

**Капустин Сергей Александрович**

Sergei Kapustin

Московский Государственный Строительный Университет

Moscow State University of Civil Engineering

Инженер / Engineer

E-Mail: ks\_aleksvl@mail.ru

**Орехов Генрих Васильевич**

Orehov Genrih V.

Московский Государственный Строительный Университет

Moscow State University of Civil Engineering

заведующий кафедрой гидроэнергетики и использования водных ресурсов

К.т.н., доцент

E-Mail: orehov\_genrih@mail.ru

**Чурин Павел Сергеевич**

Churin Pavel

Московский Государственный Строительный Университет

Moscow State University of Civil Engineering

Инженер/Engineer

E-Mail: pashok\_@inbox.ru

Гидродинамика, гидравлика

## **Экспериментальные модельные исследования контрвихревых течений**

### The experimental model studies counter vortex currents

**Аннотация:** Представлены результаты работ, выполненных в научно-производственной лаборатории аэродинамических и акустических испытаний строительных конструкций ФГБОУ ВПО «МГСУ». Описан экспериментальный стенд для физических исследований воздушных течений. Приведены основные параметры установки, принцип действия регистрирующей аппаратуры и ее основные характеристики. Приведены результаты модельных исследований сложного контрвихревого двуслойного и многослойного течений в цилиндрической трубе. Дан анализ характеристик потока по длине камеры смешения.

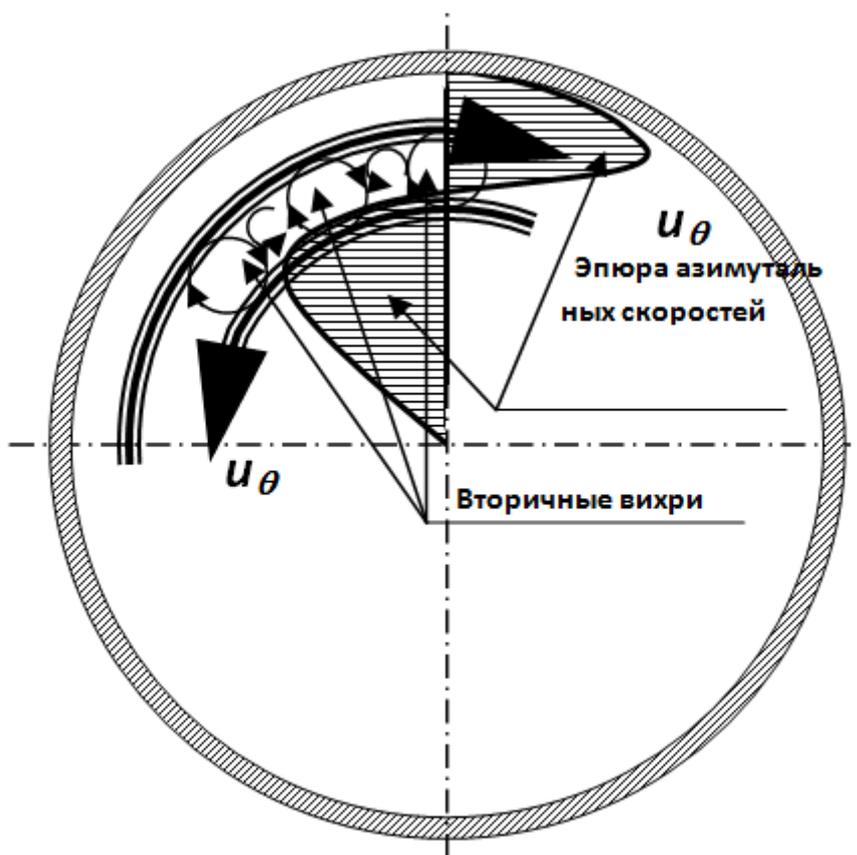
**The Abstract:** Presents the results of work carried out in the scientific and industrial laboratory of aerodynamic and acoustic testing of building structures “MGSU”. Describes an experimental stand for physical studies of air currents. Shows the main parameters the installation, operation principle recording equipment and its main characteristics. Shows the results model studies of complex counter vortex bilayer and multilayer flow in a cylindrical tube. An analysis of characteristics of the flow along the length of the mixing chamber.

**Ключевые слова:** Модельный испытательный стенд, лазерная измерительная техника, скоростная видеокамера, обработка экспериментальных данных, течения, скорость потока, турбулентность, эпюры скоростей.

**Keywords:** Model test stand, laser measuring equipment, high-speed video camera, processing of the experimental data, flow, flow velocity, turbulence, the velocity profile.

Статья посвящена исследованию так называемого контрвихревого течения – одного из сложнейших пространственных неравномерных течений жидкости и газа. Контрвихревым будем называть течение, формирующееся при взаимодействии двух или более спутных коаксиальных циркуляционно-продольных потоков, закрученных во взаимно противоположных направлениях.

При контрвихревом взаимодействии потоков в сдвиговом слое на их границе создается высокий радиальный градиент меридиональных (окружных, тангенциальных) скоростей  $\partial u_{\theta} / \partial r$ . Здесь  $u_{\theta}$  - меридиональная (окружная) компонента скорости потока,  $r$  - радиус цилиндрической камеры смешения двух или более противоположно закрученных потоков, которые формируют контрвихревое течение. Это приводит к появлению вторичных вихрей, которые, в свою очередь, генерируют вихри следующего порядка малости и т.д., вплоть до вихрей вязкого масштаба (рис.1). Процесс передачи энергии к меньшим масштабам, называемый «вихревым энергетическим каскадом», в результате позволяет получить движущуюся среду с высокой степенью турбулентности, в которой массо- и энергообмен многократно интенсифицируются. Характер и интенсивность гидро- и аэродинамических процессов, происходящих в контрвихревых устройствах, обеспечивают эффективность их применения в самых разных отраслях современной техники в целях перемешивания однофазных и многофазных сред, гашения избыточной механической энергии потока жидкости или газа, дезинтеграции конгломератов, создания гомогенных сред, возбуждения механических колебаний и получения других технологических эффектов

