характеристики разрабатываемого преобразователя расхода.

По данным лабораторных экспериментов получено: движение жидкости в сечениях за отводом сопровождается значительной неравномерностью распределения скоростей и давлений. Неравномерность распределения абсолютных скоростей в сечениях потока распространяет-

ся на значительную длину прямолинейного участка трубопровода: тангенциальная составляющая скорости, а вместе с ней и закрутка потока за отводом  $90^\circ$  ощущается в сечении  $L/D = 34,0$ .

Осредняющий крест, установленный за отводом  $90^\circ$  в сечениях  $L/D \geq 2,5$  при изменении расхода имеет стабильное значение коэффициента  $\varphi_{кр} = 0,98$ . Средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента  $\varphi$  в опытах  $\sigma_\varphi \pm 1,5\%$ . В сечениях  $L/D \leq 2,5$  коэффициент  $\varphi_{кр}$  при числах  $Re \geq 0,8 \cdot 10^5$  также стабилен, при этом его величина зависит от положения преобразователя относительно плоскости поворота отвода. Данные, полученные при лабораторном исследовании осредняющего креста, установленного в потоке за отводом  $90^\circ$ , удовлетворительно совпадают с результатами математического моделирования, приведенными во второй главе.

Неравномерность распределения скоростей в потоке за отводом насоса распространяется на значительном расстоянии после отводящих частей насоса. Распределение скоростей в потоке за рассмотренными отводящими частями насоса имеет характер, аналогичный течению в криволинейных каналах.

Коэффициент скорости осредняющего креста в сечениях  $L/D \geq 2,5$  за отводящими частями насоса имеет стабильное значение  $\varphi_{кр} = 0,98$ . Осредняющие трубки, установленные горизонтально и вертикально в сечениях  $L/D \geq 6$ , с изменением расхода имеют неизменные коэффициенты скорости, отличающиеся на 1...2%. Численные значения  $\varphi_{тр}$  близки к единице.

Движение жидкости в сечениях за регулирующей задвижкой сопровождается значительной неравномерностью распределения скоростей. При малых степенях открытия задвижки в потоке имеют место зоны отрыва и вихреобразования.

Коэффициент скорости осредняющего креста, установленного в сечениях  $L/D \geq 6$  за регулирующей задвижкой при  $h/D = 0,2...$

..1,0 имеет стабильное значение  $\rho_{кр} = 0,97$ . Осредняющая трубка имеет стабильное значение коэффициента  $\rho$  независимое от степени открытия задвижки, в сечениях  $L/D \geq 10$ .

Коэффициент скорости осредняющего креста, установленного в сечениях  $L/D \geq 6$  за обратным клапаном, не зависит от расхода потока,  $\rho_{кр} = 0,98$ . Средняя квадратичная относительная погрешность в этих опытах  $\sigma_{\rho} = \pm 1,1\%$ .

Проверка осредняющего креста, установленного за задвижкой в сечении  $L/D = 10$ , выполненная на расходомерной весоизмерительной установке кафедры измерительной техники Дрезденского технического университета, показала, что предельная относительная погрешность преобразователя не превышает  $\pm 1\%$ . Среднеквадратичная относительная погрешность коэффициента  $\rho_{кр}$  составляет  $\sigma_{\rho} = \pm 0,7\%$ .

Данные математического моделирования взаимодействия осредняющего креста с потоком за отводом  $90^{\circ}$ , отводящими частями насоса и задвижкой, удовлетворительно совпадают с результатами лабораторного исследования преобразователя расхода.

Проверка экспериментальных данных на их повторяемость по критерию Кохрена подтвердила воспроизводимость результатов. При определении степени соответствия экспериментальных данных гипотезе гидродинамического взаимодействия осредняющего креста с деформированными потоками, по критерию Фишера установлена адекватность математической модели.

Результаты лабораторных исследований показывают, что осредняющий крест может применяться в качестве первичного преобразователя расхода для измерений в потоках с различным характером распределения скоростей.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований осредняющего креста на промышленных объектах, прове-

денных с целью получения материала, необходимого для разработки рекомендаций по расчету, изготовлению, монтажу и обслуживанию первичного преобразователя расхода.

