DOI: 10.17117/nv.2015.04.109

Поступила (Received): 21.11.2015

<http://ucom.ru/doc/nv.2015.04.109.pdf>

igil@hydro.ru

Ахметов Д.Г., Ахметов Т.Д. Закрученное течение в вихревой камере

Akhmetov D.G., Akhmetov T.D.
Swirl flow in vortex chamber

Экспериментально исследовано поле скорости течения в вихревой камере путем измерений движения взвешенных в жидкости частиц. Показано, что закрученное течение в камере является вращательно симметричным. По измерениям осевой компоненты скорости впервые построена полная картина линий тока этого течения в осевом сечении камеры. Показано, что при входе в камеру поток жидкости закручивается и распространяется в осевом направлении вдоль стенки камеры в виде тонких кольцевых струй в обе стороны от входного канала. Эти струи вблизи торцевых крышек камеры преобразуются в торцевые пограничные слои, вдоль которых практически весь поток жидкости притекает к оси камеры. Из торцевого пограничного слоя на закрытой крышке камеры образуется твердоотельно вращающаяся осевая струя, вытекающая из камеры через центральное отверстие на другой крышке камеры. Показано, что осевая струя, которую можно назвать завихренным ядром течения, на основной длине камеры не смешивается с окружающим потоком. Установлено, что между кольцевыми пристенными струями и осевой струей существует широкая зона, где течение жидкости противоположно направлению течения в пристенных струях

Ключевые слова: вихревая камера, поле скорости, структура течения

Ахметов Дарвин Газизович

Доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

Velocity field of the flow in a vortex chamber was experimentally studied by measuring the motion of fluidborne tracer particles. It is shown that the swirled flow in the chamber is axially symmetric. From the measured axial component of the flow velocity a full structure of flow stream-lines of this flow in the axial cross-section of the chamber was constructed for the first time. It is shown that the flow of the fluid entering the chamber swirls and propagates in the axial direction along the chamber wall in the form of thin annular jets to both sides from the entrance channel. Near the end walls of the chamber these jets transform into the end boundary layers along which almost all fluid flows to the chamber axis. From the boundary layer at the closed end plate a solid-body rotating axial jet is formed which flows out of the chamber through a central hole in the opposite end-plate. It is shown that the axial jet, which can be called a swirled core of the flow, is not mixing with the ambient flow on the main length of the chamber. It is found that between the near-wall jets and the axial jet there is a broad zone where the fluid flow is opposite to the flow direction in the near-wall jets

Key words: vortex chamber, velocity field, flow structure

Akhmetov Darvin Gazizovich

Doctor of Physico-mathematical Sciences,
senior Researcher

Lavrentyev institute of hydrodynamics
Novosibirsk, Lavrentyev ave., 15

Ахметов Тимур Дарвинович

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, пр. Лаврентьева, 11

Akhmetov Timur Darvinovich

Candidate of Physico-mathematical Sciences,
senior Researcher
Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian
Branch Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Lavrentyev ave., 11

Введение (Introduction)