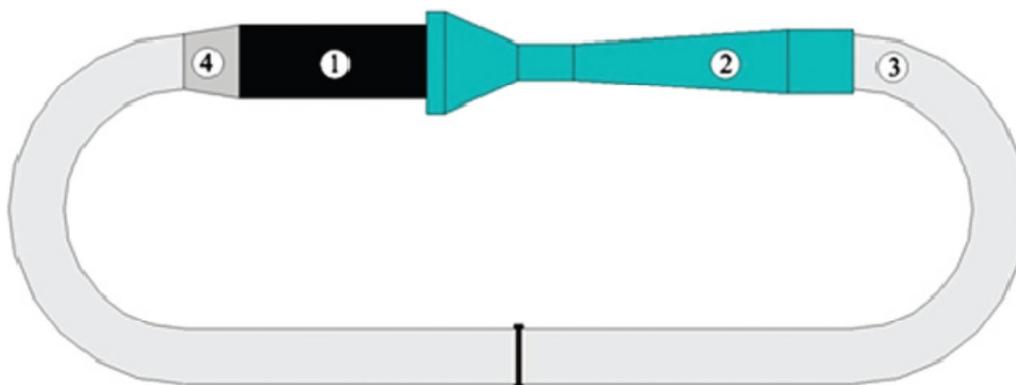


**Рис. 1.** Схема контрвихревого двуслойного течения в трубе (поперечный разрез)

В настоящее время математическое моделирование стало одним из мощных инструментов исследования пространственных течений. Однако, для получения достоверных данных, расчеты должны быть проверены, в частности, с помощью физического

моделирования с использованием современных методов визуализации потока на специальных исследовательских динамических стендах. Такая ситуация характерна для многих задач гидро- и аэродинамики, особенно в отношении сложных течений. С этой целью в МГСУ создан экспериментальный стенд для исследований (физическое моделирование) различных воздушных течений. Назначение стенда - получение различных характеристик пространственных течений на исследуемых моделях.

Схема стенда (рис. 2) включает исследуемую модель 1, аэродинамическую установку с вентилятором переменной частоты вращения 2, обратный канал 3, а также коллектор конфузурного типа 4. Длина стенда—11м, ширина—4м, высота—2,5м.



*Рис. 2. Экспериментальный стенд*

Проточная часть экспериментального стенда замкнута гибким обратным каналом (рис. 3). Его использование обусловлено необходимостью формирования равномерного засева потока отражающими частицами (трассерами) при проведении измерений и снижения расхода дорогостоящего материала трассеров.

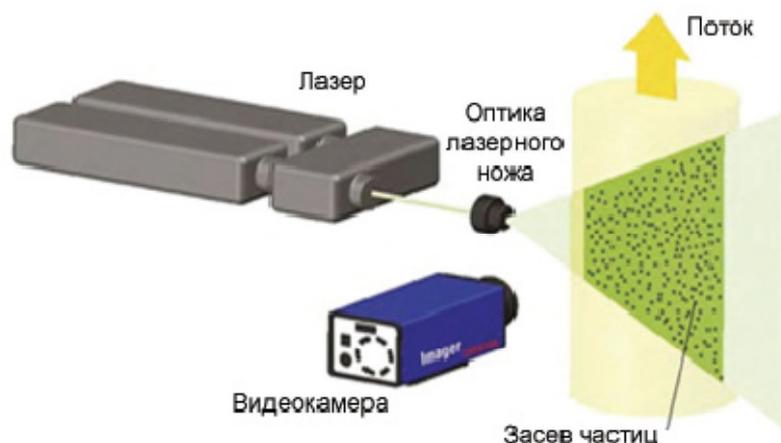


*Рис. 3. Общий вид стенда. Обратный канал*

Измерительный стенд оснащен современной измерительной и регистрирующей аппаратурой. В основе работы измерительного комплекса лежат метод лазерной трассерной визуализации потока (PIV-метод) и метод лазерного доплеровского измерения скорости потока. Комплекс позволяет получать 2-х и 3-х мерные поля скоростей ламинарных и турбулентных потоков газов и жидкостей.

Принцип действия PIV системы основан на использовании излучения видимой части спектра для импульсной подсветки выбранного сечения потока жидкости или газа с возможностью наблюдения и корреляционной обработки света, рассеянного специальными частицами (трассерами), специально вводимыми в поток в определенной концентрации, и движущимися вместе с ним. Поток подсвечивается сформированным лазерным пучком, исходящим из высокоскоростного импульсного лазера с двумя однотипными излучателями. Изображения упомянутых трассерных частиц в освещенном лазером объеме записываются высокоскоростными цифровыми матричными видеокамерами. По смещению изображений на последующем кадре по отношению к предыдущему и известному временному интервалу между этими кадрами (частота лазерных импульсов) для каждой из видеокамер путем компьютерной кросскорреляционной обработки вычисляется скорость потока в исследуемых сечениях. Принципиальная схема работы комплекса приведена

на рис. 4. PIV система не является сертифицированным измерительным комплексом, а представляет собой прибор для получения общей картины различных течений.



**Рис. 4.** Принципиальная схема работы измерительного комплекса лазерной трассерной визуализации

Принцип действия LDA в статье не приводится, так как этот метод бесконтактного определения скорости потока жидкости или газа, созданный в 1960-х годах, широко известен и с ним можно ознакомиться в специальной литературе [4,5,6,10,11]. Использование лазерного доплеровского анемометра (LDA) в настоящей работе связано с контрольной проверкой значений скорости потока (в нескольких характерных точках поперечного сечения). Тем самым осуществлялась верификация результатов, получаемых PIV системой. Надо отметить, что погрешность в показаниях PIV (по отношению к LDA) в опытах на ламинарном потоке составила менее одного процента, при экспериментах с развитым турбулентным течением погрешность доходила до 2,5 процента.

Для корректного определения смещения частиц (трассеров) в потоке предварительно поле зрения каждой из видеокамер калибруются с помощью специальной калибровочной пластины. Перед испытаниями калибровочная пластина помещается в рассматриваемую область, тем самым осуществляется переход от оптических размеров, получаемых камерами, к реальным. Данный переход программа, управляющая измерительным комплексом,

осуществляет автоматически. На рис.5 показаны скоростные камеры, установленные для проведения испытаний.



