

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ РАНКА-ХИЛША.

ИНВЕРСИОННЫЙ И ДИСКРЕТНЫЙ КЛУБКОВЫЙ ВИХРИ ИШАЕВА

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Александр Иванович Бажанов, член-корр. РИА и МИА

Представлена структура течений в трубах Ранка-Хилша при различных соотношениях стратифицированных течений. Обнаружены новые вихревые эффекты и разработаны теоретические подходы для их описания.

The structure of currents in Ranka-Hilsha pipes is presented at various parities of the stratified currents. New vortical effects are found out and theoretical approaches are developed for their description.

Ключевые слова: турбулентность, вихрь, стратификация.

Keywords: turbulence, a whirlwind, stratification.

Изобретенное французским инженером Жоржем Жозефом Ранком в 1931 г. устройство для сепарации тепла, так называемая труба Ранка, и позднее, в 1941 г., тщательные исследования и оптимизация конструкции на том же принципе немецким профессором Рудольфом Хилшем (поэтому труба Ранка-Хилша), является на сегодняшний день самым изящным и дешевым способом получения холода. Течение в трубе Ранка-



Жорж Жозеф Ранк



Рудольф Хилш

Хилша до сих пор предмет исследования многих ученых и инженеров [1, 2]. Простая в исполнении и незамысловатая по конфигурации конструкция трубы таит в себе множество великолепных возможностей ее применения во многих отраслях промышленности. Основное её свойство - это тепловая стратификация течения с разделением его на очень холодный и достаточно горячий потоки. Основная причина, вызывающая такое разделение - организация центробежного потока путем подачи поступательного входного через тангенциальные каналы устройства импеллерного типа, формирующего вихревое движение, разделяющего его на осевое и периферийное и направляющее их соответственно в противоположные стороны по левую и правую границу трубы в атмосферу.

Благодаря центробежным силам в центре вихря понижается давление (пропорционально, прежде всего, величине центробежной силы) и зависит от его величины на входе в канал. При этом масса центральной части вихря начинает уходить из центра, создавая в этой области разрежение. Происходит адиабатическое расширение газа, и температура в центре вихря резко падает. Одновременно температура на периферии растет в соответствии с ростом давления: $T = P/\rho R$.

Понятно, что в вихре одновременно возникает вторичный конвективный эффект. Охлажденные частицы имеют большую плотность, чем горячие и по законам гидродинамики менее плотные должны всплывать, то есть двигаться совершенно в противоположную сторону относительно центробежных сил.

Но этот эффект при больших скоростях весьма слаб по сравнению с основным центробежным и может не учитываться в практических расчетах.

После разделения вихря на условно левую и правую части, потоки движутся по цилиндрическим каналам, совершая винтовое движение, поскольку из-за закрутки им было придано угловое перемещение, а из-за перепада давления на входе из атмосферы потоки получили осевое направление. В зависимости от конструкции трубы существенно будет изменяться мощность

производства холода и тепла, так как она (конструкция) определяет соотношение массовых расходов в одну и другую сторону. На тепловую стратификацию будет существенно влиять и форма каналов. Поэтому основной задачей инженеров и исследователей процессов, происходящих в трубах Ранка-Хилша, является оптимизация конструкции в части получения, как максимальной стратификации, так и максимальной производительности либо холода, либо тепла. По мере исследования течений различными авторами было разработано множество методов расчета (в основном инженерных) процессов, происходящих в трубах Ранка-Хилша; получено много экспериментальных результатов на различных рабочих телах и различных конструкциях; показана возможность получения эффекта стратификации тепла не только на газообразных, но и на жидких рабочих телах.

Но! Несмотря на все усилия, на текущий момент общепризнанная физико-математическая модель феномена энергоразделения отсутствует. Поэтому целью данной работы явилось создание обобщенной теории течения газов и жидкостей, объясняющей изложенный выше эффект тепловой стратификации.

Экспериментальные исследования

При изучении вихревых эффектов в трубах Ранка-Хилша одновременно с расчетными были проведены экспериментальные исследования на пневмогидравлической установке [3].