Рассмотрены результаты взаимодействия осредняющего креста с деформированными потоками: в сечении  $L/D = 9$  за отводом насоса Оп5-110; в сечении  $L/D = 5$  за напорным патрубком насоса 36В-22; в отводе осевых насосов - Оп6-87 и Оп6-110; в непосредственной близости от напорных патрубков центробежных насосов 24НД и 48Д; в напорном патрубке высоконапорного вентилятора ТВ-250, 1,2; а также в коробах аппарата для сушки магнитной ленты на кинофабрике *VEB ORWO* (г. Вольфен, ГДР).

Опыт эксплуатации первичного преобразователя расхода на четырех напорных трубопроводах ( $D_y = 1400$  мм) насосной станции № 48 Каланчакской рисовой оросительной системы (Херсонская обл.) свидетельствует о надежности разработанного расходомера.

Коэффициент скорости осредняющего креста, установленного в отводящем патрубке осевого насоса Оп6-87 и в непосредственной близости от центробежных насосов 24НД и 48Д, с изменением расхода имеет стабильное значение. Средняя квадратичная относительная погрешность измерения подачи осевых и центробежных насосов при помощи осредняющего креста, в комплекте со стандартными вторичными приборами типа ДМ и КСД, составляет около  $\pm 2\%$ .

На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по расчету, изготовлению и монтажу первичного преобразователя расхода типа осредняющий крест.

Установка осредняющего креста в потоке за вентилятором в технологических линиях сушилки "КС" позволяет реализовать систему автоматического управления процессом сушки соли (Славянский солевыварочный комбинат № 2).

Осредняющий крест может применяться для измерения расхода в

коробах квадратной и прямоугольной формы с существенной неравномерностью распределения скоростей. На базе комплекта расходомера и управляющей вычислительной машины создана АСУТП сушки магнитной ленты с использованием информации о расходе горячего воздуха в коробах сушильного аппарата (Народное предприятие *VEB ORWO*, г. Вольфен, ГДР).

#### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ потребности в расходомерах для некоторых отраслей пищевой промышленности (дрожжевая, консервная, пивоваренная и сахарная), газовой промышленности и для малиорации показал необходимость разработки специальных первичных преобразователей, малочувствительных к деформации потока, предназначенных для работы в трубопроводах большого диаметра и в коробах квадратной и прямоугольной формы. Определены требования, предъявляемые к расходомерам.

2. Показана перспективность использования метода "площадь-скорость" с осредняющими напорными трубками для измерения расхода деформированных потоков.

Разработана математическая модель гидродинамического взаимодействия осредняющих преобразователей с потоком.

Усовершенствован первичный преобразователь расхода, позволяющий реализовать метод "площадь-скорость" для измерения расхода деформированных потоков с асимметричным распределением скоростей и определена оптимальная конструкция расходомера типа осредняющий крест.

3. Результаты математического моделирования подтверждены экспериментальными данными, полученными на лабораторных стендах. Детально изучен объект измерения - деформированные потоки за наиболее часто встречающимися местными сопротивлениями. Исследовано взаимодействие осредняющего креста с потоками в сечениях с нерав-

номерным распределением скоростей.

Проверка воспроизводимости лабораторных данных по критерию Кохрена подтвердила повторяемость результатов эксперимента. По критерию Фишера установлено соответствие экспериментальных данных гипотезе гидродинамического взаимодействия осредняющего креста с деформированными потоками.

4. Получены основные метрологические характеристики осредняющего креста - коэффициент скорости  $\varphi_{кр}$  и средняя квадратичная относительная погрешность  $\varphi_{кр} - \sigma_{\varphi}$

Осредняющий крест может быть использован для измерения расхода потоков воздуха, газов и воды не несущих большого количества взвеси - (менее  $100 \text{ г/м}^3$ ), а также жидкостей, близких по физическим свойствам к воде и воздуху при числах  $Re \geq 0,7 \cdot 10^5$ .

5. Достоинствами разработанного преобразователя расхода являются: незначительное гидравлическое сопротивление, надежность в эксплуатации, простота изготовления и монтажа, малая металлоемкость.

Погрешность измерения расхода деформированных потоков в трубопроводах круглой и квадратной формы при помощи системы - осредняющий крест в комплекте со стандартными приборами типа ДМ и КСД - составляет  $\pm 2\%$ .