Вихревая камера представляет собой отрезок трубы, один конец которой закрыт, а другой заканчивается крышкой с отверстием на оси трубы. В камеру жидкость подается по касательной к поперечному сечению камеры через тонкий щелевой канал на боковой поверхности трубы и при входе в трубу закручивается вокруг ее оси и вытекает через центральное отверстие на крышке камеры. Стационарное вращательно симметричное течение в вихревой камере обычно рассматривается в цилиндрической системе координат с тремя компонентами скорости азимутальной, осевой и радиальной. Закрученное течение в вихревой камере имеет множество технических приложений, в частности, используется для сепарации жидких сред, например, для удаления воды при нефтедобыче, для очистки воздуха от пылевидных примесей, а вытекающая из вихревой камеры в воздушную среду закрученная струя является основным средством распыления топлива в камерах сгорания турбореактивных и ракетных двигателей. В связи с этим исследованию течения в вихревой камере посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ, важнейшие результаты этих работ изложены в ряде монографий [1–4]. Теоретическое моделирование течения во всем объеме вихревой камеры затруднено из-за его сложной структуры, поэтому для определения картины течения в вихревой камере пользуются преимущественно экспериментальными измерениями поля скорости. Однако закрученность потока осложняет и экспериментальные измерения поля скорости течения. Возможности применения зондовых методов измерения скорости в закрученных потоках ограничены из-за искажения течения вводимыми в него датчиками даже миниатюрных размеров. Поэтому для определения картины течения закрученных потоков пользуются преимущественно оптическими методами измерения скорости, основанными на измерении смещений взвешенных в потоке микроскопических маркерных частиц в течение определенного времени (например, лазерной доплеровской анемометрией или PIV (particle image velocimetry) способом по изображениям частиц). В результате предшествующих исследований достаточно подробно изучено вращательное движение жидкости в вихревой камере и установлено, что в основном объеме вихревой камеры азимутальная компонента скорости в основном объеме вихревой камеры вращательное движение является доминирующим, а две другие проекции скорости – осевая и радиальная малы. Измерения доминирующей азимутальной компоненты скорости особых проблем не вызывает. Однако определение на фоне доминирующей азимутальной компоненты скорости малых компонент скорости, которыми в сущности и определяется картина течения в осевой плоскости камеры, является более сложной задачей, так как смещения частиц по радиусу и вдоль оси камеры оказываются недостаточными,

чтобы их можно было корректно измерить за время движения частиц в направлении доминирующей проекции скорости через достаточно малую области измерений. Поэтому в настоящее время существуют лишь результаты измерений распределения осевой проекции скорости в приосевой зоне вихревой камеры, где ее величина достаточно велика, существуют также результаты измерений распределения радиальной проекции скорости вблизи торцевых крышек камеры, где из-за трения вращательная скорость уменьшается до нуля, а радиальный градиент давления вызывает интенсивное течение, направленное к оси в виде тонких торцевых пограничных слоев [5–8]. Эти фрагментарные данные измерений малых проекций скорости лишь в отдельных зонах камеры или в случайно выбранных сечениях камеры пока не дают достаточно полного и ясного представления о структуре течения во всем объеме вихревой камеры.

Материалы и методы (Materials and Methods)

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования течения в вихревой камере по измерениям распределений азимутальной и осевой проекций скорости практически во всем объеме камеры. Проекция скорости течения в вихревой камере определялись по фотографиям треков взвешенных в потоке маркерных частиц. Треки частиц регистрировались в виде прерывистых линий, получаемых при периодическом освещении течения. Принцип определения скорости частиц таким способом очевиден, разновидность этого способа ранее использована, в частности, для определения поля скорости в вязком подслое турбулентного пограничного слоя [9].

Рис. 1. Экспериментальная установка

В настоящей работе треки частиц фотографировались в течение времени, необходимого для углового перемещения частиц вокруг оси камеры приблизительно на 180° . За это время частицы успевают переместиться в осевом направлении на вполне измеримое расстояние, по которому можно определить осевую проекцию скорости. Исследования проводились с помощью экспериментальной установки, схема которой показана на рис. 1 в двух проекциях.

