

0-789918

На правах рукописи

НИКОЛАЕВ НИКОЛАЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

ОБОБЩЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОТКЛОНЕНИЯ  
КОЭФФИЦИЕНТА ИСТЕЧЕНИЯ ДИАФРАГМЫ ПРИ НАЛИЧИИ  
ВОЗМУЩЕНИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫМИ  
МЕСТНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань – 2011

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматизации и управления технологическими процессами» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор  
Фафурин Виктор Андреевич

Официальные оппоненты: – доктор технических наук, профессор  
Глебов Геннадий Александрович

– доктор физико-математических наук,  
профессор Кирпичников Александр Петрович

Ведущая организация: – ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы», г. Москва

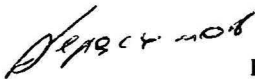
Защита состоится 28 октября 2011 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.080.11 при Казанском национальном исследовательском технологическом университете по адресу: 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68 (зал заседаний ученого совета).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, Казанский национальный исследовательский технологический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.080.11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского национального исследовательского технологического университета

Автореферат разослан «24» сентября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук



Герасимов А.В.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000687454

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Средства измерений расхода с сужающими устройствами (СУ) до сих пор являются основными приборами для коммерческого учета расхода жидкостей и газов и их лидирующее положение на рынке будет сохраняться еще достаточно долго. Стандартными условиями, в которых определяется коэффициент истечения СУ, служит развитое турбулентное течение при сформировавшемся профиле скорости. Отклонение параметров потока от стандартных условий вызывает появление дополнительной погрешности коэффициента истечения, которая зависит от структуры потока, относительного диаметра СУ, числа Рейнольдса и др. Генераторами возмущений потока служат различные местные сопротивления (МС), за которыми течение сильно отличается от развитого турбулентного.

Если перед измерительным участком располагается МС, то в соответствии с ГОСТ 8.586.2 – 2005 (ИСО 5167 – 2: 2003) требуется либо увеличение длины прямолинейного участка трубопровода, либо увеличение неопределенности коэффициента расхода. Сокращение длин прямолинейных участков или определение дополнительной погрешности (неопределенности) измерений при нестандартных условиях монтажа представляется возможным только при получении надежных данных по зависимости отклонения коэффициента истечения СУ от геометрических параметров МС и СУ, числа Рейнольдса. Экспериментальное исследование влияния МС на метрологические характеристики требует слишком больших материальных затрат, в силу многообразия типов применяемых МС, и большого числа влияющих факторов. С другой стороны, до недавнего времени получение таких данных с помощью вычислительной гидродинамики не имело смысла в силу отсутствия вычислительной техники, способной выполнять сложные вычисления в реальном масштабе времени. Таким образом, в настоящее время задача исследования влияния МС на течение в СУ методом математического моделирования является актуальной.

**Цель работы.** Исследование влияния геометрических параметров МС и СУ, числа Рейнольдса на отклонение коэффициента истечения СУ от стандартного значения, построение обобщенных зависимостей по влиянию геометрических параметров МС с осевой симметрией, СУ и числа Рейнольдса на отклонение коэффициента истечения СУ от стандартного значения.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Построение математической модели течения в трубопроводе со стандартной диафрагмой при наличии установленных на входе местных сопротивлений, ее реализация в среде Fluent 6.3 и тестирование на основе сравнения расчетов с имеющимися в литературе экспериментальными данными.

2. Получение необходимого объема данных по зависимостям отклонения коэффициента истечения сужающего устройства, возникающего при деформации потока местными сопротивлениями, от геометрических параметров и числа Рейнольдса в диапазоне изменения: относительного диаметра диафрагмы  $\beta$  от 0,548 до 0,707; числа Рейнольдса от  $3,66 \cdot 10^4$  до  $3,66 \cdot 10^6$ .

3. Установление закономерностей влияния возмущений, создаваемых ме-

стными сопротивлениями, на параметры потока в окрестности сужающего устройства.

4. Установление зависимостей обобщающих параметров от геометрических параметров и числа Рейнольдса.

5. Получение универсальной зависимости отклонения коэффициента истечения от стандартного значения в условиях действия возмущений, создаваемых осесимметричными местными сопротивлениями.

**Научная новизна** заключается в следующем:

- получены в широком диапазоне чисел Рейнольдса данные по влиянию возмущений, создаваемых МС, на отклонение коэффициента истечения от стандартного значения;

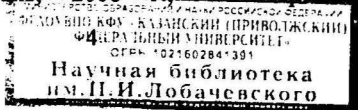
- установлены универсальные зависимости отклонения коэффициента истечения диафрагмы от стандартного значения, обобщающие влияние геометрических параметров и числа Рейнольдса.

**Практическая значимость.** Результаты работы позволяют уточнить дополнительную погрешность коэффициента истечения диафрагмы или длины предвключенных участков измерительных трубопроводов для всех исследованных типов местных сопротивлений и могут использоваться для других методов измерения расхода, а также при разработке нормативных документов.

**Достоверность результатов** обеспечивается строгой постановкой вычислительных экспериментов при обоснованном применении физических и математических моделей, граничных условий, применением различных схем не ниже II порядка и обеспечением устойчивости решения; большим объемом методической работы и сравнением результатов вычислений с большим количеством экспериментальных данных. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментами, относительная погрешность построенной математической модели не превышает погрешности экспериментальных данных. Существует полная воспроизводимость модельных расчетов.

**Личный вклад автора.** Постановка цели работы сделана совместно с научным руководителем. Постановка задач исследований, идеи и их реализации, анализ результатов моделирования и выводы, выносимые на защиту, полностью принадлежат автору. Научный руководитель В.А. Фафурин является соавтором всех опубликованных работ.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были доложены на следующих научно-технических конференциях: XIX Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-19), Воронеж, 2006 г; XX Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-20), Ярославль, 2007 г; VIII Международный симпозиум «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение», Казань, 2007 г; XXI Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-21), Саратов, 2008 г; XIV Международная конференция по методам аэрофизических исследований (ICMAR 2008), Новосибирск, 2008 г; VI школа-семинар молодых ученых и специалистов академika РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», Казань, 2008 г. Ученый В.А. Фафуриной научной



технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2009», Казань, 2009 г.

Автор выражает благодарность научному консультанту к.т.н. Явкину В.Б. за ценные советы и замечания, которые были учтены в диссертации.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 научных трудов, из них 5 статей в перечне журналов, утвержденных ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 159 страницах и состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы из 84 наименований. Работа иллюстрирована 81 рисунком и содержит 7 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение.** Во введении раскрыта актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель, определена практическая значимость научных результатов.

**В Главе 1** представлен аналитический обзор опубликованных работ по исследованию влияния МС на дополнительную погрешность коэффициента истечения стандартной диафрагмы и других РППД.

**В параграфе 1.1** проведен анализ публикаций, посвященных исследованию влияния распределения параметров в набегающем потоке на метрологические характеристики СУ. Выделен ряд параметров, которые могут служить обобщающими параметрами для построения зависимостей отклонения коэффициента истечения. Из опубликованных исследований следует, что попытки получения обобщенных зависимостей применялись только к отдельным частным случаям влияния профиля скорости на коэффициент истечения. Недостаточно данных по влиянию геометрических параметров и числа Рейнольдса, особенно для осесимметричных МС. Получены данные для проведения тестирования математической модели.

