

Увеличение холодопроизводительности вихревой трубки Ранка путем возмущения закрученного потока воздуха

Вишератин К.Н., Васильев В.И., Коломиец С.М., Заренков А.А.

Аннотация—Противоточная вихревая труба впервые была открыта Д. Ранком. Вихревая труба обычно состоит из камеры, имеющей выходы на противоположных концах, тангенциального ввода, диафрагмы и дроссельного крана. Сжатый воздух поступает через тангенциальный ввод в трубку и разделяется на холодную и горячую фракции, выходящие через противоположные концы трубки. К сожалению, эффективность трубок Ранка оставляет желать лучшего. В настоящем докладе описан новый метод повышения эффективности вихревой трубки. Рассмотрены два подхода. Суть этих подходов состоит в возмущении периферийного закрученного потока воздуха в трубке посредством спиральной структуры. В одном случае это жесткая неподвижная спираль, прижатая к внутренней стенке трубки, а во втором – эластичный стержень, принимающий при вращении форму спирали, самоподстраивающейся под параметры потока.

Трубка, снабженная такими спиральными структурами, имеет лучшую эффективность. Выход холодного воздуха повышается на 20-25%. Температура холодного воздуха понижается примерно на 15-25%. Рассмотрены результаты экспериментов для входных давлений от 2 до 5 атм. В случае жесткой спирали эффект наблюдается только при определенных положениях и определенном пространственном шаге спирали. В настоящее время общепринятого объяснения работы вихревой трубы нет. Мы предполагаем, что “эффект спирали” связан с возмущением периферийного потока воздуха вблизи внутренней стенки трубки, что обуславливает лучшее разделение “микровихрей” с разными энергиями.

I. ВВЕДЕНИЕ

В 1933 г. французский инженер Д. Ранк опубликовал статью [1] и оформил свой широко известный патент [2] на способ и установку для разделения сжимаемой жидкости (воздух или пар) на два потока – холодный и горячий без использования движущихся механических

Научно-производственное объединение “Тайфун”, Обнинск, Россия, kvisher@rpatyphoon.ru.

Исходная публикация: К.Н. Вишератин и др. “Увеличение холодопроизводительности вихревой трубки Ранка путём возмущения закрученного потока воздуха” // International Heat Powered Cycles Conference Cyprus. ISBN 01874418353, 2004. October. P. 1203.

деталей. Схема установки, получившей позже название вихревая труба Ранка противоточного типа, показана на рис. 1. Воздух под давлением подается через тангенциальный ввод 4 и дополнительно закручивается завихрителем 5 (спиральной направляющей, имеющей форму улитки Архимеда). Закрученный поток воздуха 6 движется от тангенциального ввода к коническому крану, частично отражается и формирует второй внутренний вихрь 7, который движется в обратном направлении и выходит наружу через аксиальную диафрагму 3. Обычно вихревые трубки используются для охлаждения с типичными температурами на холодном конце от минус 40 до 10 °С. Горячий воздух при температуре от 40 до 70°С обычно выбрасывается в атмосферу. Следует отметить, что в патенте [2] кроме базовой конструкции, подобной изображенной на рис. 1, указан ряд конструктивных решений, которые позволяют улучшить эффективность холодообразования:

- Использование нескольких расположенных симметрично тангенциальных вводов, что увеличивает степень радиальной симметрии закрученного потока.
- Размещение на выходе тангенциального ввода спиральной направляющей, что дополнительно увеличивает скорость закрутки потока воздуха.
- Наклон тангенциального ввода и завихрителя, что уменьшает затекание входного воздуха напрямую в диафрагму.
- Коническая форма камеры энергетического разделения, что ослабляет эффект диафрагмирования внутреннего холодного вихря в горячей части трубы.
- Использование в качестве источника закрученного потока лопаточной турбины и создание на этой основе конструкции прямоточного типа.

Большинство из этих решений было позже доработано, стимулировало изобретательскую деятельность и использовалось при разработке серийно выпускаемых трубок.