Вихревая камера 1 представляет собой тонкостенный (с толщиной стенки 1 мм) круговой цилиндр с внутренним радиусом $R = 25$ мм и длиной $L = 138$ мм, изготовленный из органического стекла. Нижний торец цилиндра закрыт сплошной прозрачной крышкой, а верхний торец закрыт крышкой с центральным отверстием радиуса 7 мм и длиной 22 мм для выхода жидкости из камеры. Опыты проводились в воде. Закрученное течение в камере возникает при подаче жидкости (воды) в камеру из бака 2 через входной щелевой канал 3 прямоугольного сечения по касательной к поперечному сечению камеры. Щелевой канал толщиной 3 мм в радиальном направлении и шириной 20 мм в осевом направлении расположен на участке от 18 до 38 мм от нижнего торца камеры. Жидкость (вода) вытекает из камеры в расширительную емкость 4 и удаляется из бака по трубке 5. Расход жидкости q через камеру определяется по объему жидкости, вытекающей за определенное время, и во всех опытах был равен $q = 62,5 \pm 3,0$ см³/с. По расходу q и площади поперечного сечения входного щелевого канала, равной 0,6 см², определялась скорость V входа жидкости в камеру $V \approx 1,04$ м/с. Параметрами, определяющими течение, являются число Рейнольдса втекающего в камеру потока $Re = VR/\nu \approx 2,6 \cdot 10^6$ и безразмерная длина камеры $\lambda = L/R = 5,5$, где ν – кинематический коэффициент вязкости. В качестве маркерных частиц для определения поля скорости течения использовались сферические частицы полистирола с диаметрами от 0,2 до 0,5 мм, плотность которых не отличалась от плотности воды более чем на 5%. Можно ожидать, частицы с плотностью, равной плотности жидкости, будут двигаться со скоростью потока в окрестности частиц, и скорости частиц можно принять за скорость потока. Небольшие порции водной суспензии частиц вводились во втекающий в камеру поток медицинским шприцем через отверстие 6 на рис. 1. Треки частиц фотографировались через боковую стенку камеры. Чтобы исключить искажения изображений треков частиц, обусловленные цилиндрической формой камеры вихревая камера установлена внутри заполненного водой призматического сосуда 7 с прозрачными плоскими стенками. Внутренний объем камеры освещался через ее нижнюю прозрачную крышку параллельным пучком света, формируемым точечной лампой 8, линзой 9 и зеркалом 10. Этот пучок света периодически прерывался вращающимся дисковым obtюратором 11 с фиксированной частотой в диапазоне 260 ÷ 325 Гц, благодаря чему треки частиц регистрировались в виде прерывистых линий (при экспозиции $\sim 0,4$ с.) фотокамерой 12 (Sony «α 100», фотоматрица 3872 × 2592 пикселей). Чтобы исключить возможность наложения изображений треков частиц из-за вращения частиц вокруг оси камеры, световой пучок освещал лишь ближнюю к фотоаппарату половину объема камеры, благодаря чему треки частиц регистрировались только во время их азимутального движения в ближайшей к фотокамере половине

вихревой камеры. По трекам частиц определялись их осевые и азимутальные перемещения. Для определения радиальных координат частиц применялась дополнительная система освещения. Осевая плоскость раздела освещенной и затемненной половин вихревой камеры выделялась плоским лучом 13 толщиной ~ 1 мм зеленого цвета, получаемым с помощью лазера 14 и цилиндрической линзы 15 (см. рис. 1). При каждом обороте вокруг оси камеры частицы дважды пересекают плоскость лазерного луча, поэтому точки пересечения регистрируются на фотоснимке в виде хорошо выделяющихся зеленых точек, что позволяет определить радиальные координаты точки входа частицы в освещенную половину камеры и точки выхода из этой половины. Один из фотоснимков с треками частиц показан на рис. 2.

Рис. 2. Фото треков частиц.

Видно, что за время движения в освещенной прерывистым светом половине камеры частицы смещаются в осевом направлении на вполне измеримые расстояния, что позволяет определить осевую компоненту скорости. Принцип определения координат и скорости одной из частиц по ее треку пояснен на рис. 3, где двойные стрелки указывают направление движения частицы, буква R – радиус камеры.