**В параграфе 1.2** сделан анализ публикаций, посвященных численному исследованию турбулентных течений в МС, численным методам в гидродинамике и моделям турбулентности, а также математическому моделированию течения в СУ.

**В параграфе 1.3** сформулирована цель исследования и вытекающие из нее задачи исследования.

**Глава 2** содержит описание математической модели течения в расходомере со стандартной диафрагмой, номенклатуру исследуемых МС.

**В параграфе 2.1** приведена общая постановка задачи. В силу наличия осевой симметрии в большинстве исследуемых объектов, основное исследование может быть проведено в двухмерной (2D) осесимметричной постановке. Однако, такие МС, как колена, клапаны и др. требуют трехмерной (3D) постановки.

Основная область применения расходомеров переменного перепада давления относится к числам Рейнольдса, соответствующим развитому турбулентному течению ( $Re > 10^5$ ), поэтому в качестве исходной системы уравнений должна быть принята осредненная по Рейнольдсу система уравнений Навье-

Стокса (RANS).

Течение в ИТ будем рассматривать, как стационарное и изотермическое течение несжимаемой жидкости.

Таким образом, задача исследования может быть поставлена как исследование стационарного несжимаемого изотермического турбулентного течения несжимаемой жидкости в осесимметричном канале.

**Параграф 2.2** содержит описание математической модели течения, основу которой составляют уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial}{\partial r}(r\bar{u}_r) + \frac{\partial}{\partial x}(r\bar{u}_x) = 0;$$

уравнения движения

$$\rho \left( \bar{u}_r \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial x^2} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-r\rho\overline{u'_r u'_x}) + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho\overline{u'_x{}^2});$$

$$\rho \left( \bar{u}_r \frac{\partial \bar{u}_r}{\partial x} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_r}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{u}_r}{\partial x^2} - \frac{\bar{u}_r}{r^2} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-\rho\overline{u'_r{}^2}) + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho\overline{u'_r u'_x}).$$

Используя гипотезу Буссинеска  $-\rho\overline{u'_i u'_j} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ , необходимо записать условия замыкания для  $u'_i u'_j$ . Эти условия могут быть получены из решения системы уравнений, представляющих собой модель турбулентности.

В параграфе 2.3 представлено описание использованных в работе моделей турбулентности.

Более совершенными моделями, обладающие рядом преимуществ при расчете течений с большими деформациями профиля скорости, отрывных течений и течений с закруткой, являются RNG  $k$ - $\epsilon$  и SST  $k$ - $\omega$  модели турбулентности. Уравнения RNG  $k$ - $\epsilon$  модели

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r u_x k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \epsilon - Y_{M1}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r u_x \epsilon) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_\epsilon - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon,$$

где  $\alpha_k$ ,  $\alpha_\epsilon$  - обратные эффективные числа Прандтля для  $k$  и  $\epsilon$ .

Турбулентная вязкость в  $k$ - $\epsilon$  моделях вычисляется в соответствии с гипотезой Колмогорова-Прандтля  $\nu_t = C_\mu k^2/\epsilon$  (\*).

В теории RNG для турбулентной вязкости записывается дифференциальное уравнение  $d \left( \frac{\rho^3 k}{\sqrt{\epsilon \mu}} \right) = 1,72 \frac{\bar{v}}{\sqrt{\bar{v}^3 - 1 + C_v}} d\bar{v}$ , которое при больших Re вырождается в формулу (\*). Наибольшее различие между RNG и стандартной  $k$ - $\epsilon$  заключается в наличии члена  $R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k}$ , обеспечивающего более адекватный учет кривизны линий тока, чем стандартная  $k$ - $\epsilon$  модель.

Модель переноса сдвиговых напряжений SST  $k$ - $\omega$  модель является эмпи-

рической моделью, включающей два транспортных уравнения: для кинетической энергии турбулентности

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (ru_x k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k$$

и отношения  $\omega = \varepsilon/k$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (ru_x \omega) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega$$

где  $\Gamma_k = \mu + \mu/\sigma_k$ ,  $\Gamma_\omega = \mu + \mu/\sigma_\omega$ .

В параграфе 2.4 приведено обоснование выбора моделей турбулентности. На основе сравнения экспериментальных и расчетных данных обоснован выбор моделей турбулентности.

Проведено сравнение профилей скорости, полученных в расчете и эксперименте за диффузором, конфуззором и внезапным расширением. Показано, что модели SST  $k-\omega$  и RNG  $k-\varepsilon$  обеспечивают в целом удовлетворительное согласование с экспериментом при расчете параметров потока, но лучшие результаты получены на модели RNG  $k-\varepsilon$  с двухслойной пристеночной моделью и улучшенной функцией стенки. Профили скорости, рассчитанные по модели  $k-\omega$  сильнее расходятся с экспериментом. Исследована зависимость от входных граничных условий; задание на входе профиля развитого турбулентного течения уменьшает расхождение расчета и эксперимента, особенно при малых расстояниях  $L/D$ ,  $D$  – диаметр трубопровода. Все модели турбулентности дают сильные отличия профиля скорости от экспериментального при  $L/D \leq 6$ . Также проведено сравнение изменения турбулентной кинетической энергии, полученного в расчете и эксперименте за внезапным расширением.

Сравнение по коэффициенту истечения проведено для  $L/D=3, 6,3, 9,9, 16, 23,2, 37, 60$ ; отношений диаметра отверстия СУ к диаметру трубопровода (относительный диаметр СУ)  $\beta=0,548, 0,707$ ; числа  $Re=3,66 \cdot 10^5$ , углов расширения диффузора  $\gamma_R=16^\circ, 32^\circ$ . Основная масса расчетов была проведена на сетках, обеспечивавших значение переменной функции стенки  $y^+ \leq 1,3$  для 95% пристеночных ячеек и не более 1%  $y^+ \leq 8$ . Результаты сравнения расчета и эксперимента представлены на рис.1, где представлены зависимости относительного отклонения коэффициента истечения

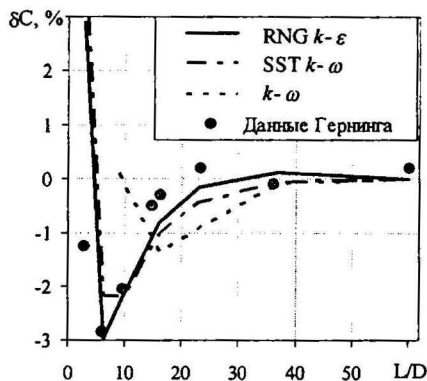


Рис. 1. Зависимости относительного отклонения коэффициента истечения  $\delta C, \%$

относительного диаметра СУ)  $\beta=0,548, 0,707$ ; числа  $Re=3,66 \cdot 10^5$ , углов расширения диффузора  $\gamma_R=16^\circ, 32^\circ$ . Основная масса расчетов была проведена на сетках, обеспечивавших значение переменной функции стенки  $y^+ \leq 1,3$  для 95% пристеночных ячеек и не более 1%  $y^+ \leq 8$ . Результаты сравнения расчета и эксперимента представлены на рис.1, где представлены зависимости относительного отклонения коэффициента истечения  $\delta C=(C/C_0-1) \cdot 100\%$ , где  $C$  – текущее значение коэффициента истечения,  $C_0$  – значение коэффициента истечения в стандартных условиях.