*Рис.5. Высокоскоростные матричные фотокамеры*

При исследовании течений с помощью PIV системы важным является качественный засев исследуемого потока трассерами. Геометрические размеры частиц, их физические свойства, а также правильная концентрация в исследуемой области потока являются необходимыми условиями эффективной работы всей системы. Специальные частицы, предварительно помещаемые в поток жидкости или газа, являются датчиками скорости. Частицы должны быть достаточно малы для того, чтобы без искажений следовать линиям тока исследуемого течения. С другой стороны, частицы должны быть достаточно велики для того, чтобы отражать свет в количестве, необходимом для его регистрации цифровой камерой. В идеальном случае частицы должны иметь нейтральную плавучесть, т.е. иметь плотность, равную плотности жидкости или газа, из которого состоит исследуемый поток. Размеры частиц в экспериментах с использованием PIV комплексов могут варьироваться от 100 до 50000 нм. Такие размеры сравнимы с длиной волны лазерного излучения (532 нм) и, следовательно, подчиняться условиям рассеяния Мие. В проводимых опытах использовалась специальная жидкость (синтетическое масло), которая имеет химическую формулу C<sub>26</sub>H<sub>50</sub>O<sub>4</sub>. Установка, включающая компрессор и насадки, распыляет жидкость до размера частиц, равных примерно 1000 нм. Важной характеристикой трассерных частиц является значение их гидравлической крупности, т.е. скорости, с которой частица под действием гравитации движется вниз. Данный параметр особенно важен при исследовании течений с малыми скоростями.

Предварительную оценку гидравлической крупности трассерных частиц можно дать, используя формулу [8]

$$\omega = gd^2 \frac{\rho_c - 1}{18\nu},$$

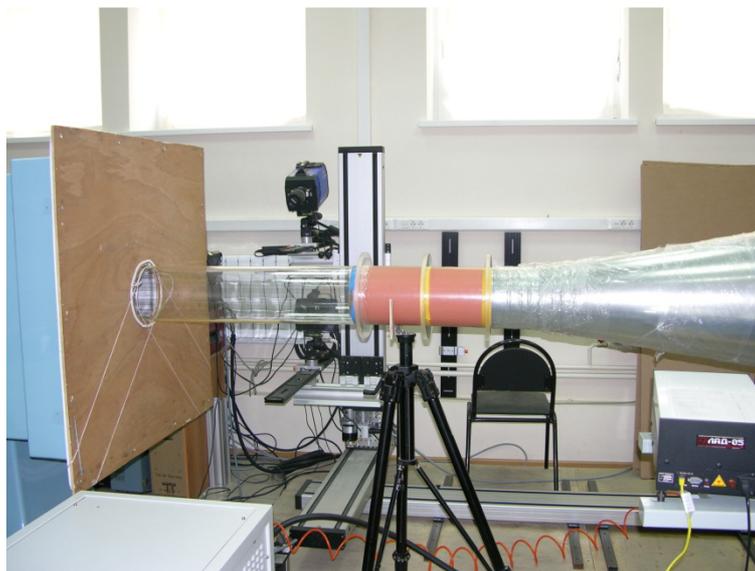
где:  $\omega$  - гидравлическая крупность в м/с,  $d$  – диаметр трассерной частицы,  $\rho_c$  - плотность частицы,  $\rho$  - плотность среды, в которой перемещается частица,  $\nu$  - кинематическая вязкость среды, в которой перемещается частица.

Данная формула справедлива для условий равномерного движения (падения) частицы и числа Рейнольдса  $Re < 1$ . Методические опыты по определению точного значения гидравлической крупности трассерных частиц продолжаются, но уже сейчас можно

предварительно сказать, что примерная скорость оседания равна 10-0,75 см/ч. в диапазоне диаметров частиц от 100 до 5000 нм. Практически это туман, который не рассеивается в измерительном объеме при нулевой скорости потока воздуха часами. Применительно к условиям задачи, обсуждаемой в данной статье, т.е. исследовании закрученных потоков с очень высокой степенью турбулентности, знание поведения трассерных частиц в измеряемой среде весьма важно. Размеры частиц маленькие, нанометрового и микрометрового диапазона, плавучесть их очень близка к измеряемой среде. Масса частиц колеблется в микрограммовом диапазоне. Тем не менее, на частицу действуют значительные инерционные силы и знакопеременные ускорения, которые могут уводить частицу от фактических линий тока, искажая результат измерения. В настоящее время ведутся сравнительные расчеты, позволяющие дать оценку погрешности измерения при различных скоростях измеряемого потока воздуха и значений интенсивности турбулентности.

Механическая система (координатник) позволяет перемещать высокоскоростные камеры и плоскость лазерного ножа одновременно по трем координатам. Скорость перемещения регулируется от 0 до 18 см/мин, при точности 0,1 мм. Длина рабочего перемещения по  $X$  составляет 2,6 м; по  $Y$  и  $Z$  — 1 м. Каждый модуль оснащен системой контроля местоположения. Синхронизация работы координатника с компьютером осуществляется через отдельный блок управления. Фрагменты координатника видны на фото рис.5.

Для получения контрвихревого течения в цилиндрической трубе были использованы модели локальных лопаточных завихрителей осевого типа. Место расположения моделей завихрителей показано на рис. 6. В качестве камеры смешения коаксиальных противоположно закрученных потоков, формируемых локальным завихрителем, использовалась оргстеклянная оптически прозрачная труба наружным диаметром 200 мм и толщиной стенки 4мм.



*Рис.6. Модельная зона и область исследования течения*

На первом этапе работы лазерная подсветка осуществлялась перпендикулярно потоку (или продольной оси трубы). Однако пробные измерения показали, что такое пространственное расположение лазерного ножа является не очень удачным. Обнаружились сильные засветки, которые не позволяли делать качественные измерения. Это связано с наличием отражающих поверхностей стенок трубы, имеющих кривизну, равную радиусу трубы. Попытка направить лазерный нож под острым углом к оси потока с целью избавиться от паразитных засветок положительного результата не дала. Поиски оптимального

пространственного положения лазерного луча по отношению к фиксирующим скоростным фотокамерам привели к тому, что лазерный нож был расположен вдоль потока (навстречу ему). При этом лазерный нож располагался точно по оси трубы в вертикальной плоскости. Пространственное расположение двух камер при таком положении ножа видно на рис. 6, их оптические оси расположены перпендикулярно потоку. На рис. 7 показан лазерный излучатель, направляющий луч перпендикулярно потоку, а на выходе из трубы, в которой исследовался поток, было установлено зеркало под углом 45 градусов к потоку, которое отклоняло лазерный нож и направляло его в исследуемую область течения точно по оси трубы. Такое расположение лазерной подсветки резко улучшило качество получаемой информации.