Рис. 3. Принцип обработки трека

Неосвещенная половина поперечного сечения камеры заштрихована, частицы из этой половины камеры не регистрируются на фотоснимке. Точка входа частицы в освещенную зону камеры с радиусом r_1 и точка выхода частицы из этой зоны с радиусом r_2 отмечены на рис. 3 кружочками. Полученные фотографии вводились в компьютер и обрабатывались с помощью программы «Corel Draw». При обработке (измерении координат) трека частицы по фотографиям выделялась наиболее прямая средняя часть прерывистого трека частицы, и измерялись начальная и конечная координаты z_1 и z_2 этой части в осевом направлении, координаты x_1 и x_2 , а также число периодов штрихов n между этими точками. Штриховой характер треков частиц, обусловленный периодичностью освещения области течения, позволяет определить время движения частицы t на выделенном участке ее траектории по частоте вращения обтюратора 11 на рис.1. По этим данным определяются средние значения координат частицы $z = (z_1 + z_2)/2$, $r = (r_1 + r_2)/2$ и осевая компонента скорости $w = (z_2 - z_1)/t$. Принцип определения азимутального перемещения частицы по измеренным значениям x_1 , x_2 , $\tilde{r}$ также показан на рис. 3. Сначала определяются углы $\varphi_1 = \arcsin|x_1/r|$ и $\varphi_2 = \arcsin|x_2/r|$, и длины дуг $s_1 = r\varphi_1$ и $s_2 = r\varphi_2$ траектории частицы на участках углов φ_1 и φ_2 . По этим данным определяется азимутальная компонента скорости $u = (s_1 + s_2)/t$. Согласно представленной методике точность измерения проекций скорости каждой частицы определяется в основном погрешностью измерения координат треков частиц, так как ошибки измерения частоты прерывания света f пренебрежимо малы. При определении координат треков частиц с точностью $\pm 0,2$ мм ошибки определения скорости отдельной частицы составляют $\pm 0,05$ м/с. Радиальная компонента скорости по данной схеме измерений не определяется.

Из описания методики измерений следует, что на фотоснимках регистрируются треки частиц, появляющихся в случайных точках камеры. Поэтому для определения поля скорости течения требуется анализ треков весьма большого числа частиц, достаточно равномерно и плотно распределенных в исследуемом течении. В данной работе проанализированы треки порядка тысячи частиц. Чтобы построить радиальные распределения проекций скорости при фиксированных значениях осевой координаты вся исследуемая осевая плоскость разбивалась с шагом 2 мм на перпендикулярные оси слои толщиной 4 мм, и осевые координаты всех точек, попавших в каждый слой, принимались равными осевой координате этого слоя. По этим данным построены распределения проекций скорости по радиальной координате при фиксированных значениях осевой координаты z , изменяющейся с шагом 2 мм от 4 до 134 мм, т.е. практически на всей плоскости осевого сечения камеры.

Результаты (Results)

Результаты измерений азимутальной компоненты скорости u , полученные при всех указанных выше значениях осевой координаты z , отстоящих на

расстоянии 2-мм от торцевых крышек камеры, представлены на рис. 4 в зависимости от радиальной координаты r . Как видно, экспериментальные точки располагаются, в основном, в виде единой не расслаивающейся кривой, откуда следует, что азимутальная компонента скорости в основном объеме вихревой камеры практически не зависит от осевой координаты. Такой результат согласуется с данными работы [7], полученными по измерениям окружной проекции скорости с помощью лазерного доплеровского анемометра. Причина выбросов экспериментальных точек вблизи стенки камеры при $20 \leq r \leq 24$ не выяснена. Экспериментальная кривая на рис. 4, продолжена штриховой линией до оси вращения $r = 0$, где окружная компонента скорости равна нулю.

Рис. 4. Распределение азимутальной компоненты скорости

На этом линейном участке зависимости окружной скорости u от радиальной координаты жидкость вращается практически как твердое тело. Из рис. 4 следует, что завихренность в вихревой камере сосредоточена в тонкой приосевой области, которая называется ядром вихря, а с удалением от ядра завихренность быстро убывает. Положение максимума окружной скорости можно принять за радиус ядра вихря. Течения такого рода, в которых завихренность локализована в тонких трубкообразных областях пространства, называются концентрированными вихрями. Наиболее яркими примерами концентрированных вихрей являются интенсивные атмосферные вихри. Таким образом, течение в вихревой камере можно рассматривать как простейшую экспериментальную модель атмосферных вихрей.

Основное внимание в работе уделено измерению осевой компоненты скорости w , поскольку по полю осевой компоненты скорости вращательно симметричного течения можно определить функцию тока ψ и построить картину линий тока в осевой плоскости течения. Характер зависимости осевой компоненты скорости w от радиальной координаты r в двух разных сечениях камеры – выше и ниже входного щелевого канала показан на рис 5.