В области дополнительных погрешностей  $\delta C \geq 1\%$  расхождение рас-

чета и эксперимента не превышает 1 % для модели, в области  $0,5\% \leq \delta C \leq 1\%$  не более 0,5%, в области  $\delta C \leq 0,5\%$  не более 0,2 %.

Проведено исследование влияния сетки. Показано, что  $y^+ \leq 1,3$  обеспечивает сеточную независимость.

Результаты методического исследования позволяют сделать вывод, о возможности применения RANS моделей турбулентности для расчетов метрологических характеристик СУ при наличии МС. Лучшие результаты обеспечивает модель RNG  $k-\varepsilon$ , которая лучше согласуется с экспериментом в более широком диапазоне при  $L/D$ , чем SST  $k-\omega$ . Отклонения коэффициента истечения, рассчитанные по модели  $k-\omega$  сильнее отличаются от экспериментальных.

В главе 3 представлены результаты исследования влияния МС на структуру потока в окрестности диафрагмы, а также получены зависимости параметров, которые могут быть использованы в качестве обобщающих. Материал главы сгруппирован по типам МС.

В параграфе 3.1 представлены результаты исследования деформации потока за конфузорами. Получены изолинии функции тока (линии тока) в окрестности диафрагмы и вблизи угловой точки конфузора, зависимости коэффициента Кориолиса и отношения скоростей в характерных точках сечения к среднерасходной скорости от геометрических параметров конфузора и  $L/D$ ; рассмотрено влияние угла сужения конфузора и  $L/D$  на изменение коэффициента сужения струи; построены профили скорости.

Размеры отрывных зон перед и за диафрагмой не зависят от расстояния между конфузуром и диафрагмой и геометрических параметров конфузора. Угол сужения конфузора является более сильно влияющим параметром по сравнению с отношением диаметров. Причина этого заключается в возникновении небольшого локального отрыва за угловой точкой сопряжения конической и цилиндрической частей конфузора при углах  $\gamma_k \geq 48^\circ$ .

Показано, что коэффициент сужения струи  $\mu$  меняется не более, чем на 0,07%. Зависимость коэффициента Кориолиса от  $L/D$  приведена на рис.2.

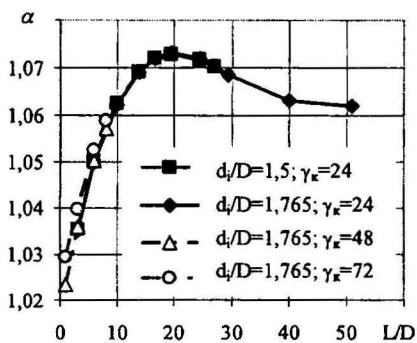


Рис. 2. Зависимость коэффициента Кориолиса после конфузора от  $L/D$

коэффициент Кориолиса является интегральной характеристикой профиля скорости. При малых  $L/D$ , где сильно влияние конфузора значение  $\alpha$  близко к 1, т.к. профиль скорости более однородный, чем профиль в развитом турбулентном потоке. Затем профиль заостряется и  $\alpha$  становится больше для развитого турбулентного течения. При  $L/D \geq 20$   $\alpha$  стремится к значению, соответствующему развитому течению. На зависимости коэффициента Кориолиса влияют геометрические параметры конфузора.

Зависимости  $\alpha$  от  $u_a(r=0,475D)/u_m$ ,  $u_a(r=0,45D)/u_m$ ,  $u_a(r=0)/u_m$ , где  $r$  – текущий радиус,  $u_a(r=0)$  – осевая скорость на оси трубопровода,  $u_m$  – среднерасходная скорость, неоднозначны.

В параграфе 3.2 представлены результаты исследования течения влияния диффузора на течение в окрестности диафрагмы, зависимости параметров, которые могут быть использованы в качестве обобщающих от геометрических параметров диффузора и диафрагмы.

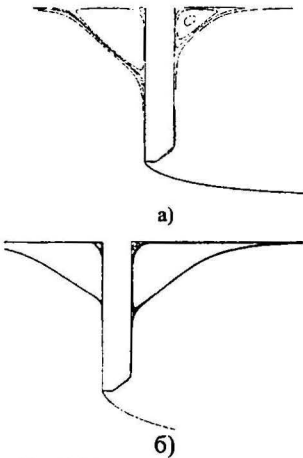


Рис.3. Изменение размеров отрывных зон с изменением  $L/D$ :  
а)  $L/D=3$ , б)  $L/D=16$ .

Диффузор вносит значительно более сильное возмущение в поток, чем конфузор, поэтому влияние на отрывные зоны перед и за диафрагмой хорошо заметно (рис.3). В сильно возмущенном течении отрывная зона перед диафрагмой более короткая (рис.3, а) чем на большом удалении от диффузора (рис.3, б); вторичный вихрь за диафрагмой также имеет меньшие размеры при малых  $L/D$ . Более сильное влияние диффузора обуславливает и большую зависимость коэффициента сужения струи от  $L/D$  (до 15%).

В параграфе 3.3 представлены результаты исследования параметров потока за внезапными расширениями (ВР) для относительного диаметра внезапного расширения  $d/D=0,75, 0,5, 0,25$ , относительного диаметра диафрагмы  $\beta=0,576$ , чисел Рейнольдса  $Re=10^5$  и  $10^6$ . Получены зависимости коэффициента сужения струи и коэффициента Кориолиса от геометрических параметров ВР, числа Рейнольдса, относительного диаметра диафрагмы и  $L/D$ .

Течение за внезапным расширением развивается под воздействием отрывной зоны. Максимальное изменение коэффициента сужения струи  $\mu$  не превышает 3% для  $d/D=0,75$ . На малых расстояниях от ВР  $\mu$  зависит от  $d/D$ ; с ростом  $L/D$  эта зависимость ослабевает, а при  $L/D \geq 13,6$   $d/D$  не влияет на  $\mu$ .

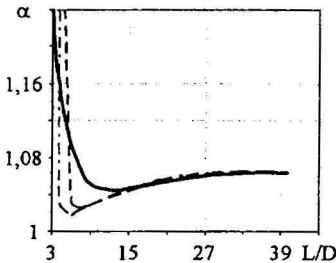


Рис.4. Зависимость коэффициента Кориолиса от относительного расстояния от внезапного расширения,  $Re=10^5$ :

- $d/D=0,75$
- -  $d/D=0,5$
- · -  $d/D=0,25$

Профили скорости для всех  $d/D$  при  $L/D \geq 3$  сначала более заострены, по сравнению профилем развитого турбулентного потока, затем становятся более однородными, а потом стремятся к профилю развитого течения.