*Рис. 7. Расположение лазерного излучателя по отношению к потоку*

Для исследований были изготовлены модели локальных лопаточных завихрителей осевого типа (рис.8). Внешний диаметр всех моделей одинаковый и составляет 200мм (равный диаметру оргстеклянной трубы).



*Рис. 8. Лопаточные локальные завихрители осевого типа*

Первая модель двухслойная -лопатки периферийного ряда закручивают часть набегающего потока(слоя) по часовой стрелке, лопатки внутреннего ряда оставшуюся часть набегающего потока против часовой. При этом, за локальным завихрителем, в камере смешения начинают взаимодействовать два противоположно закрученных коаксиально

расположенных потока. Вторая модель - четырехслойная. Здесь формируется четыре коаксиально расположенные и попарно закрученные в противоположные стороны потока (слоя). Третья модель - шестислойная, имеет шесть рядов лопаточных решеток. Здесь также имеем коаксиально расположенные и попарно закрученные в противоположные стороны шесть потоков (слоев). Модели выполнены из пластика на 3-D принтере.

До настоящего времени целым рядом авторов исследовались потоки, создаваемые локальными завихрителями различных типов (тангенциальными бескамерными, тангенциальными со спиральной камерой, тангенциальными с цилиндрической камерой, лопастными радиальными), которые формировали в активной зоне взаимодействия только двухслойные течения [2]. В этом отношении приведенные в настоящей статье данные являются новыми, расширяющими круг исследований, связанных с изучением контрвихревых течений, в частности многослойных. Основным принципом, положенным в основу создания локальных завихрителей - равенство моментов количества движения (по отношению к оси трубы) продольно-циркуляционных потоков (слоев), вращающихся в противоположные стороны.

Для того, чтобы на выходе из активной зоны (камеры смещения), контрвихревое течение не имело остаточной закрутки, на входе в активную зону оно должно быть задано определенным образом. Таким, при котором на выходе из локальных завихрителей взаимодействующие коаксиальные противоположно закрученные потоки (слои) имели бы моменты количества движения, взаимно компенсирующие друг друга. То есть суммарный момент количества движения потоков (или слоев) одного направления вращения необходимо компенсировать равным ему суммарным моментом противоположного вращения.

Тогда, полагая, что направление вращения определяется знаком момента, можно записать равенство

$$\sum_{i=1}^n M_i = 0,$$

где  $n$ -число взаимодействующих потоков (слоев).

Таким образом, при двухслойном контрвихревом течении должно соблюдаться равенство  $M_1 = M_2$ , при четырехслойном  $M_1 + M_3 = M_2 + M_4$ , при шестислойном  $M_1 + M_3 + M_5 = M_2 + M_4 + M_6$ . Момент количества движения с индексом «1» соответствует продольно-циркуляционному потоку, формируемому периферийной решеткой лопаток, сопряженной со стенкой трубы. Соответственно момент количества движения с индексом «6» соответствует продольно-циркуляционному потоку, формируемому самой внутренней решеткой лопаток, сопряженной с центральным телом вращения. Остальные индексы занимают промежуточное положение между «1» и «6».

Момент количества движения циркуляционно-продольного течения равен

$$M = 2AIR_r = 2A\rho QVR_r,$$

где:  $A$ -безразмерная геометрическая характеристика локального завихрителя,  $\rho$  - плотность среды,  $Q$ -расход,  $V$  -средняя расходная скорость,  $R_r$ -гидравлический радиус,  $I$ - количество движения циркуляционно-продольного течения.

В моделях использованы лопаточные решетки с постоянным углом установки по радиусу. При неизменном по радиусу угле установки лопаток  $\beta_d$  геометрический параметр закрутки характеризуется выражением

$$A = \frac{\pi R_1 R_0}{\Omega} \sin \beta_{\text{л}},$$

где,  $R_1$  - внешний диаметр лопаточной решетки (точка крепления лопатки к внутренней стенке трубы или внутренней поверхности промежуточного разделительного обода),  $R_0$  - эффективный радиус,  $\Omega$  - площадь водопропускного сечения между лопастями, нормальная к вектору скорости сходящего с них потока,  $\beta_{\text{л}}$  - угол установки лопаток рассматриваемого лопаточного венца, т.е. угол между скелетной линией лопатки и осевой линией лопаточного завихрителя ( в нашем случае осевая линия лопаточного завихрителя совпадает с осевой линией всего проточного тракта в виде трубы)

Эффективный радиус  $R_0$  и площадь  $\Omega$  вычисляют по формулам

$$R_0 = \sqrt{\frac{R_1^2 + R_2^2}{2}},$$

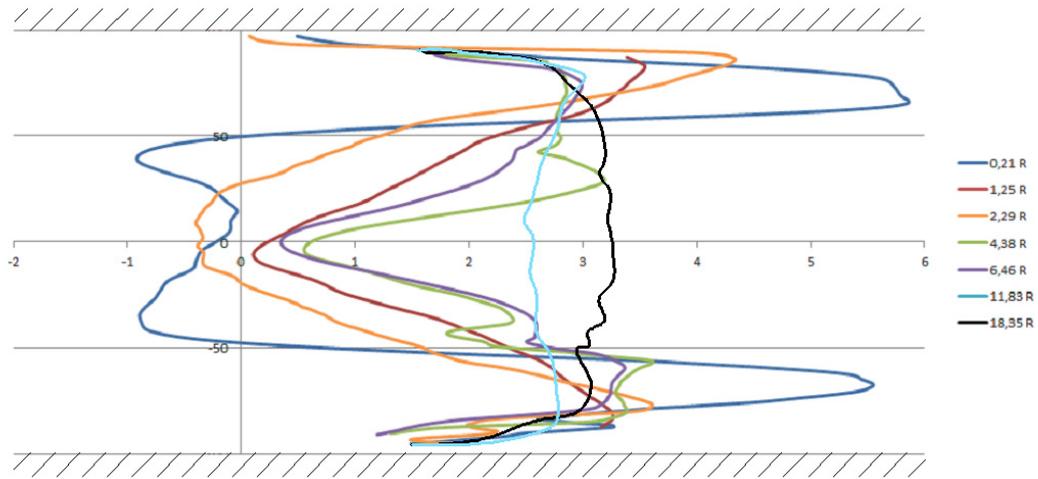
$$\Omega = \int_{R_2}^{R_1} 2\pi r \cos \beta_{\text{л}} dr = \pi(R_1^2 - R_2^2) \cos \beta_{\text{л}}.$$