Эффект Ранка более 10 лет оставался малоизвестным, пока немецкий инженер Р. Хилш, к которому после оккупации Франции попали рабочие материалы Ранка, не опубликовал статьи [3], [4] с подробным описанием трубки Ранка. Он же ввел термин вихревая труба (ВТ). Начиная с этих публикаций было предпринято

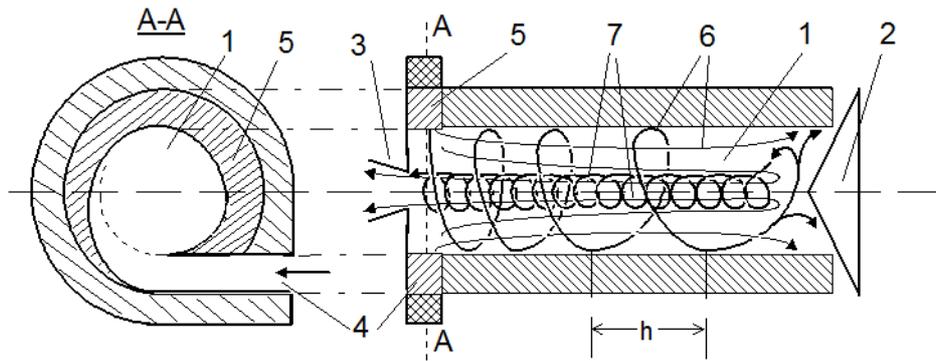


Рис. 1. Противоточная вихревая трубка Ранка. 1 – камера энергетического разделения (цилиндрическая трубка), 2 – конический дроссельный кран на горячем конце, 3 – диафрагма на холодном конце, 4 – тангенциальный ввод, 5 – завихритель, 6, 7 – тангенциальный и аксиальный потоки горячего и холодного воздуха.

немало усилий для повышения эффективности трубки Ранка и объяснения эффекта температурного разделения. Основные результаты экспериментальных работ, связанных с исследованием эффекта Ранка, обсуждаются в [5], [6]. Критический обзор экспериментальных и теоретических работ был проведен в [7].

Согласно существующим представлениям под действием центробежной силы сжатый поток воздуха движется около внутренней стенки трубки от завихрителя к крану. Его окружная (тангенциальная) скорость падает за счет торможения о стенки и соответственно уменьшается радиальный (между осью и стенками) перепад давления. Скорость уменьшения перепада радиального давления выше, чем скорость продольного падения давления на периферии трубы. Это приводит к появлению на оси трубы отрицательного градиента давления, который порождает обратное приосевое течение с давлением, превышающим атмосферное.

В работе [7] предложена еще одна интерпретация механизма разделения потоков в трубке Ранка. Предполагается, что поступающий через тангенциальный ввод поток воздуха сильно турбулизован и состоит из элементов с разными кинетическими энергиями. За счет действия центробежной силы элементы с малой кинетической энергией (медленные элементы) будут собираться вблизи оси трубы, испытывая при этом почти адиабатическое охлаждение, а “быстрые” элементы будут двигаться к периферии потока и частично терять энергию при трении о стенки трубы. Периферийный горячий поток выходит через дроссель, а вращающийся вблизи оси трубы поток холодного воздуха выходит через диафрагму. Как указывает Гуцол [7], такой механизм позволяет объяснить большинство имеющихся экспериментальных результатов. Отметим отличающееся от других объяснение температурного разделения за счет акустического эффекта [8].

Результаты вычислительных экспериментов, основанных на решении уравнений Навье-Стокса, приведены в [9], [10]. Физический механизм температурного разделения в [10] связывается с интенсивной потерей

кинетической энергии за счет механической работы вязких сил, которые увеличивают потери кинетической энергии в начальной стадии эволюции вихря. Тем не менее, общепринятого теоретического объяснения эффекта Ранка до сих пор нет.

Несмотря на отсутствие законченной теории, вихревые трубы Ранка широко используются в различных областях техники. В основном они находят применение как вихревые холодильники, а также как вихревые системы очистки, осушки и разделения газов. К недостаткам вихревых труб относят высокий уровень шума, создаваемый турбулентными потоками и низкая эффективность производства холода. Хотя в некоторых работах [11] были получены рекордные ($\sim 200^\circ\text{C}$) значения температуры охлажденного воздуха, в целом холодопроизводительность известных устройств остается невысокой. При этом улучшение холодопроизводительности ВТ часто сопряжено с существенным усложнением конструкции и повышением энергозатрат.