Зависимость коэффициента Кориолиса от  $L/D$  для разных  $d/D$  приведена на рис.4. На малых расстояниях  $\alpha$  существенно больше значения  $\alpha_0(Re)$ , соответст-

вующего профилю развитого турбулентного течения и уменьшается, затем становится меньше  $\alpha_0$ , достигает минимума, потом возрастает до максимума и снова убывает, стремясь к  $\alpha_0$ . Изменение осевой скорости на оси трубопровода имеет похожий характер, однако, зависимость  $\alpha$  от  $u_z/u_m$  неоднозначна и сильно нелинейна.

В параграфе 3.4 представлены результаты исследования течения за внезапным сужением (ВС) при  $d/D=1,25, 1,5$  и  $2, \beta=0,576, Re=10^5$ . Структура потока за ВС для всех  $d/D$  одинакова. В ядре потока течение сужающееся, а в пристеночных областях под воздействием отрывных зон за угловыми точками

формируется сужающееся-расширяющееся течение. Получены зависимости коэффициента сужения струи и коэффициента Кориолиса от геометрических параметров ВС, числа Рейнольдса, относительного диаметра диафрагмы и  $L/D$ .

Поведение осевой скорости за ВС оказывается более сложным по сравнению с другими видами МС и характеризуется тремя максимумами и двумя минимумами (рис.5). Изменение коэффициента Кориолиса по длине качественно согласуется с изменением осевой скорости по числу максимумов и минимумов и даже по их положению (рис.6). Однако, соотношения между величинами максимумов и минимумов, а также поведение графиков в окрестности максимумов и минимумов различается.

Так, при  $d/D=1,25$  зависимость  $\alpha$  от  $L/D$  в окрестности II максимума более пологая, чем зависимость  $u/u_m$ ; у коэффициента Кориолиса более ярко выражен II минимум. Таким образом, как и в случае ВР следует по отдельности рассматривать влияние  $u/u_m$  и  $\alpha$  на коэффициент истечения.

В главе 4 проведено исследование влияния МС на метрологические характеристики стандартной диафрагмы. Получены зависимости относительного отклонения коэффициента истечения от стандартного значения от геометрических параметров и числа Рейнольдса. Построены обобщающие зависимости, проведено сравнение различных

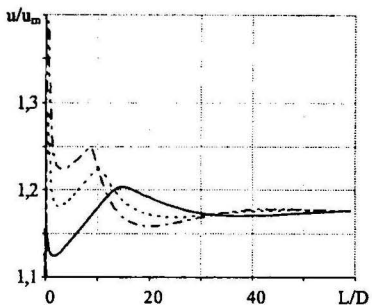


Рис. 5. Изменение скорости за ВС на оси трубопровода по длине,  $Re=10^5, RNG k-\epsilon$ .

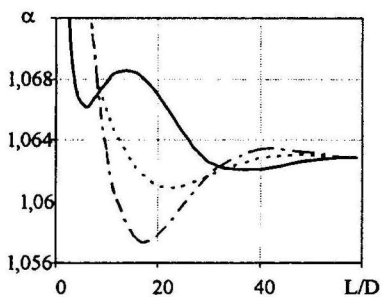


Рис. 6. Изменение коэффициента Кориолиса по длине трубопровода за ВС,  $Re=10^5, RNG k-\epsilon$ .

течения от стандартного значения от геометрических параметров и числа Рейнольдса. Построены обобщающие зависимости, проведено сравнение различных

параметров, использованных для обобщения.

В параграфе 4.1 представлены зависимости отклонения коэффициента истечения от стандартного значения  $\delta C$  от расстояния между МС и диафрагмой для всех исследованных типов МС при различных значениях геометрических параметров. Расчеты влияния конфузора на коэффициент истечения были проведены для  $d_i/D=1,5$  и  $1,766$ ,  $\gamma_k=24^\circ$ ,  $48^\circ$  и  $72^\circ$ ,  $\beta=0,567$ ,  $Re=10^5$ .

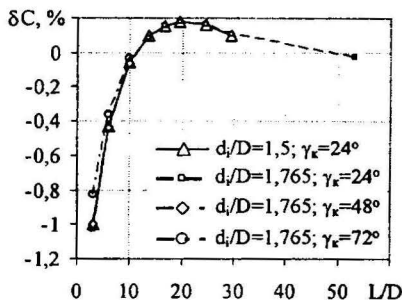


Рис. 7. Влияние расстояния между конфузуром и диафрагмой на отклонения коэффициента истечения,  $Re=10^5$ ,  $\beta=0,576$

конфузора, по крайней мере, в интервале  $1,5 \leq d_i/D \leq 1,76$ . Сильнее влияет угол сужения конфузора, вследствие образования отрывных зон за угловыми точками.

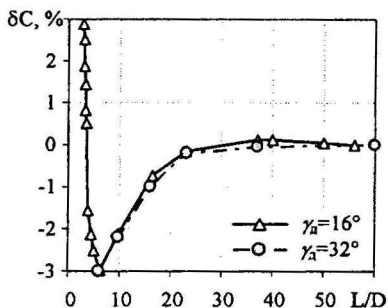


Рис. 8. Зависимость  $\delta C$  от относительного расстояния;  $Re=3,66 \cdot 10^5$ ;  $d_i/D=7/15$ ;  $\beta=0,707$

стандартному значению, поэтому отличие  $\delta C$  для диффузоров с разными углами незначительно. Промежуточные значения различаются, причем диффузор с большим углом раскрытия дает несколько меньшие значения  $\delta C$ , чем диффузор с большим углом раскрытия.

Изменение  $\delta C$  по длине для разных  $d_i/D$  представлено на рис. 7. На малых расстояниях от конфузора коэффициент истечения меньше стандартного. Это отличие составляет около 1% при  $L/D=3$ . С ростом  $L/D$   $\delta C$  возрастает, при  $L/D > 10$  становится положительным, при  $L/D \approx 20$  достигает максимального значения, составляющего 0,2%, затем стремится к 0 при незначительных колебаниях относительно 0.

При разных значениях степени сужения конфузора,  $d_i/D$ , мало отличаются, что говорит о слабой зависимости коэффициента истечения от сужения

Зависимости  $\delta C=f(L/D)$  для диффузора приведены на рис. 8, для углов раскрытия  $\gamma_d = 16^\circ$  и  $32^\circ$  и  $Re=3,66 \cdot 10^5$ . На расстояниях  $L/D \leq 3$   $\delta C$  велико (от 2,5% до 20%) и сильно расходится с данными экспериментов. При  $4 \leq L/D \leq 30$  профиль скорости становится более однородным по сравнению с развитым профилем, а отклонения коэффициента истечения принимают отрицательные значения. Минимум  $\delta C$  достигается при  $L/D \approx 6$ . Величина минимума получена одинаковой для углов раскрытия диффузора  $16^\circ$  и  $32^\circ$ . На большом удалении от диффузора  $\delta C$  приближается к стандартному значению.

Зависимости  $\delta C = f(L/D)$  для ВР приведены на рис.9 для  $d/D=0,75$ , относительного диаметра диафрагмы  $\beta=0,576$  и двух значений числа Рейнольдса –  $Re=10^5$  и  $Re=10^6$ . Характер изменения отклонения коэффициента истечения за внезапным расширением сходен с изменением  $\delta C$  за диффузором.