Рис. 5. Распределение осевой компоненты скорости

Разброс точек на рисунке возможно связан с тем, что распределения скорости построены, как указано выше, не по измерениям скорости при одном фиксированном значении осевой координаты, а по совокупности измерений в слое толщиной 4 мм в осевом направлении. Распределение осевой компоненты скорости вращательно симметричного течения позволяет ввести функцию тока и построить картину линий тока течения. При этом необходимо убедиться, что вращательная компонента скорости исследуемого течения не зависит от азимутальной координаты. С этой целью построены зависимости азимутальной координаты нескольких частиц в разных частях камеры от времени и установлено, азимутальное движение частиц линейно зависит от времени. Следовательно, азимутальная компонента скорости, не зависит от времени и от азимутальной координаты. Таким образом, течение в вихревой камере является вращательно симметричным, несмотря на то, что жидкость втекает в вихревую камеру через один единственный щелевой канал. Таким образом, усложнение экспериментальных установок путем ввода жидкости в вихревую камеру через множество тангенциальных каналов, равномерно расположенных по поперечному сечению камеры, с целью добиться вращательной симметрии течения можно считать излишним. Уравнение неразрывности для вращательно симметричного течения записывается в виде $\partial(rv)/\partial r + \partial(rw)/\partial z = 0$, и можно ввести функцию тока ψ , связанную с осевой w и радиальной v компонентами скорости соотношениями $rw = \partial\psi/\partial r$, $rv = \partial\psi/\partial z$. В данном случае распределение функции тока рассчитывалась по измеренному полю осевой компоненты скорости w интегрированием $\psi(z, r) = \int_0^r w(z, r) r dr$.

Картина линий тока течения в вихревой камере, представляющая собой линии равного уровня ψ , представлена на рис. 6.

Рис. 6. Картина линий тока

Геометрические размеры на рис.6 даны в миллиметрах. На стенке камеры справа (при $r = R$, $18 \leq z \leq 38$ мм) обозначено положение щелевого канала, через который жидкость втекает в камеру. На верхней торцевой крышке камеры (при $z = 138$ мм) показано также осевое отверстие для выхода жидкости. Линии тока построены с шагом $\Delta\psi = 0,1 \cdot q/2\pi$, где q – расход жидкости через вихревую камеру, то есть промежутки между соседними линиями тока соответствуют десятой части полного расхода жидкости через камеру. Следовательно, по числу линий тока можно оценить расход жидкости в той или иной зоне вихревой камеры. Жирными линиями на рис. 6 соединены точки, в которых осевая компонента скорости равна нулю. Стрелками указаны направления течения жидкости.

Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion)

Из картины линий тока следует, что часть втекающей в камеру жидкости сразу после входа в камеру устремляется, растекаясь тонким кольцевым слоем по стенке камеры, вниз к ее закрытому торцу. Этот поток, достигнув дна камеры, направляется в виде пограничного слоя на торцевой поверхности камеры к оси камеры, где преобразуется в твердотельно вращающуюся осевую струю, текущую в ядре вихря вверх к выходному отверстию. Другая часть втекающей жидкости после входа в камеру течет более широкой кольцевой струей вдоль

стенки камеры к верхнему торцу камеры и затем также направляется к выходному отверстию камеры. По числу линий тока можно оценить, что примерно половина расхода жидкости входит в осевую струю через торцевой пограничный слой на нижней крышке камеры, а вторая половина расхода – из пристенной струи над входной щелью вдоль верхней крышки камеры. Эти выводы согласуются с результатами работ [7,8]. В работе [7] измерениями профиля радиальной компоненты скорости в торцевом пограничном слое показано, что до 45% общего расхода жидкости через вихревую камеру составляет расход через пограничный слой на торцевой крышке с отверстием.

Из рис. 6 следует, что линии тока в осевой струе (то есть в ядре вихря) практически прямолинейны и параллельны оси камеры. Это означает, что в ядре вихря нет заметных радиальных движений и перемешивания жидкости. Отсутствие перемешивания жидкости в ядре с окружающим потоком может быть объяснено действием сил Кориолиса. Как показано Праудменом [10, стр. 682], во вращающейся как твердое тело жидкости медленные установившиеся движения должны быть двумерными, не зависящими от осевой координаты. Об этом свидетельствует и представленная на рис. 7 визуализированная картина ядра вихря.