Результаты исследований контрвихревых течений, сформированных различными завихрителями показаны в виде экспериментальных распределений скоростей потока в поперечных сечениях зоны взаимодействия коаксиальных потоков (слоев). В общем случае циркуляционное движение жидкости характеризуется наряду с азимутальными (окружными, тангенциальными)  $u_{\theta}$  также аксиальными (продольными, осевыми)  $u_x$  и радиальными  $u_r$  скоростями. В цилиндрической системе координат  $(r - \theta - x)$  с осью  $x$ , направленной вдоль трубы, полная скорость элементарной частицы жидкости в произвольной точке циркуляционно-продольного течения равна

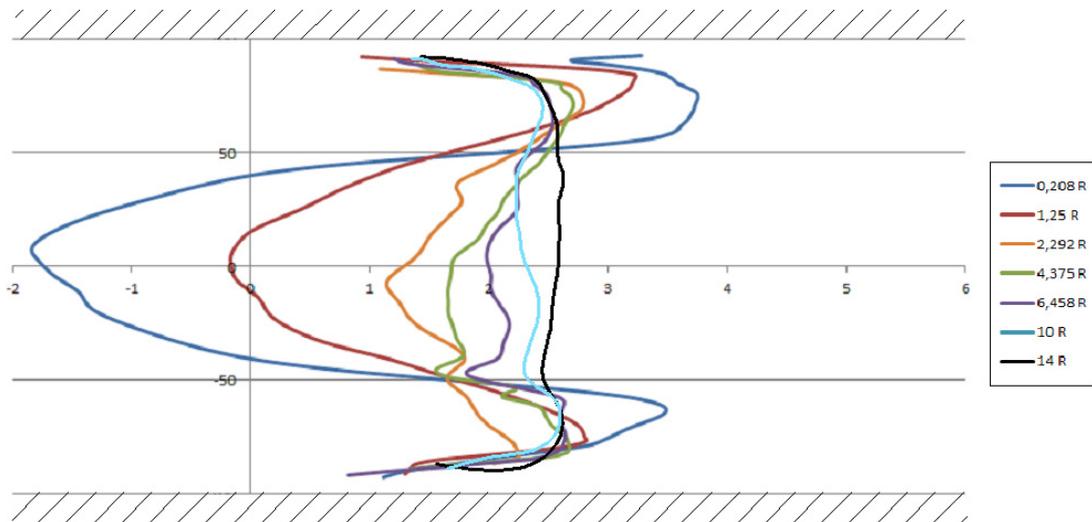
$$U = \sqrt{u_r^2 + u_{\theta}^2 + u_x^2}$$

На рис.9, 10 и 11 показаны эпюры продольных скоростей  $u_x$  для двух-, четырех- и шестислойного контрвихревых течений. Профили аксиальных скоростей приведены в створах, расположенных на расстоянии от 0,208 до 18 радиусов от начала активной зоны взаимодействия коаксиальных потоков.

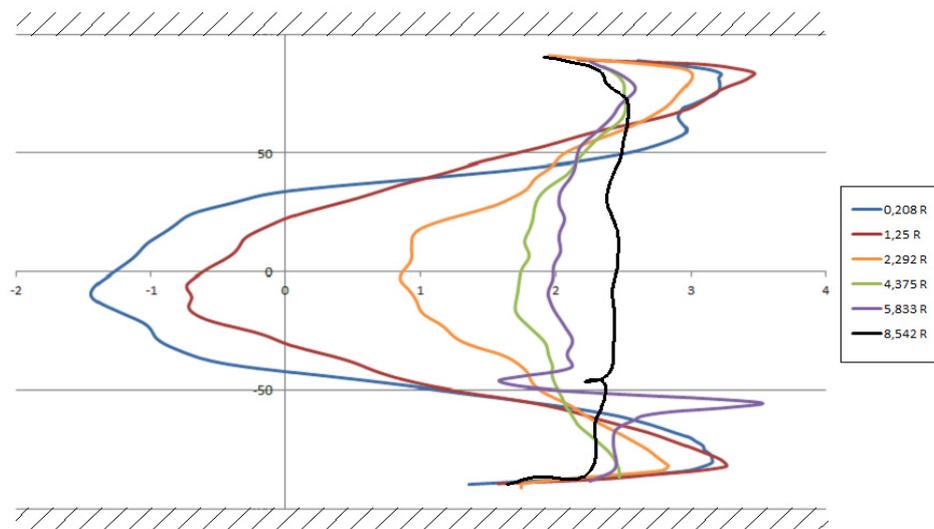
Видно, что в сечениях, близких к началу активной зоны, в приосевых слоях наблюдается возвратное течение со значительными отрицательными скоростями. Эта картина имеет место для всех трех систем завихрителей. Наиболее отчетливо эта зона проявляется для двуслойного течения (рис.9). Надо отметить, что периферийные скорости для двух ближайших к закручивающему устройству створов значительно превышают значение средней расходной скорости  $V$ , равной  $V = Q / F$ , где,  $Q$ -расход воздуха,  $F$ - площадь сечения камеры смешения. В проведенных опытах она составляет 2,85 м/с.



**Рис. 9.** Профили аксиальных скоростей  $u_x$ , двуслойное течение



**Рис. 10.** Профили аксиальных скоростей  $u_x$ , четырехслойное течение



**Рис. 11.** Профили аксиальных скоростей  $u_x$ , шестислойное течение

За пределами возвратного приосевого течения в толще потока продольные скорости существенно выше средней, чем поддерживается баланс объемного расхода. Возвратное приосевое течение при контрвихревом взаимодействии двух коаксиальных слоев существует на участке длиной до 4 радиусов длины активной зоны взаимодействия (камеры смешения), а увеличение числа коаксиальных противоположно закрученных слоев (с 2-х до 6-х) несколько сокращает длину участка с возвратным течением. Сравнение вида экспериментальных эпюр с эпюрами, полученными расчетным путем (аналитический метод) говорит о том, что они по своему характеру совпадают [2], не смотря на то, что расчетные эпюры получены для ламинарного режима движения потока.