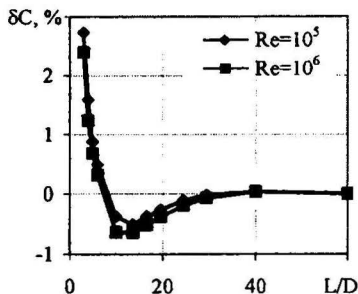


Рис.9. Изменение относительного отклонения коэффициента истечения по длине за ВР,  $d/D=0,75$ ;  $\beta=0,548$

На малых расстояниях ( $L/D \leq 6$ ) профиль скорости за внезапным расширением заострен по сравнению с профилем развитого турбулентного течения, что приводит к положительному отклонению коэффициента истечения. По мере удаления от ВР заостренность профиля уменьшается, вместе с этим уменьшается и  $\delta C$  до отрицательных значений. Переход через 0 происходит при  $L/D \approx 8$ ; положение точки перехода зависит от числа Рейнольдса. При  $L/D=13,6$   $\delta C$  достигает минимума и начинает возрастать. При  $L/D \approx 30$  происходит переход  $\delta C$  от отрицательных к положительным значениям, при дальнейшем увеличении  $L/D$   $\delta C$  возрастает, достигая при  $L/D=40$  максимума, величина которого невелика, всего 0,038%, затем уменьшается и остается постоянным при  $L/D > 60$ . Изменение числа Рейнольдса не меняет качественного характера зависимости, а только немного изменяет  $\delta C$  в точке минимума и положения точек перехода через 0. На больших расстояниях ( $L/D > 40$ ) кривые при разных числах Рейнольдса сливаются.

Зависимость отклонения коэффициента истечения от расстояния между ВС и диафрагмой приведена на рис.10. Представленные на рисунке данные были получены для отношения диаметров  $d/D=1,5$ ,  $\beta=0,576$  и  $Re=10^5$ .

Коэффициент истечения с увеличением расстояния от ВС до диафрагмы сильно изменяется. В течении за внезапным сужением на малых расстояниях ( $L/D \leq 6$ )  $\delta C$  положительно, в то время как для течения за конфузуром на малых  $L/D$  характерны отрицательные значения  $\delta C$ .

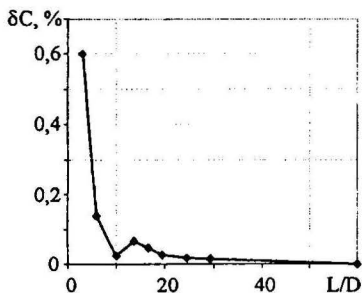


Рис.10. Изменение относительного отклонения коэффициента истечения от  $L/D$ ,  $d/D=1,5$ ;  $Re=10^5$

В случае внезапного сужения течение не является чисто конфузурным, на него наложено влияние отрывных зон, образующихся за острыми кромками внезапного сужения. Отрывные области образуют жидкий контур, который формирует в пристеночных областях сужающе-раширяющееся течение. Поэтому за внезапным сужением течение в ядре потока конфузурное, а в пристеночных областях – диффузорное. Диффузорность течения приводит к большей

заостренности профиля скорости по сравнению с профилем развитого турбулентного течения и, следовательно, к положительным отклонениям коэффициента истечения. С увеличением  $L/D$  от 6 до 10 исчезает однородная часть профиля, что приводит к дальнейшему уменьшению  $\alpha$  и  $\delta C$ . Затем, при увеличении  $L/D$ ,  $\delta C$  увеличивается, достигая максимума при  $L/D=13,6$ . Далее, с ростом  $L/D$   $\delta C$  снижается, асимптотически стремясь к пределу при  $L/D>60$ .

Таким образом, поведение зависимостей  $\delta C=f(L/D)$  существенно различается в зависимости от вида МС, однако качественный характер зависимости может быть спрогнозирован на основе анализа картины течения и профилей скорости. В сужающихся течениях, где под действием отрицательного градиента давления формируется более однородный профиль скорости, чем профиль развитого турбулентного течения, коэффициент истечения будет ниже стандартного, так как более однородному профилю скорости соответствует больший перепад на СУ. Заостренность профиля по сравнению с профилем развитого турбулентного потока вызывает положительные отклонения коэффициента истечения, так как заостренному профилю соответствует меньший перепад давления.

Изменение  $\delta C$  по длине носит немонотонный характер и меняет знак. Отметим, что в точках перехода через 0 значение коэффициента истечения соответствует стандартному. Это может быть использовано для сокращения длины прямолинейного участка.

В параграфе 4.2 представлены результаты исследования влияния геометрических параметров МС и относительного диаметра диафрагмы на  $\delta C$ . Геометрические параметры МС оказывают существенное влияние на поле течения, формируемое за МС. В зависимости от геометрических параметров изменяется

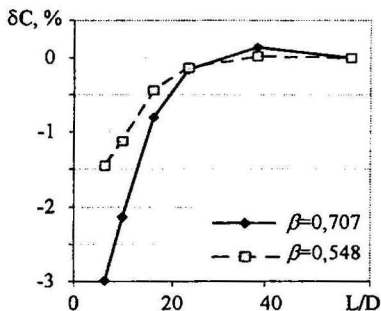


Рис. 11. Отклонение коэффициента истечения диафрагмы за диффузором  $\gamma_d=32^\circ$  при  $Re=3,66 \cdot 10^3$

длина зоны отрыва; при изменении геометрических параметров могут возникать отрывные зоны, существенно меняется профиль скорости, возникает поперечный градиент давления и т.д. Все эти причины оказывают влияние на формирование возмущений потока перед СУ. Наиболее сильно влияющим фактором является относительный диаметр диафрагмы,  $\beta$ . Зависимость  $\delta C=f(L/D)$  для  $\beta=0,707$  и  $\beta=0,548$  при наличии возмущений, создаваемых диффузором представлена на рис. 11.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

- присутствие диффузора создает возмущения существенно большей величины, по сравнению с конфузуром;
- влияние геометрических параметров в исследованном диапазоне изменения углов,  $\gamma_d=16^\circ$  и  $32^\circ$  и степени раскрытия диффузора  $d_1/D=0,5$  и  $7/15$  не

значительно и проявляется только на очень малых  $L/D$ ;

- отношение диаметров слабо влияет на отклонение коэффициента истечения от стандартного значения  $\delta C$ ;

- в конфузорах без скругления сопряжения с трубопроводом с увеличением угла сужения конфузора, влияние  $\gamma_c$  на метрологические характеристики усиливается; скругление может устранить эту зависимость.

- наиболее сильно влияющим на отклонение коэффициента истечения от стандартного значения является  $\beta$ ; влияние этого фактора тем сильнее, чем больше возмущение в потоке перед диафрагмой; при малых возмущениях влияние  $\beta$  становится малым;

- изменение геометрических параметров приводит не только к количественным, но и к качественным изменениям зависимости  $\delta C=f(L/D)$  и может доходить до 1% при  $L/D \approx 3$ .

В параграфе 4.3 проведен анализ обобщающих параметров для отклонения коэффициента истечения от стандартного значения. Получение обобщающей зависимости отклонения коэффициента истечения представляет большой интерес, так как позволяет свести влияние множества параметров к одному. Рассмотрены зависимости  $\delta C$  от  $\alpha$  и двух групп параметров – индексов заостренности  $s$ , и индексов замещения  $P_i$ .