Эта установка функционировала следующим образом. Воздух через редуктор поступал в линию подачи с избыточным давлением 0,1...1,5 МПа. Точная регулировка подачи обеспечивалась вентилем. Предохранительный клапан ограничивал давление в контуре подачи исходного воздуха. Расход воздуха на входе контролировался расходомером (счетчиком сжатого воздуха), температура - термопарой с соответствующим приборным сопровождением. Воздух подавался в камеру вихревой трубы Ранка-Хилша через тангенциальный вход, где разделялся на два разнонаправленных потока. Один, горячий (справа) - сбрасывался в атмосферу через регулирующий конус на торце трубы; другой, холодный (слева) - через диафрагму выходил наружу через расходомер. Соотношение потоков изменялось перемещением регулирующего конуса.

Проведенный цикл экспериментов позволил наблюдать и зарегистрировать следующие эффекты.

Эффект тепловой стратификации. Был зарегистрирован эффект понижения температуры потока, выходящего через левую сторону, и одновременно повышение температуры потока, выходящего через регулирующий конус справа. Давление на входе в вихревую трубу отслеживалось по отношению давления на входе к давлению со стороны холодного выхода, температура как разница между температурой горячего выхода и температурой входа или как разница между температурой холодного выхода и температурой входа.

Были получены зависимости, демонстрирующие температур-

ное разделение горячего и холодного потоков в вихревой трубе. Экспериментально был зафиксирован максимум снижения температуры при соотношении расходов в области 0,2 ... 0,4. При этом температура горячего потока всегда монотонно возрастала с увеличением доли холодного выхода и достигала своего максимального значения при соотношении равном единице. Степень понижения давления влияла на температурную стратификацию в вихревой трубе.

При реализации эффекта тепловой стратификации для данной конструкции вихревой трубы было интересно проследить за ее тепло- и холодопроизводительностью. Было установлено, что максимальный эффект по производительности в том и в другом случае был реализован при соотношении сепарированных потоков 0,6...0,7. При этом рост обеих функций в интервале соотношений расходов 0...0,5 был практически линейным.

Эффект инжекции. Этот эффект был зафиксирован со стороны холодного потока. Он заключался в том, что при увеличении площади выходного сечения горячего выхода (справа) поток сначала останавливался, а затем начинал двигаться в противоположном направлении. Вихревая труба начинала работать как инжектор, всасывая воздух из атмосферы с левой стороны трубы. Точно измерить относительную площадь проходного сечения из-за особенности конструкции в экспериментах не удалось, но косвенно с помощью расчетов это было сделано. Установлено, что инжекция начиналась при реализации величины площади на выходе горячего воздуха относительно площади входа на уровне 10 %.

Расчетные исследования течений в трубе Ранка - Хилша

Как уже было сказано, общепринятой теории, описывающей течения в трубах Ранка-Хилша, пока нет. Более того, не до конца корректно интерпретируются экспериментальные результаты. Так, например, в работе [1] утверждается, что в центре закрученный поток вращается в другую сторону относительно периферийного. В работе [2] при анализе балансов экспериментальных значений энтальпий не учитывается диссипативный член. Очевидно, что исследование данной газодинамической задачи не может быть выполнено только экспериментальным путем. Задача, как и большинство современных задач, может быть решена исключительно путем расчетно-экспериментальных многопараметрических исследований. Поэтому в сопровождение экспериментальных работ к изучению газодинамических процессов были привлечены электронно-вычислительные комплексы. Массовые всесторонние расчеты в этом направлении провел молодой ученый, специалист по турбомашинным агрегатам, Ринат Олегович Ишаев. Им были получены локальные картины течений и зафиксированы инверсионный и дискретный клубковый вихревые эффекты. Расчеты проводились для описанной ранее экспериментальной установки, которая была представлена в виде 3D-модели, реализованной с помощью программы SolidWorks, в строгом соответствии с конструкторской документацией.