Целью наших экспериментов был поиск относительно простых решений, позволяющих увеличить холодопроизводительность базовой вихревой трубки Ранка, изображенной на рис. 1. Было найдено несколько решений, которые позволили, не меняя конструкцию ВТ, повысить массовый расход холодного воздуха и одновременно понизить его температуру. Хотя наши изобретения [12], [13] не решают проблему кардинального увеличения холодопроизводительности трубки Ранка, они лежат в стороне от традиционных подходов и, как нам кажется, раскрывают неизвестные ранее аспекты работы ВТ.

II. ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты проводились с обычной серийной трубкой Ранка, собранной по стандартной схеме (Рис. 1). Внешний вид трубки Ранка показан на рис. 2. Камера энергетического разделения – цилиндрическая труба (1) изготовлена из нержавеющей стали. Длина трубки 125 мм, внутренний диаметр – 12 мм. Тангенциальный ввод имеет круглое сечение диаметром 5

мм, диаметр отверстия диафрагмы на холодном конце (3) – 6 мм. На горячий конец трубы устанавливался дроссельный конический кран (5)

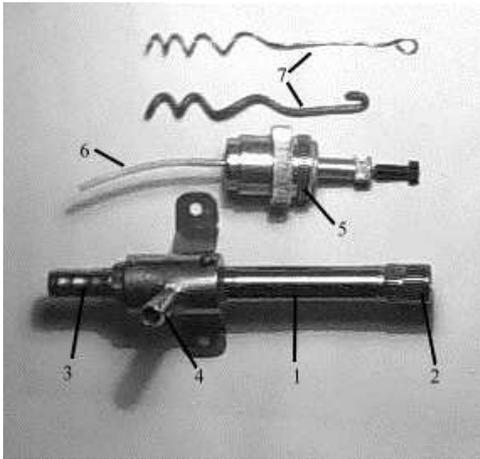


Рис. 2. Общий вид вихревой трубки. 1 – цилиндрическая трубка, 2, 3 – горячий и холодный выходы, 4 – тангенциальный ввод, 5 – конический дроссельный кран, 6 – гибкий стержень, 7 – жесткие спирали.

Сжатый воздух при давлении, контролируемом с помощью манометра, подавался в трубу через входной кран. Давление P_o менялось в пределах от 2 до 5 атм. Температура входного потока T_o и температура холодного воздуха T_c контролировались с помощью миниатюрных терморезисторов. Массовый расход воздуха измерялся в л/мин с помощью ротаметров, установленных перед тангенциальным входом и на выходе холодного воздуха. Для данного P_o эксперименты проводились для полного диапазона расходов горячего воздуха.

При сопоставлении результатов, полученных на различных конструкциях ВТ, удобно использовать термины, предложенные в [4]. Пусть P_o, P_c, P_h – давление, а T_o, T_c, T_h – температура входного, холодного и горячего потоков. Эффективность охлаждения $\Delta T_c = T_o - T_c$ зависит от относительного массового расхода холодного воздуха $\alpha = Q_c/Q_o$ где Q_c – массовый расход холодного воздуха, Q_o – массовый расход исходного газа. Холодопроизводительность трубы $q = \alpha \Delta T_c c_p$; где c_p – теплоемкость газа при постоянном давлении.

В качестве примера на рис. 3 показаны зависимости эффективности охлаждения и холодопроизводительности для давлений входного потока 2, 3, и 4 атм для разных α .

Эти зависимости имеют стандартный вид (см. напр. [5], [6]). Минимальные температуры выходного потока наблюдаются при относительном расходе холодного воздуха 0.1-0.3, а максимальная холодопроизводительность – при значениях α от 0.6 до 0.7. С ростом давления холодопроизводительность увеличивается, однако при этом минимальные температуры наблюдаются при меньших расходах холодного воздуха.