6. На основании проведенных лабораторных и натурных экспериментов разработаны руководящие технические материалы "Рекомендации по расчету, изготовлению и монтажу первичных преобразователей расхода типа осредняющая трубка и осредняющий крест" (пособие для проектирования).

Результаты лабораторных исследований подтверждены испытаниями осредняющего креста на производственных объектах. Применение осредняющего креста позволило реализовать системы автоматического управления процессом сушки соли (Славянский солевыварочный комби-

нат № 2) и сушки магнитной ленты (народное предприятие кинофабрика *VEB ORWO*, г. Вольфен, ГДР).

7. Система измерения расхода с первичным преобразователем типа осредняющий крест внедрена на семи предприятиях СССР и одном предприятии ГДР. Подтвержденный годовой экономический эффект от внедрения составил 150 тыс.руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Гусак А.И., Иванов К.Ф., Шетинин Л.М. Об измерении расхода жидкости в условиях закрученных потоков.- В кн.: Гидравлика и гидротехника. Т. 122, Кишинев, 1974, с.111-114 (Труды Кишиневского сельскохозяйственного института - КСХИ).

2. Грабовский А.М., Гусак А.И., Шетинин Л.М. Измерение расхода воды в деформированных потоках за отводами насосов.- В кн.: Гидравлика и гидротехника. Т. 150, Кишинев, 1975, с.50-52 (Труды КСХИ).

3. Грабовский А.М., Гусак А.И., Шетинин Л.М. Измерение расхода воды при помощи осредняющего креста.- В кн.: Гидравлика и гидротехника. Т. 150, Кишинев, 1975, с.52-57 (Труды КСХИ).

4. Грабовский А.М., Гусак А.И., Шетинин Л.М. Измерение расхода жидкости в деформированных потоках.- В кн.: Гидравлика и гидротехника. Т. 166, Кишинев, 1976, с.14-18 (Труды КСХИ).

5. Грабовский А.М., Гусак А.И., Шетинин Л.М. Измерение расхода в деформированном потоке за задвижкой.- В кн.: Гидравлика и гидротехника. Т. 166, Кишинев, 1976, с.18-22 (Труды КСХИ).

6. Грабовский А.М., Дунчевский Г.М., Шетинин Л.М. Алгоритм расчета осредняющей (интегрирующей) трубки.- Республиканский фонд алгоритмов и программ. ИК АН УССР, Киев, 1976. Рег. номер 20, 9 с.

7. Грабовский А.М., Гусак А.И., Шетинин Л.М. Исследование

преобразователя расхода для измерения подачи осевых насосов.- В кн.: Гидравлика и гидротехника. Кишинев, 1977, с.23-26 (Труды КСХИ).

8. Грабовский А.М., Гусак А.И., Шетинин Л.М. Преобразователь расхода для измерения подачи центробежных насосов типа НД и Д.- В кн.: Гидравлика и гидротехника. Кишинев, 1977, с.26-28. (Труды КСХИ).

9. Грабовский А.М., Гусак А.И., Шетинин Л.М. Гидродинамические исследования преобразователей расхода, малочувствительных к деформации потока.- В кн.: Метрологические исследования в области измерения расхода и количества веществ. Вып. 201(261), М., Из-во стандартов, 1978, с.10-12 (Труды метрологических институтов СССР).

10. Грабовский А.М., Гусак А.И., Шетинин Л.М. Исследование полей скоростей и давлений в напорном патрубке осевого насоса с целью измерения подачи.- В кн.: Реф. инф. о НИР в вузах УССР. "Машиностроение и металлообработка". Вып. 21, Киев, "Вища школа", с.68-70.

11. Грабовский А.М., Гусак А.И., Шетинин Л.М. Об измерении подачи центробежных насосов типа Д с помощью осредняющего креста.- В кн.: Реф. инф. о НИР в вузах УССР. "Машиностроение и металлообработка". Вып.21, Киев, "Вища школа", с.70-71.

12. Грабовский А.М., Шетинин Л.М. Рекомендации по расчету, изготовлению и монтажу первичных преобразователей расхода типа "осредняющая трубка и осредняющий крест".- Руководящие технические материалы. 33.23.04.001-79, Одесса, 1979 (Пособие для проектирования), 40 с.