Увеличение числа взаимодействующих слоев приводит к более быстрому завершению процесса взаимодействия, после которого общий поток выходит на режим обычного продольно-осевого турбулентного течения (число Рейнольдса  $R_e = 6,9 \times 10^5$ , рассчитанное по диаметру камеры смешения) с распределением скоростей по логарифмическому закону. Выход на такой режим при двуслойном контрвихревом течении происходит на длине около  $18R$ , при четырехслойном -  $13R$ , при шестислойном -  $(8-9)R$ .

В механизмах смешения спутных коаксиальных противоположно закрученных потоков и затопленных струй с поперечным сдвигом скоростей ( $\Delta V = V_1 - V_2$ ) имеется аналогия в законах расширения слоев смешения и затухания скоростей сдвига (рис.12).

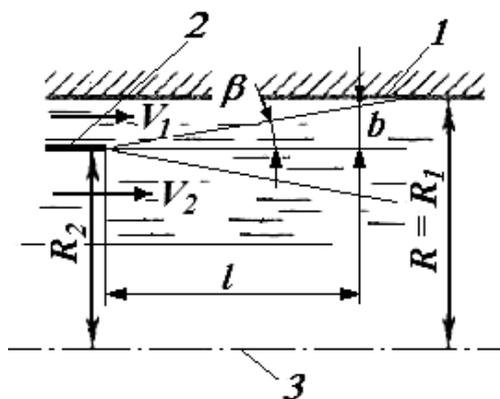


Рис. 12. Схема смешения взаимодействующих потоков

На основании этого механизма смешения слоев в [2] приведена формула для гидравлического расчета длины камеры смешения  $l_{KC}$ , отнесенная к радиусу канала для двуслойного течения

$$\frac{l_{KC}}{R} = \frac{240(1-k)}{\sqrt{4[A_1(1-\sqrt{1-s_1}) + A_2(1-\sqrt{1-s_2})]^2 + \left(\frac{m_1s_2 - m_2s_1}{m_1s_2 + m_2s_1}\right)^2}},$$

где,  $A_1$  и  $A_2$  -геометрические характеристики локального аксиально-лопаточного завихрителя периферийного и внутреннего потоков,  $s_1$  и  $s_2$  относительная площадь живого сечения потоков,  $m_1$  и  $m_2$  соответственно коэффициенты расхода локальных завихрителей. Расчеты по этой формуле показывают близкий, но несколько завышенный результат. В соответствии с формулой длина камеры смешения составляет  $19,8R$ .

В целом характер распределения (эпюры на рис. 9-11) аксиальных скоростей  $u_x$  по

длине камеры смешения свидетельствуют о том, что сложное, контрвихревое, знакопеременное продольное течение сохраняет достаточно высокую степень симметрии по отношению к оси трубы на всей длине взаимодействия слоев на всех трех испытанных моделях.

Трансформация профилей азимутальных (окружных) скоростей  $u_\theta$  в контрвихревых течениях по длине активной зоны показана на рис.13-15. Анализ полученных результатов показывает, что контрвихревое течение с примерно равными моментами вращения противоположно закрученных коаксиальных слоев быстро (в пределах активной зоны) трансформируется в продольно-осевое, т.е. в течение без закрутки. Это можно наблюдать на представленных эпюрах, где активная зона, зона интенсивной вязкой диффузии циркуляции взаимодействующих слоев, лежит в диапазоне 8-18 радиусов трубы. Факт интенсивной диффузии циркуляции очевиден, он не требует подробных объяснений, ибо определяется взаимным гашением циркуляции коаксиальных противоположно закрученных слоев (рис.1). Интенсивность гашения взаимной циркуляции увеличивается с увеличением числа взаимодействующих слоев. Представленные в [2] профили азимутальных скоростей, полученные расчетным путем для значения чисел Рейнольдса  $Re=500$  имеют сходный вид, однако, поскольку режим течения ламинарный, процесс вязкой диффузии циркуляции взаимодействующих слоев здесь заканчивается на 40-ом радиусе камеры смешения.

В этой связи необходимо отметить следующее. В ряде предшествующих работ [1,3,7] показано, что при расчете турбулентных циркуляционно-продольных течений жидкости достаточно хорошую сходимость с экспериментальными данными получают при использовании турбулентного аналога числа Рейнольдса, вычисляемого по вихревой вязкости турбулентной среды где  $\mathcal{E}_t$  – вихревая вязкость,  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления по длине,  $\chi$  – универсальная постоянная.