Ринат Олегович Ишаев

Было исследовано движение воздуха в трубе с помощью "Российского продукта" на основе модуля FloEFD, интегрированного в SolidWorks (FlowSimulation). Выбор FlowSimulation обоснован следующими особенностями: хорошее моделирование ядра потока, понятный графический интерфейс, автоматический генератор прямоугольной декартовой вычислительной сети. Для соответствия математической модели условиям физического эксперимента решалась внутренняя задача: рабочее тело - сжатый воздух с начальной температурой $T_{вх} = 293 \text{ K}$, с давлением на входе $P_{вх} = 0,5 \text{ МПа}$ и на выходе $P_{вых} = 0,101325 \text{ МПа}$, стенка считалась адиабатической и гидродинамически гладкой. Перед расчетом выполнялась дискретизация области течения прямоугольной сеткой, на гранях которой рассчитывались потоки энергии массы и

импульса. Параметрические исследования процессов в трубе Ранка-Хилша как технической системы и их анализ позволили выявить новые эффекты и визуализировать их с помощью графических возможностей FlowSimulation.

Эффект тепловой стратификации. Основным и хорошо изученным эффектом в трубе Ранка - Хилша является эффект тепловой стратификации. Результаты, представленные на рис. 1, иллюстрируют этот эффект не только с тепловой, но и с газодинамической точки зрения. Здесь можно наблюдать разделение вихревого потока на два: холодный слева и горячий справа. При этом для данной конструкции трубы минимальная температура реализуется при соотношении расходов 0,3 и равна 266 К. Максимальная 311 К - при закрытом правом выходе. На рисунке отмечены две характерные линии тока в направлении обоих выходов. Линии тока имеют формы винтовых кривых, которые вращаются в одинаковом направлении в соответствии с закруткой потока в импеллере. Такая картина наблюдается до значения величины выдвижения дросселя 0,8 мм, что соответствует относительной площади на выходе справа 10 %. После чего наступает режим инжекции (эффект инжекции) в работе трубы. В этом режиме труба работает как насос и всасывает воздух со стороны холодного выхода (рис. 2).

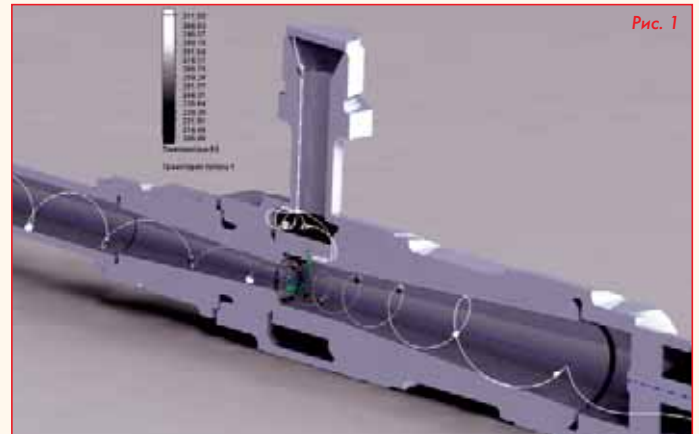


Рис. 1

При этом режиме труба работает как насос и всасывает воздух со стороны холодного выхода (рис. 2). При этом выход справа осуществляется так же по спирали.

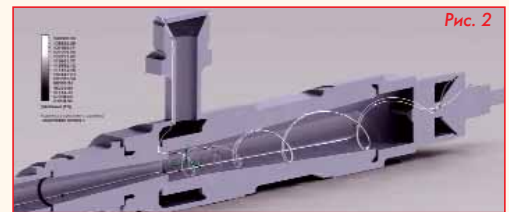


Рис. 2

Эффект вихревой инверсии. При расчете ситуации, когда правый выход был полностью закрыт, был получен и объяснен эффект вихревой инверсии. На рис. 3 можно наблюдать удивительное движение одного вихря внутри другого. Причем внутренний, отраженный от стенки вихревой поток меньшего диаметра (меньшего за счет потери импульса после соударения со стенкой), вращается в том же направлении, что и внешний. Но! Скорость в осевом направлении изменилась на противоположную. В результате соударения произошла инверсия. Характерным для данного течения является то, что аксиальная скорость потока на оси равна нулю. Это и есть условие устойчивого су-