Хорошо известно, что закрученные потоки имеют спиральную структуру, причем шаг спирали h и угол

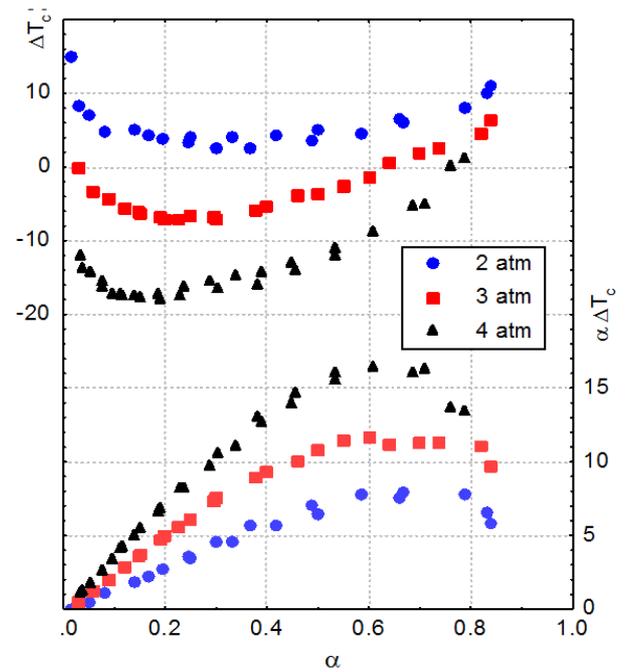


Рис. 3. Характеристики трубки Ранка для давлений P_o от 2 до 4 атм. $T_o = 21^\circ\text{C}$.

ϕ между тангенциальной и аксиальной скоростями с удалением от завихрителя увеличивается, а тангенциальная скорость примерно в 5 раз превышает аксиальную, направленную вдоль оси трубы [14]. Нами была сделана попытка снабдить внутреннюю поверхность трубы спиральной направляющей с параметрами закрутки, примерно соответствующими параметрам закрутки потока. Из медной проволоки диаметром 1 – 3 мм были навиты несколько спиралей с направлением закрутки, совпадающим с направлением закрученного потока. Спиралы с небольшим усилием вставлялись в горячий конец трубки, что предотвращало смещение спиралей при подаче сжатого воздуха. Однако испытания показали, что введение таких спиралей в камеру энергетического разделения сильно ухудшает показатели вихревой трубки в сравнении с характеристиками пустой трубки (Рис. 3).

Тогда были изготовлены несколько спиралей с противоположным направлением закрутки. Как оказалось, при введении таких спиралей в трубку Ранка массовый расход холодного воздуха увеличивается и одновременно понижается его температура (Рис. 4). Этот эффект устойчиво проявляется в диапазоне давлений 2-5 атм, хотя абсолютно лучшие результаты могут быть достигнуты при индивидуальной подгонке спирали. При расстояниях между спиралью и завихрителем 3-4 калибра падение температуры и рост потока холодного воздуха максимальны. Эффект зависит от ориентации спирали относительно оси трубки. Если спираль из положения максимальной производительности повернуть на небольшой угол вокруг своей оси, то температура холодного воздуха быстро растет. Небольшие измене-

ния в угле поворота ведут к существенным изменениям в температуре, что иллюстрирует рис. 4, где разброс значений максимален вблизи области, где наблюдается максимальная эффективность.

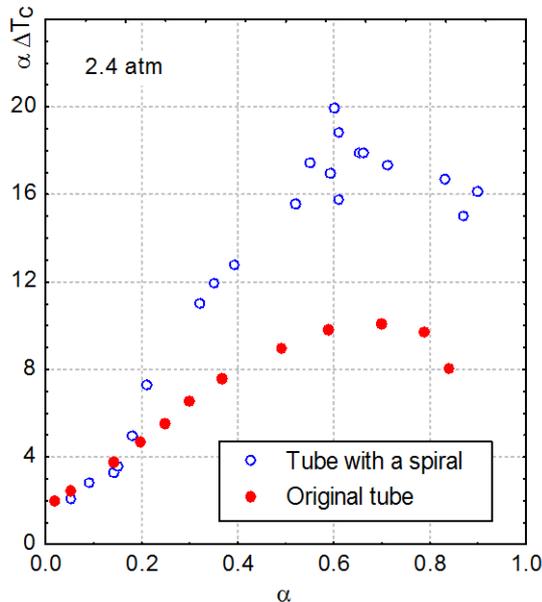


Рис. 4. Холодопроизводительность трубки с жесткой спиралью. $P_o = 2.4 \text{ atm}$, $T_o = 18^\circ\text{C}$, Медная спираль с диаметром 1.5 мм.