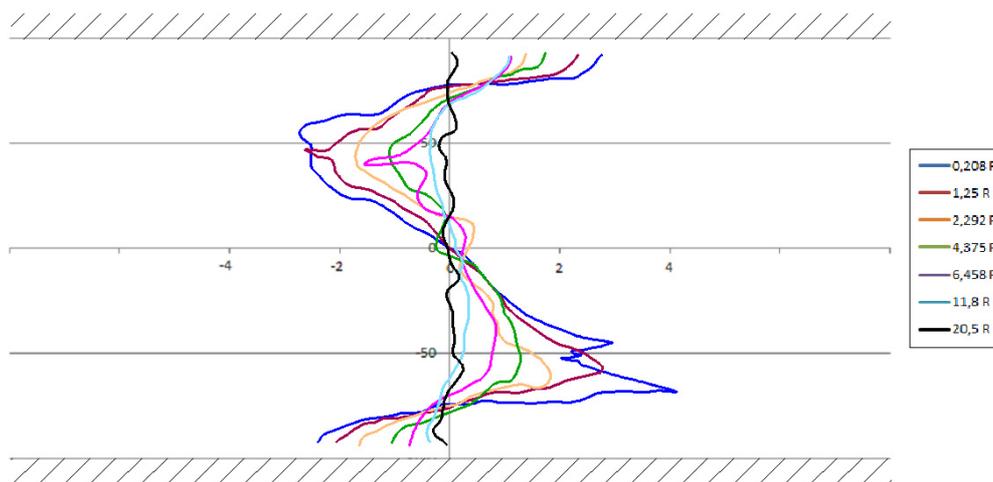
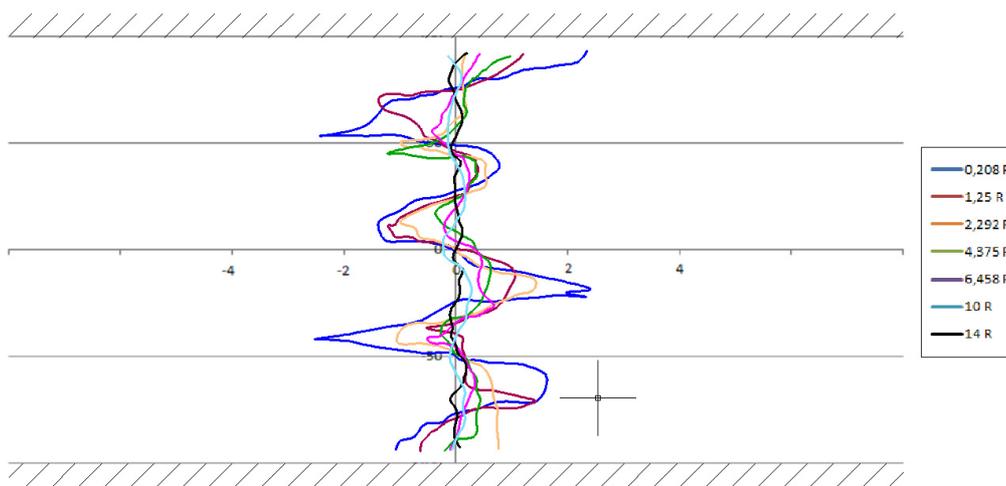
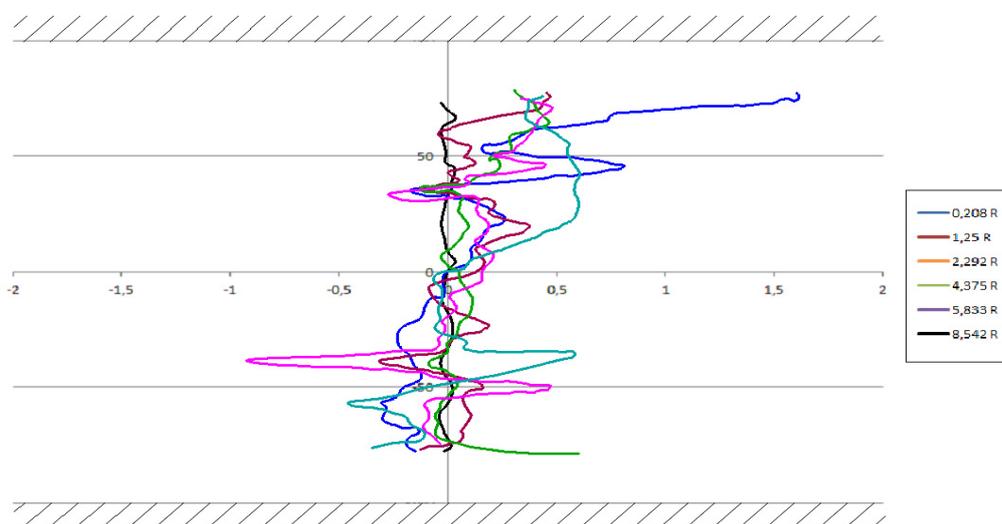


Рис. 13. Профили азимутальных скоростей  $u_\theta$ , двухслойное течение



**Рис. 14.** Профили азимутальных скоростей  $u_\theta$ , четырехслойное течение



**Рис. 15.** Профили азимутальных скоростей  $u_\theta$ , шестислойное течение

$$\text{Re}_t = \frac{VR}{\varepsilon_t} = \frac{1}{\chi} \sqrt{\frac{8}{\lambda}}$$

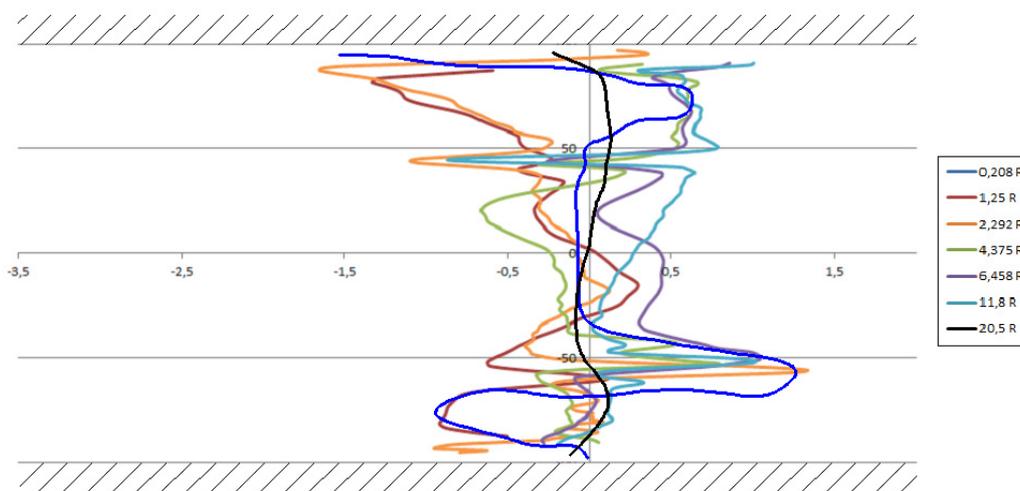
Если в реальных условиях коэффициент  $\lambda$  изменяется в пределах  $0,011-0,03$ , то турбулентное число Рейнольдса будет иметь значения в диапазоне  $R_t = 80-135$ . Сопоставляя с полученными экспериментальными результатами, нетрудно видеть, что при контрвихревом взаимодействии турбулентных закрученных потоков длина активной зоны (камеры смешения) сокращается в 3,5 – 6 раз. Это обстоятельство подтверждается экспериментально.

На рис. 16-18 показаны эпюры радиальных скоростей контрвихревых течений для трех проведенных опытов. В целом здесь порядок значений радиальных скоростей ниже, чем аксиальных и меридиональных, особенно в створах, удаленных от начала зоны взаимодействия коаксиальных слоев воздуха. Уже на расстоянии 1,5 долей радиуса от начала взаимодействия значения радиальных скоростей составляют 0,1-0,3 м/с.