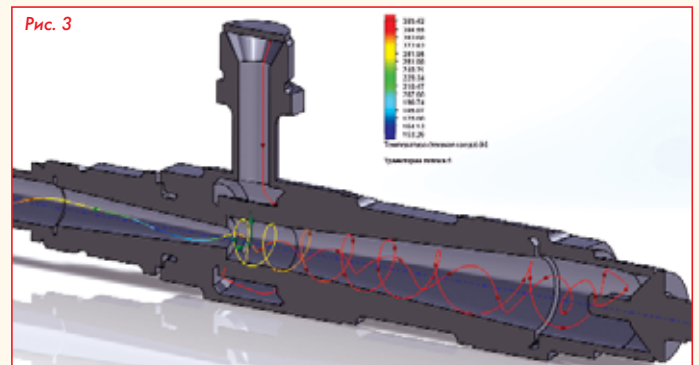


Рис. 3

ществования двух винтовых потоков, когда один внутри другого. Этот факт наглядно проиллюстрирован на рис. 4. Видно, что

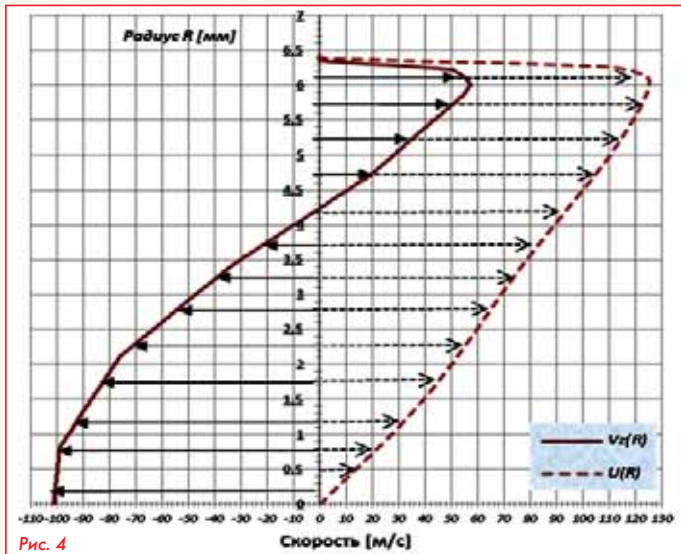


Рис. 4

профиль осевой скорости имеет точку перегиба, а формы внешнего и внутреннего течения соответствуют течению внутри коаксиального цилиндра и трубы. Профиль аксиальной скорости близок по форме к профилю вращения твердого тела.

При введении в конструкцию центрального тела эффект инверсии повторился. Внутренний вихрь возвращался теперь через проходное сечение в виде коаксиального цилиндра вдоль поверхности центрального тела (рис. 5).

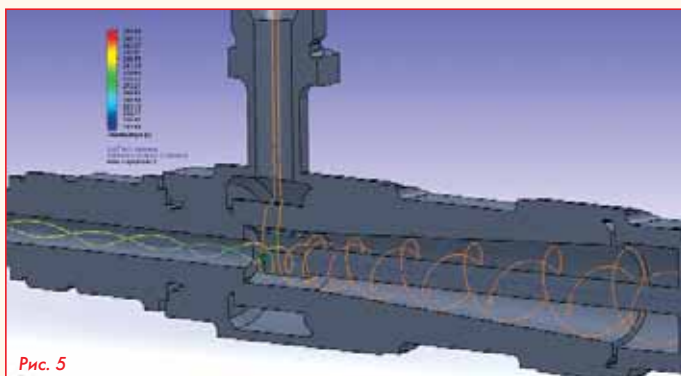


Рис. 5

Дискретный клубковый эффект. Выполненные расчеты несколько видоизмененного варианта трубы Ранка-Хилша, имеющего в конструкции импеллера прямоугольные сопла, позволили установить еще очень интересный эффект. Ввод потока через прямоугольные сопла гарантировал равномерное формирование исходного вихря и его стратификацию. Интерес представляли расчеты трубы с закрытым правым выходом.

В результате расчетов было установлено, что в тупиковой зоне в зависимости от режима работы трубы возникали дискретные вихревые клубки с противоположными скоростями потока. Кратность вихрей определялась размером тупиковой области, а диаметр клубка — диаметром трубы. На рис. 6 и 7 представлены комбинации с одним и двумя вихрями.