Следующий подход, реализованный нами, состоит в использовании вместо жесткой спирали пружинистых материалов. Гибкий стержень под влиянием потока воздуха должен деформироваться и менять форму в зависимости от входного давления, другими словами, самоподстраиваться под параметры закрученного потока. Как оказалось в результате опытов, слишком гибкие стержни сминаются потоком и прижимаются к поверхности о дросселя, а поведение более жестких стержней мало отличается от поведения жестких спиральных структур. Мы изменили конструкцию конического дросселя и установили на его оси два маленьких шарикоподшипника. В центральное отверстие шарикоподшипников вставлялась ось. На конец оси одевался отрезок гибкого провода. Гибкий стержень под влиянием потока мог свободно вращаться внутри трубы. Для наблюдения за изменениями формы гибкого стержня камера энергетического разделения была изготовлена из прозрачного материала.

Измерения показали, что использование такого вращающегося гибкого стержня также приводит к существенному повышению холодопроизводительности, хотя и уступает конструкции с жесткой спиралью (рис. 5). Эффективность охлаждения зависит от длины и жесткости гибкого стержня. При увеличении давления пространственный период h спирали, образуемой при вращении стержня, уменьшался, а при уменьшении давления стержень постепенно выпрямлялся. Для давления 3 атм оптимальная длина стержня около 80 мм. В целом для диапазона давлений 2-5 атм длина стержней лежит в диапазоне 70-110 мм, т.е. конец стержня в

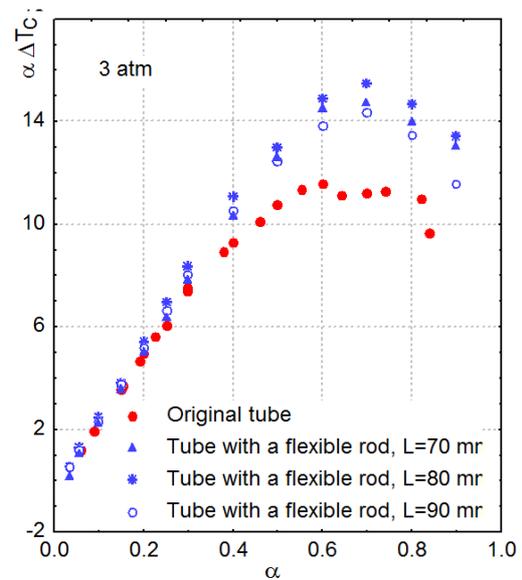


Рис. 5. Холодопроизводительность трубки с гибким стержнем. $P_o = 3 \text{ atm}$, $T_o = 16^\circ\text{C}$, диаметр стержня 4 мм.

стационарном состоянии не доходит до завихрителя на 3-6 калибров.

III. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наиболее неожиданным результатом проведенных экспериментов является противоположное потоку воздуха направление закрутки жесткой спирали. Из многочисленных экспериментов известно, что внутренняя поверхность трубы должна быть тщательно отполирована. С точки зрения существующих теорий температурное разделение потоков воздуха в трубе Ранка происходит на всей ее длине от завихрителя до крана. Поэтому следовало бы ожидать, что спираль с противоположным направлением закрутки должна привести к ухудшению температурного разделения, если не к его полному исчезновению. Однако эффект проявляется и при больших диаметрах проволоки, из которой изготавливались спирали – до 3-4 мм. Более того, спирали могут быть выполнены не только из металла, но и из металлической проволоки, покрытой слоем изоляции. В этом случае пространство, в котором может формироваться внутренний холодный вихрь уменьшается до 3-4 мм. Так как спираль плотно прижата к стенке трубы, то поток воздуха обтекает спираль, создавая дополнительные турбулентные вихри.

A. Когерентные спиральные структуры

Имеющиеся в литературе данные [14] о параметрах закрученных потоков для тангенциальных и улиточных завихрителей показывают, что параметры закрутки использованных в наших экспериментах спиралей близки к параметрам закрутки потоков в конструкциях с тангенциальными и улиточными завихрителями. Таким образом, размещенная в трубке спираль

на протяжении периода дважды пересекается потоком воздуха.