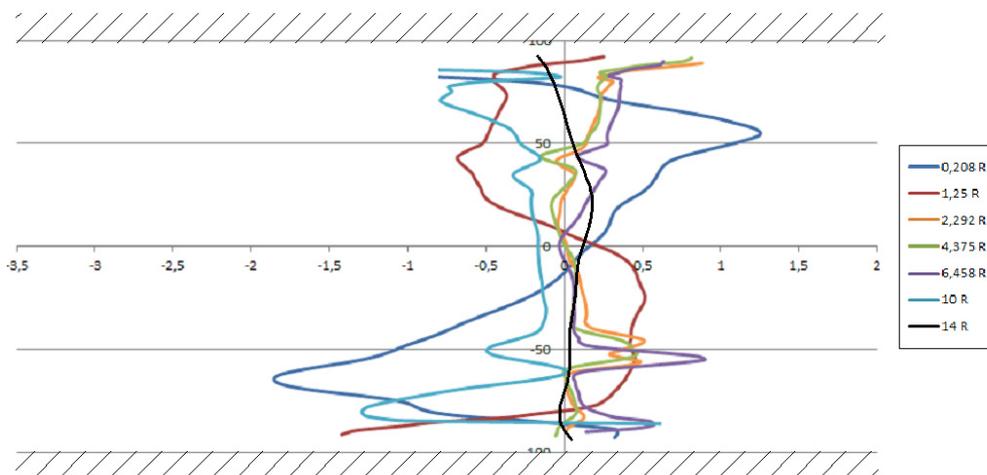
Можно видеть, что в контрвихревых течениях мы имеем радиальные перегородки,

направленные в сторону оси канала (радиальные скорости отрицательные). Таким течение является не во всех створах. Здесь необходимо учитывать, что в начале активной зоны мы наблюдаем в области оси существенное возвратное течение как при двуслойном, так и при многослойном контрвихревом потоке. Течение формирует вокруг себя область с рециркуляционным движением жидкости, в котором в створах непосредственно в начале активной зоны будет наблюдаться восходящий ток жидкости от оси в сторону стенок трубы. То, что мы наблюдаем на полученных профилях, можно характеризовать как начавшуюся трансформацию контрвихревого течения в продольно-осевое с логарифмическим распределением скоростей, характерным для развитого турбулентного течения. На всех приведенных экспериментальных профилях радиальные скорости становятся близкими к нулю задолго до окончания зоны взаимодействия коаксиальных слоев.

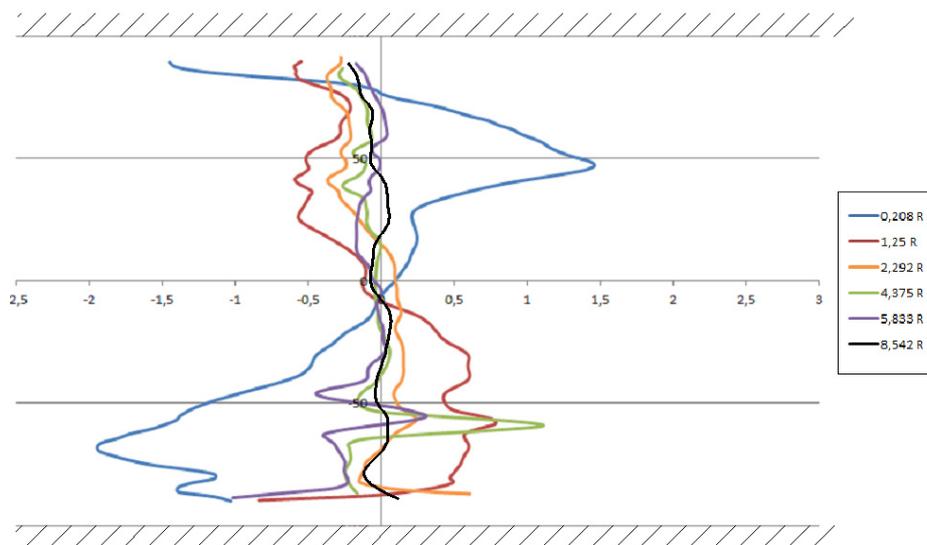
Надо сказать, что в расчетных контрвихревых течениях [2] при  $Re = 500$  радиальные перетоки также достаточно быстро вырождаются. Так, при двуслойном контрвихревом течении радиальные скорости становятся практически равными нулю к створу  $40R$ , а при многослойном течении (с 4-мя противоположно закрученными слоями) уже к створу  $20R$ .



**Рис. 16.** Профили радиальных скоростей  $u_r$ , двуслойное течение



**Рис. 17.** Профили радиальных скоростей  $u_r$ , четырехслойное течение



**Рис. 18.** Профили радиальных скоростей  $u_r$ , шестислойное течение

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научно-педагогические кадры инновационной России» проект 14.В37.21.0375.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметов В.К. Структура и гидродинамическая устойчивость закрученных потоков с зонами рециркуляции: дисс. д-ра техн. наук. М., 2009.
2. Ахметов В.К., Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Г.В.Орехов Г.В. Моделирование и расчёт контрвихревых течений. 2012. 250с.
3. Ахметов В.К., Шкадов В.Я. Численное моделирование вязких вихревых течений для технических приложений. М.: Изд-во АСВ, 2009.
4. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям. Д.Бартон, Г.Вард, Пер. с англ. под ред. М.М. Вейсбенна. М. : Сов. радио, 1976. 392 с.
5. Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Белоусов П.П. и др. Оптические методы исследования потоков . 2003. 418 с.
6. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичус Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. 1982. 303 с.
7. Зуйков А.Л., Волшаник В.В. Аналитическое исследование структуры потока вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе. М.: МГСУ, 2001.
8. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. 1984. 639с.
9. Jakimchuk V.I. LDA-technique for slow flows. PARTEC 98: Int. Cong. Part. Tech.: 7th Europ.Symp. Part. Charact., Nuernberg, Germany, 10-12 March 1998, Preprint 1, pp. 275—284.
10. *Raffel M., Willert, C., Wereley S., Kompenhans J.* Particle Image Velocimetry: A Practical Guide., Springer, 2007. P. 448.
11. *Adrian R.J., Westerweel J.* Particle Image Velocimetry. Cambridgeuniversitypress, 2011. 547 p.

**Рецензент:** Беликов Виталий Васильевич, доктор технических наук, начальник отдела численных гидравлических исследований ЦГИ ОАО «НИИЭС».