Применение коэффициента Кориолиса, рассчитанного за МС при отсутствии диафрагмы в сечении, где она должна находиться, позволяет построить

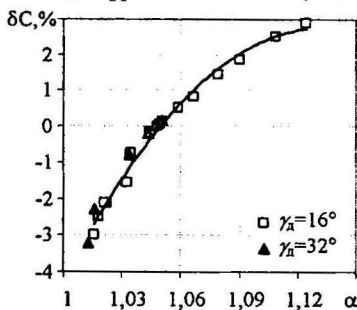


Рис. 12. Зависимость  $\delta C=f(\alpha)$  за диффузором;  $\beta=0,707$ ;  $Re=3,66 \cdot 10^5$

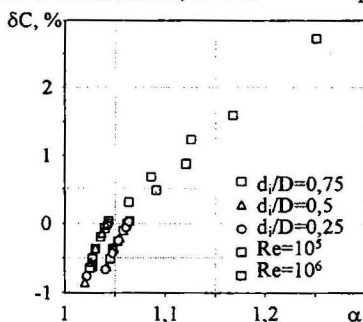


Рис. 13. Зависимость  $\delta C=f(\alpha)$  за внезапным расширением,  $d/D=0,75$

обобщенные зависимости  $\delta C=f(\alpha)$  для всех МС и различных геометрических параметрах МС. На рис.12 приведена зависимость  $\delta C=f(\alpha)$  для диафрагмы, установленной за диффузором, а на рис.13 за внезапным расширением. Для диффузоров, при одинаковых  $\beta$  и  $Re$ , независимо от угла раскрытия диффузора, все данные группируются около единственной линии с небольшим разбросом. На рис. 13 собраны данные, полученные для ВР с разными  $d/D$  и  $Re=10^5$  и  $10^6$ . Для каждого числа Рейнольдса значения  $\delta C$  группируются около одной кривой с небольшим разбросом. Также хорошо обобщаются данные по конфузороам. Несколько больший разброс получен у зависимости  $\delta C=f(\alpha)$  для ВС, однако он

также не превышает 0,1%.

Предложенные в ряде публикаций в качестве обобщающих параметров индексы заостренности  $P_1 = u_a(0)/u_{ам} - 1$ ,  $P_2 = (u_a(0)/u_{ам})^2 - 1$ ,  $P_3 = 1 - u_{ам}/u_a(0)$ ,  $P_4 = u_a(0)/u_a(0,475D)$  и параметры  $s_{51} = u_a(0,975D)/u_{ам}$ ,  $s_{52} = u_a(0,95D)/u_{ам}$ ,  $s_{53} = u_a(0,9D)/u_{ам}$  оказались непригодными для построения обобщающих зависимостей. На рис. 14 приведены зависимости  $\delta C$  от параметров  $s_{5i}$ . Эти параметры, во-первых, дают большую неоднозначность для одного значения  $d/D$ , а во-вторых, большой разброс данных для разных  $d/D$ .

Применение индексов замещения, вычисление которых производилось по формулам

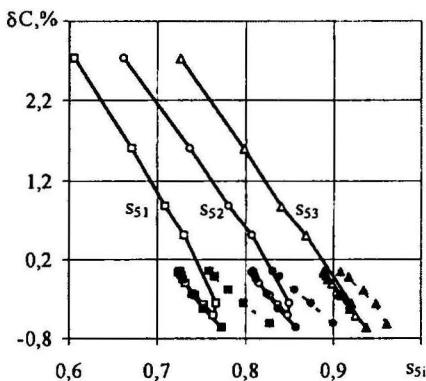


Рис. 14. Обобщение по параметрам  $s_{5i}$

$$P_5 = \frac{u_a(0) - \langle u_a \rangle_A}{\langle u_a \rangle_A}, \quad P_6 = \frac{(u_a(0))^2 - \langle u_a^2 \rangle_A}{\langle u_a^2 \rangle_A},$$

$$P_7 = \frac{(u_a(0))(u_a(0) - \langle u_a \rangle_A)}{\langle u_a^2 \rangle_A},$$

$\langle u_a \rangle_A$  – средняя по сечению осевая скорость, для построения обобщенных зависимостей, также оказалось неудачным. На рис. 15 приведена зависимость  $\delta C$  от  $P_6$ . Сложный нелинейный характер этой зависимости и большая неоднозначность не позволяют использовать ее для обобщения.

По результатам проведенного анализа следуют выводы:

1. Проведено сравнение различных обобщающих параметров, предложенных в литературе.

2. Из всех параметров только коэффициент Кориолиса пригоден для получения обобщенной зависимости отклонения коэффициента истечения от стандартного значения. Остальные параметры не позволяют получить однозначную зависимость.

3. Коэффициент Кориолиса позволяет получить обобщенные зависимости при разных геометрических параметрах

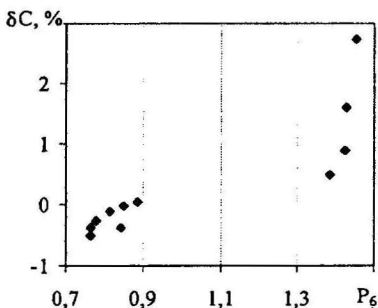


Рис. 15. Зависимость  $\delta C$  от параметра  $P_6$ ; ВР,  $d/D=0,8$ ;  $Re=10^5$ ;  $\beta=0,576$

для всех исследованных видов МС при одинаковых относительных диаметрах диафрагмы и числах Рейнольдса.

4. С использованием коэффициента Кориолиса в качестве обобщающего параметра получена универсальная зависимость  $\delta C = f(\alpha)$  для всех исследован-

ных видов МС.

В параграфе 4.4 Проведен анализ влияния числа Рейнольдса и относительного диаметра диафрагмы на  $\delta C$ . Обобщающий параметр  $\alpha$  справедлив только при одинаковых относительных диаметрах диафрагмы и одинаковых числах Рейнольдса. При разных числах Рейнольдса и относительных диаметрах диафрагмы зависимости, полученные в §4.3, перестают быть универсальными – появляется расслоение кривых по  $Re$  и  $\beta$ .

Относительный диаметр диафрагмы является параметром наиболее сильно влияющим на коэффициент расхода, среди прочих параметров, включенных в уравнение для расчета коэффициента истечения ГОСТ 8.586.2–2005. Многие исследователи, например Маттингли и Йех, Ридер-Харрис, Саттари и др. отмечают сильную зависимость  $\delta C$  от относительного диаметра диафрагмы. Ридер-Харрис, Саттари и др. для обобщения данных по исследованию влияния шероховатости на отклонение коэффициента истечения предлагают в качестве обобщающего параметра использовать зависимость  $C = Const \beta^{3,5}$ . Однако представляется более обоснованным применение параметра  $C = Const \beta^3$ , так как этот параметр может быть получен из уравнения для коэффициента истечения в предположении малости  $\delta C$ .