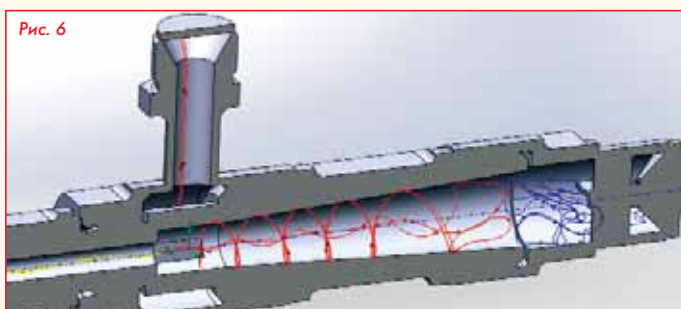


Рис. 6



Рис. 7

Теоретический аспект в задаче Ранка-Хилша

Расчетные методы в задаче Ранка-Хилша строятся на базе векторного уравнения Навье-Стокса и приводят к следующей его записи:

$$\frac{d\vec{V}}{d\tau} + \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} + \frac{1}{\rho} \text{grad} p - \frac{4}{3} v \text{grad} \text{div} \vec{V} + [\text{rot} \vec{V} \cdot \vec{V}] + \text{rot} \text{rot} \vec{V} = 0.$$

С учетом первого и второго начал термодинамики

$$\frac{1}{\rho} \text{grad} p = \text{grad} h - T \text{grad} S = \text{grad} h - \text{grad} Q.$$

Здесь h и Q — статическая энтальпия и тепло.

Уравнение движения может быть записано:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + \text{grad}(h_0 - Q) - \frac{4}{3} v \text{div} \vec{V} + [\text{rot} \vec{V} \cdot \vec{V}] + v \text{rot} \text{rot} \vec{V} = 0.$$

Это уравнение устанавливает связь энтропии с параметрами вращения и кручения потока с учётом его сжимаемости и вязкости. После воздействия на него векторным оператором дивергенция можно получить соотношение для энергии:

$$\Delta \left(h_0 - \int T ds - \frac{4}{3} \frac{v}{\rho \alpha^2} \frac{dp}{d\tau} \right) + \vec{V} \cdot \text{rot} \text{rot} \vec{V} - \text{rot} \vec{V} \cdot \text{rot} \vec{V} = 0.$$

Воспользовавшись далее теоремой № 2 о соотношении движений, окончательно получим уравнение для энергий:

$$\begin{aligned} h_0 - \int T ds - \frac{4}{3} \frac{v \vec{V}}{\rho \alpha^2} \text{grad} p &= \text{const}; \\ h_0 - \int T ds - \frac{4}{3} \frac{v \vec{V}}{\alpha^2} (\text{grad} h - T \text{grad} S) &= \text{const}; \\ (h_0 - Q) - \frac{4}{3} \frac{v \vec{V}}{\alpha^2} \text{grad}(h - Q) &= \text{const}. \end{aligned}$$

Последнее уравнение можно считать рабочим при расчетах балансов на входе и выходах из трубы Ранка-Хилша. Другими словами, энтальпийный дефект, появляющийся в экспериментах и отмеченный в работе [2], может быть объяснен именно энтропийным и диссипативным членами. Более подробные комментарии по этому эффекту можно также сделать с учетом новой работы [5].

Литература

1. А.М. Белоусов, И.Х. Ибрафиллов, С.И. Харчук. Вихревая труба Ранка-Хилша как перспективное устройство получения низких температур // Холодильная техника и кондиционирование. № 2, 2014.
2. М.А. Жидков, В.А. Девисиллов, Д.А. Жидков и др. термодинамические эффекты Ранка-Хилша в трехпоточных вихревых трубах. М. Химическая технология том 15, №1, 2014.
3. Ю.М. Кочетков, И.Н. Боровик, О.А. Подымова, В.А. Мавров, Р.О. Ишаев. Вихревые эффекты в вихревых трубах Ранка-Хилша // Вестник МАИ, № 4, 2016.
4. Ю.М. Кочетков Турбулентность, сжимаемость и вязкость // Двигатель № 5, 2011 г.
5. Ю.М. Кочетков Четвертое начало термодинамики или первое начало термодинамики // Двигатель № 4, 2016 г.

Связь с авторами: swgeorgy@gmail.com