Рис. 7. Визуализация вихревого ядра

Течение визуализировалось обезжиренным молоком, вводимым в камеру через тонкое отверстие 6 на рис. 1. Поперечные затемнения на рисунке – проявление следов механической обработки прозрачной стенки вихревой камеры. Как видно по рис. 7 окрашенное ядро вихря имеет резкие границы, что свидетельствует об отсутствии заметной конвективной диффузии жидкости из ядра. Следовательно, ядро вихря представляет собой твердотельно вращающуюся осевую струю, практически не смешивающуюся с окружающей жидкостью. Отсутствие конвективной диффузии вещества из ядер концентрированных вихрей можно считать универсальным эффектом. В работах [11,12] экспериментально показано, что красящие вещества, вводимые для визуализации течения

в ядра различных концентрированных вихрей, сохраняются в ядре без заметной диффузии в течение длительного времени, в то время как из внешней не завихренной области потока краска быстро вымывается течением. Такое явление названо авторами [11,12] подавлением турбулентности в ядрах концентрированных вихрей.

Из картины линий тока следует также, что выше входного щелевого канала (при $z > 38$ мм) между ядром вихря и пристенной кольцевой струей существует широкая область (при $0,3 \leq r/R \leq 0,7$), где жидкость течет в обратном направлении к закрытому торцу камеры. Обратное течение неоднородно, на извилистой вертикальной границе этой области с пристенной струей наблюдается вытянутая в осевом направлении цепочка замкнутых линий тока. Ясно, что области с замкнутыми линиями тока представляют собой поперечные сечения тороидальных вихрей, охватывающих ось камеры. Малая плотность линий тока в зоне обратного течения и в поперечных сечениях тороидальных вихрей означает, что скорость обратного течения и интенсивности вихрей не очень велики. Однако тороидальные вихри играют основную роль в формировании обратного осевого течения. Как видно, жидкость притекает в область обратного течения вдоль замкнутых линий тока из пристенной струи, а затем снова возвращается в пристенный поток, то есть механизмом возникновения обратного течения между пристенной струей и ядром вихря является перекачка жидкости из пристенной струи системой тороидальных вихрей. А причиной возникновения цепочки тороидальных вихрей можно считать распад внутренней свободной поверхности кольцевой пристенной струи на отдельные тороидальные вихри вследствие сдвиговой неустойчивости. Аналогичная картина наблюдается и ниже входного щелевого канала. Здесь втекающий поток распространяется в виде тонкой пристенной струи вниз к закрытому торцу камеры, и внутренняя поверхность этой струи также состоит из системы замкнутых линий тока, то есть тороидальных вихрей. Однако направление вращения этих вихрей противоположное, как и должно быть по описанному выше механизму для кольцевой струи, текущей в противоположном направлении. В соответствии с этим и течение между ядром вихря и нижней кольцевой пристенной струей в этом случае имеет противоположное с пристенной струей направление.

Впервые определена и представлена полная структура течения в вихревой камере. Показано, что основными структурными элементами течения в вихревой камере являются твердотельно вращающаяся осевая струя; пристенные кольцевые струи, направленные в осевом направлении в разные стороны от входного щелевого канала, и промежуточные между этими струйными потоками кольцевые области, где осевое движение жидкости противоположно направлению течения в пристенных струях. Показано, что внутренняя свободная поверхность каждой из кольцевых пристенных струй представляет собой систему тороидальных вихрей, циркуляция жидкости в которых является причиной возникновения кольцевых зон обратного течения между ядром вихря и пристенными струями. Важными элементами течения в вихревой камере являются торцевые пограничные слои, вдоль которых притекает к оси камеры практически весь расход жидкости.

Авторы выражают благодарность В.И. Якушеву за помощь при проведении экспериментов.