На рис.16 представлена зависимость  $\delta C/\beta^3$  от  $\alpha$ . Значения  $\delta C$ , полученные при разных относительных диаметрах диафрагмы, с небольшим разбросом ложатся на одну кривую. Коэффициент корреляции аппроксимирующей зависи-

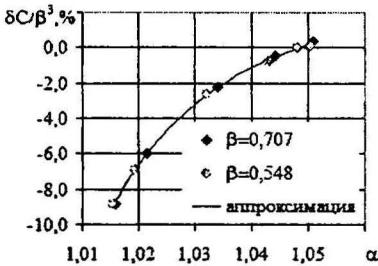


Рис.16. Обобщение по относительному диаметру диафрагмы; диффузор с  $\gamma_d=16^\circ$ ,  $Re=3,66 \cdot 10^3$ .

мости с рассчитанными данными составляет 0,999. Таким образом, параметр  $\delta C/\beta^3$  может быть применен для обобщения данных по относительному диаметру диафрагмы.

Другим параметром, оказывающим заметное влияние на коэффициент истечения диафрагмы, является число Рейнольдса. С изменением числа Рейнольдса изменяется состояние пограничного слоя. Увеличение  $Re$  приводит к уменьшению толщины пограничного слоя и условных толщин – толщины вытеснения,  $\delta^*$  и толщины потери импульса,  $\delta^{**}$ . Профиль скорости становится более наполненным, что требует увеличения перепада давления при одном и том же расходе, поэтому с ростом  $Re$  коэффициент истечения для стандартных условий уменьшается. Изменение стандартного значения коэффициента истечения приведет к изменению  $\delta C$  в зависимости от числа Рейнольдса, которая может отличаться от зависимости  $\delta C = f(\alpha)$ .

Влияние числа Рейнольдса на  $\delta C$  в зависимости от  $\alpha$  в течении за диффузором приведено на рис.17. Эти результаты получены для относительного диаметра диафрагмы  $\beta=0,707$  и изменения числа Рейнольдса от  $3,66 \cdot 10^4$  до  $3,66 \cdot 10^5$ .

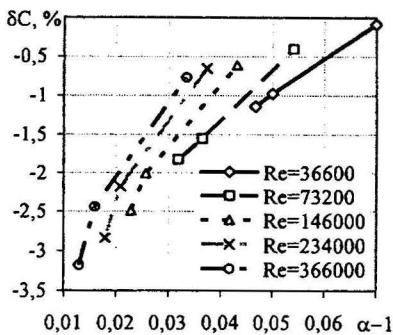


Рис. 17. Влияние  $Re$  на зависимость  $\delta C = f(\alpha)$ ;  $\gamma_a = 32^\circ$ ;  $\beta = 0,707$

Рейнольдса нужно отнести текущее значение коэффициента Кориолиса к невозмущенному значению коэффициента Кориолиса, определенному в зависимости от числа Рейнольдса. Полностью развитый профиль скорости трубного турбулентного течения может быть представлен в виде степенного профиля, с показателем степени, зависящим от числа Рейнольдса  $u/u_a = (1-r/R)^{1/n}$ , где  $u_a$  – максимальная скорость (скорость на оси трубы),  $R$  – радиус трубы. В этой формуле показатель степени  $n$  является функцией числа Рейнольдса. Для степенного профиля легко вычислить коэффициент Кориолиса

$$\alpha_0 = 2 \left( \frac{u_a}{u_m} \right)^3 \int_0^1 \left( \frac{u}{u_a} \right)^3 dS = \frac{n^2 (2n+1)^3 (n+1)^3}{n^6 (2n+3)(n+3)}.$$

Используя экспериментальные данные (см., например, Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя) найдем зависимость  $n(Re)$  и рассчитаем  $\alpha_0(Re)$ .

Для получения обобщающего параметра по числу Рейнольдса будем использовать параметр  $\phi = \alpha / \alpha_0(Re)$ , где,

$\alpha_0(Re)$  – коэффициент Кориолиса, рассчитанный для профиля скорости развитого турбулентного течения, в зависимости от числа Рейнольдса.

На рис.18 приведены значения  $\delta C$ , вызванные возмущениями за диффузором,  $d/D=7/15$ , рассчитанные при разных числах Рейнольдса,  $\beta=0,707$  в зависимости от  $\phi$ . Как следует из рис.18 все рассчитанные данные группируются около одной линии с небольшим разбросом. Коэффициент корреляции аппроксимирующей зависимости с рассчитанными данными со-

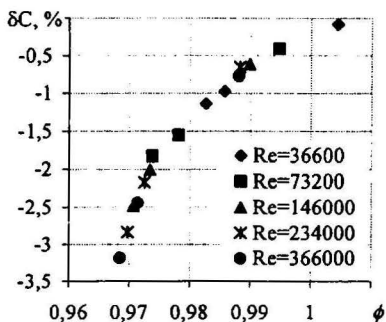


Рис. 18. Зависимость  $\delta C$  от  $\phi$ , диффузор  $d/D=7/15$ ,  $\beta=0,707$

Вариации  $\delta C$ , вызванные изменением числа Рейнольдса в этом случае достаточно велики, достигают 0,5%. Следовательно, коэффициент Кориолиса не позволяет построить универсальную зависимость при изменении числа Рейнольдса.

Зависимость коэффициента истечения от числа Рейнольдса в стандартных условиях следует из уравнения для коэффициента истечения. Физический механизм этой зависимости заключается в изменении профиля с изменением числа Рейнольдса. Отсюда следует, что для устранения расслоения по числу

ставляет 0,997. Следовательно, параметр  $\phi$  может быть использован для построения универсальной зависимости.

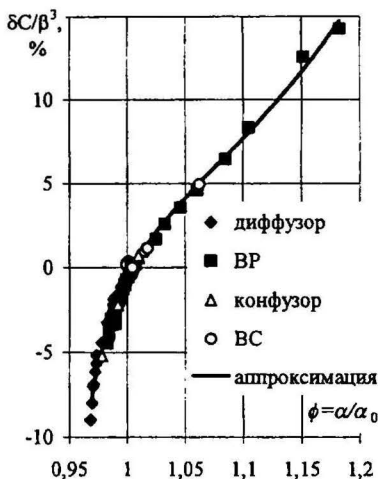


Рис. 19. Зависимость  $\delta C/\beta^3$  от  $\phi$  для всех исследованных МС

Представление данных в виде  $\delta C/\beta^3=f(\phi)$  позволяет получить универсальную зависимость для нескольких видов МС при различных  $\beta$  и числах Рейнольдса. Как видно из рис.19 все полученные значения  $\delta C/\beta^3$  группируются около одной кривой с небольшим разбросом. Коэффициент корреляции аппроксимирующей зависимости с рассчитанными данными составляет 0,996.

Таким образом, зависимость  $\delta C/\beta^3=f(\phi)$  является универсальной для определения отклонения коэффициента истечения диафрагмы от стандартного значения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Построена и реализована в среде Fluent 6.3 математическая модель течения в стандартной диафрагме при наличии установленных на входе местных сопротивлений. Наилучшее согласование с экспериментальными данными обеспечивает применение  $k-\epsilon$  модели турбулентности на основе ренормализации групп с двухслойной пристеночной моделью и улучшенной функцией стенки.