Список используемых источников:

1. Гупта А., Лилли Д., Сайред Р. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 590 с.
2. Гольдштик М.А. Вихревые потоки. Новосибирск: Наука, 1981. 366 с.
3. Кутателадзе С.С., Волчков Э. П., Терехов В. И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. Новосибирск, 1987. 282 с.
4. Смутьский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск: Наука, 1992. 301 с.
5. Wormley D.N. An analytical model for the incompressible flow in short vortex chambers. Trans. ASME, ser. D, 1969. V. 91. №2. P. 264-276.
6. Kotas T.J. An experimental study of the three dimensional boundary layer on the end wall of a vortex chamber. Proc. R. Soc. Lond. A. 1976. Vol. 352. P. 169-187.
7. Багрянцев В.И., Волчков Э.П., Терехов В.И., Титков В.И., Томсон Я.Я. Исследование течения в вихревой камере лазерным доплеровским измерителем скорости. Новосибирск, 1980. (Препр. СО АН СССР. Ин-т теплофизики. № 55-80).
8. Волчков Э.П., Семенов В.И., Терехов В.И. Аэродинамика торцевого пограничного слоя в вихревой камере // ПМТФ. 1986. № 5. С. 117-126.
9. Орлов В.В., Хабахпашева Е.М., Перепелица Б.В., Михайлова Е.С. Исследование пристенной турбулентности методом стробоскопической визуализации. Новосибирск. 1968. (Препр. СО АН СССР. Ин-т. теплофизики).
10. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973.
11. Владимиров В.А., Тарасов В.Ф. Структура турбулентности вблизи ядра кольцевого вихря // ДАН СССР. Т. 245. № 6. 1979. С. 1325-1328.
12. Владимиров В.А., Луговцов Б.А., Тарасов В.Ф. Подавление турбулентности в ядрах концентрированных вихрей // ПМТФ. 1980. № 5. С. 69-76.

References:

1. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. Swirl flows. Abacus Press. Tunbridge Wells, Kent. 1984. 475 p.
2. Goldshtik M.A. Vortex flows. Nauka, Novosibirsk. 1980. 366 p.
3. Kutateladze S.S., Volchkov E.P., Terekhov V.I. Aerodynamics, heat and mass transfer in confined vortex flows. Institute of Thermophysics, Novosibirsk. 1987. 272 p.
4. Smulsky I.I. The aerodynamics and processes in vortex chambers. Nauka, Novosibirsk. 1992. 301 p.
5. Wormley D.N. An analytical model for the incompressible flow in short vortex chambers. Trans. ASME, ser. D, 1969. V. 91. №2. P. 264-276.
6. Kotas T.J. An experimental study of the three dimensional boundary layer on the end wall of a vortex chamber. Proc. R. Soc. Lond. A. 1976. Vol. 352. P. 169-187.
7. Bagryantsev V.I., Volchkov E.P., Terekhov V.I., Titkov V.I., Tomsons Ya.Ya. Investigation of a flow in a vortex chamber by a Laser Doppler Velocimeter. Novosibirsk. 1980. Preprint of the Institute of Thermophysics, Sib. Br. USSR Acad. Sci., No.55-80.
8. Volchkov E.P., Semenov S.V., Terekhov V.I. Aerodynamics of end-wall boundary layer in a vortex chamber. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1986. V. 27(5). P. 740-748.
9. Orlov V.V., Khabakhpasheva E.M., Perepelitsa B.V., Mikhailova E.S. Investigation of near-wall turbulence using stroboscopic visualization. Novosibirsk. 1968. Preprint of the Institute of Thermophysics, Sib. Br. USSR Acad. Sci.
10. Batchelor G.K. An introduction to fluid mechanics. Cambridge University Press, Cambridge. 2000. 631 p.
11. Vladimirov V.A., Tarasov V.F. Structure of turbulence near the core of a vortex ring. Sov. Phys. Dokl. 1979. V. 24. P. 254-256.
12. Vladimirov V.A., Lugovtsov B.A., Tarasov V.F. Suppression of turbulence in the cores of concentrated vortices. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1980. V. 21(5). P. 632-637.