2. Проведено исследование влияния осесимметричных местных сопротивлений на отклонение коэффициента истечения диафрагмы от стандартного значения в диапазоне изменения: относительного диаметра диафрагмы  $\beta$  от 0,548 до 0,707; числа Рейнольдса от  $3,66 \cdot 10^4$  до  $3,66 \cdot 10^6$ .

3. Установлены закономерности влияния возмущений, создаваемых местными сопротивлениями, на параметры потока в окрестности сужающего устройства в зависимости от геометрических параметров и числа Рейнольдса.

4. Установлено, что отклонение коэффициента истечения для всех исследованных местных сопротивлений при одинаковых относительных диаметрах диафрагмы и одинаковых числах Рейнольдса обобщается одной зависимостью  $\delta C=f(\alpha)$ . Для устранения влияния относительного диаметра диафрагмы  $\beta$  на зависимость  $\delta C=f(\alpha)$  необходимо применять параметр  $\delta C/\beta^3$ . Для устранения влияния числа Рейнольдса на зависимость  $\delta C=f(\alpha)$  необходимо использовать отношение коэффициента Кориолиса к его теоретическому значению, рассчитанное

танного для степенного профиля в зависимости от числа Рейнольдса,  $\phi = \alpha / \alpha_0(\text{Re})$ . Зависимость  $\delta C / \beta^3 = f(\phi)$  является универсальной для исследованных видов местных сопротивлений при различных  $\beta$  и числах Рейнольдса.

5. Полученные в работе результаты позволяют свести влияние геометрических параметров местных сопротивлений и сужающего устройства, числа Рейнольдса к универсальной зависимости и обоснованно выбирать длину входного участка перед диафрагмой либо определять дополнительную погрешность измерений при нестандартных условиях монтажа.

6. Результаты работы могут быть использованы для других методов измерения расхода: по скорости в одной точке трубы, с применением осредняющих напорных трубок; а также при разработке нормативных документов.

### **Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:**

1. Николаев Н.А. Применение численных методов расчета для определения метрологических характеристик расходомерных устройств / В.А. Фафурин, М.Р. Хабибуллин, Н.А. Николаев, Р.И. Ганиев // Изв. Вузов. «Авиационная техника», 2006. – №2. – С. 62-64.

2. Николаев Н.А. Выбор сетки и модели турбулентности для расчета коэффициента расхода стандартной диафрагмы / Р.И. Ганиев, Н.А. Николаев, А.Н. Сабирзянов, В.А. Фафурин, В.Б. Явкин // Изв. Вузов. «Авиационная техника», 2008. – №4. – С. 21-24.

3. Николаев Н.А. Обеспечение норм точности при измерениях расхода и объема энергетических и сырьевых ресурсов / В.А. Фафурин, И.А. Яценко, Н.А. Николаев, Р.И. Ганиев // «Законодательная и прикладная метрология», 2008. – №2. – С. 26-42.

4. Николаев Н.А. Влияние местных сопротивлений на коэффициент истечения стандартной диафрагмы / Н.А. Николаев, А.Н. Сабирзянов, Р.А. Тырышкин, В.А. Фафурин, В.Б. Явкин // «Законодательная и прикладная метрология», 2010. – №2. – С. 20-23.

5. Николаев Н.А. Применение стандартных сужающих устройств для измерений расхода и количества жидкостей и газов в трубах диаметром более 1 метра / В.А. Фафурин, Р.И. Ганиев, Н.А. Николаев, В.В. Фефелов, Р.А. Тырышкин // «Законодательная и прикладная метрология», 2009. – №2. – С. 39-40.

6. Николаев Н.А. Исследование течения в сужающих устройствах с помощью методов математического моделирования / В.А. Фафурин, М.Р. Хабибуллин, Н.А. Николаев, Р.И. Ганиев // Сборник трудов XIX Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях», Т.3, Секция 3: под общей редакцией В.С. Балакирева. – Воронеж, Воронежская государственная техническая академия, 2006 г. – С. 61-64.

7. Николаев Н.А. Математическое моделирование метрологических характеристик термально-массовых расходомеров / В.А. Фафурин, Н.А. Николаев, Р.И. Ганиев // Сборник трудов XX Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях», Т.7, Секция 9,13: под общей редакцией В.С. Балакирева. – Ярославль, Ярославский государственный технический университет, 2007 г. – С. 35-38.

8. Николаев Н.А. Современное состояние метрологического обеспечения измерений расхода и объема энергетических и сырьевых ресурсов / В.А. Фафурин, И.А. Яценко, Н.А. Николаев, Р.И. Ганиев // Труды 26-й международной научно-практической конференции: «Коммерческий учет энергоносителей»: под редакцией Д.Л. Анисимова – Санкт-Петербург, 2007 г. – С. 18-27

9. Николаев Н.А. Современное состояние метрологического обеспечения измерений расхода и количества энергетических и сырьевых ресурсов / В.А. Фафурин, И.А. Яценко, Н.А. Николаев, Р.И. Ганиев // Сборник трудов VIII международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение», часть 1, Казань, 2007 г. – С. 261-269.

10. Николаев Н.А. Математическое моделирование расходомеров переменного перепада давления / Р.И. Ганиев, Н.А. Николаев, А.Н. Сабирзянов, В.А. Фафурин // Сборник трудов XXI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях», Т.5, Секция 11: под общей редакцией В.С. Балакирева. – Саратов: Саратов. гос. тех. ун-т, 2008 г. – С.230-233.

11. Nikolayev N.A. Choosing the turbulence model during the analysis of metrological characteristics of flow meters with standard orifice / R.I. Ganiev, N.A. Nikolayev, A.N. Sabirzyanov, V.A. Fafurin, V.B. Yavkin, I.A. Yatsenko // International Conference on the Methods of Aerophysical Research: Abstr. Pt I: Ed. V.M. Fomin. – Novosibirsk: Parallel, 2008. – p.47-48.

12. Николаев Н.А. Расчет метрологических характеристик расходомеров со стандартной диафрагмой / Р.И. Ганиев, Н.А. Николаев, А.Н. Сабирзянов, В.А. Фафурин, В.Б. Явкин, И.А. Яценко // Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: материалы докладов, VI Школа-семинар молодых ученых и специалистов академika РАН В.Е. Алемасова, 16-18 сентября 2008. – Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2008г. – С. 97-100.

13. Николаев Н.А. Влияние местных сопротивлений на структуру потока в окрестности диафрагмы / Н.А. Николаев, Р.А. Тырьшкин, А.В. Фафурин, А.Н. Сабирзянов, В.Б. Явкин // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2009»: материалы V Всероссийской научно-технической конференции. Т. 1. 12 – 13 октября 2009. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. – С. 315–320.

Соискатель



Н.А. Николаев

*Отпечатано в ООО «Печатный двор».  
г. Казань, ул. Журналистов, 1/16, оф.207  
Тел: 272-74-59, 541-76-41, 541-76-51.  
Лицензия ИД №7-0215 от 01.11.2001 г.  
Выдана Поволжским межрегиональным  
территориальным управлением МПТР РФ.  
Подписано в печать 23.09.2011 г. Печл.1.2  
Заказ № К-7062. Тираж 100 экз. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать - ризография.*