На наш взгляд, понимание происходящих процессов кроется в факте соответствия структуры спирали структуре потока. Наименьшие температуры внутреннего потока наблюдаются сразу после выхода потока из завихрителя [6], где плоскость вращения потока почти перпендикулярна оси трубки. На расстоянии 3-4 калибра от завихрителя параметры закрутки потока еще достаточно большие и поток пересекает спираль под острым углом. При каждом пересечении спирали поток отклоняется от своего первоначального направления в направлении плоскости, перпендикулярной оси трубы. Другими словами спираль увеличивает параметр закрутки потока. В то же время спираль создает дополнительное сопротивление выходящему потоку горячего воздуха, увеличивая тем самым массовый расход холодного воздуха. Кроме того молекулы внешнего горячего потока, соударяясь со спиралью, теряют часть своей энергии. В целом это может приводить к формированию внутреннего потока с меньшими температурами, чем в пустой трубке.

Вращающийся гибкий стержень под действием потока сжимается, принимая форму спирали, и видимо, процессы в этом случае аналогичны процессам, рассмотренным выше. Отличие состоит в том, гибкий стержень все время подстраивается под параметры потока, являясь самосогласующимся элементом. Меньшая эффективность охлаждения такого гибкого стержня на наш взгляд связана с тем, что его диаметр и жесткость одинаковы по всей длине стержня. Если выполнить такой стержень из материала с уменьшающейся жесткостью и/или уменьшающимся диаметром, то, скорее всего эффективность охлаждения будет не хуже чем у жесткой спирали.

В. Противовращение

Следующий важный факт – это вращение гибкой спирали в направлении, противоположном направлению вращению горячего потока воздуха. Видимо впервые эффект обратного вращения был замечен Финько [15], который отметил, что если ввести в ВТ стержень диаметром 2-4 мм, закрепленный другим концом в шарикоподшипнике, то он вращается в направлении, противоположном направлению основного потока. Мы установили, что любой предмет цилиндрической или многогранной формы, полый или сплошной, помещенный в трубку, вращается в противоположную сторону. Диаметр такого предмета может меняться от долей миллиметра (игла) до размеров, на 1-1.5 мм меньших диаметра трубки. Такие цилиндрические предметы, помещенные в трубку, также увеличивают холодопроизводительность [13], однако из-за ограниченного объема статьи мы не имеем возможности остановиться на связанных с этим решениях.

Как правило, частота вращения составляет 4-50 Гц и зависит от давления на входе. Вращающиеся в противоположном направлении предметы цилиндрической

формы медленно (0.2 - 1 Гц) прецессируют в направлении, совпадающем с направлением потока [16]. С механистической точки зрения такое вращение легко объяснить наличием в потоке микровихрей, имеющих соответствующее направление вращения (Рис. 6). Возникновение микровихрей, на наш взгляд, может происходить двумя путями. Во-первых, такие вихри могут формироваться уже в патрубке тангенциального ввода (Рис. 6а). Во-вторых, известно [17], что при движении осевого потока по изогнутой трубе возникают вторичные течения, имеющие вид двойного или одиночного парного вихря (Рис. 6б). В трубке Ранка такие вихри могут формироваться в самом завихрителе. После выхода из завихрителя плоскость вращения этих вихрей не будет перпендикулярна оси трубы, а отклонена на угол закрутки (угол между тангенциальной и осевой скоростями). Поэтому один из вихрей будет испытывать трение скольжения, сильно тормозиться стенкой и терять вращательную и поступательную энергию. Второй из вихрей будет “катиться” по стенке трубы, испытывать меньшие потери энергии и постепенно вытеснит первый вихрь к центру трубы.

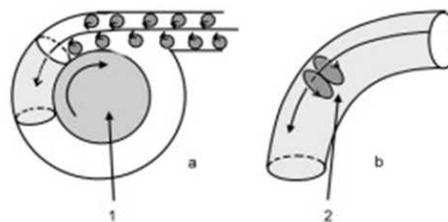


Рис. 6. Возможные способы формирования двух противорвращающихся микровихрей. 1 – вращающийся в противоположную сторону цилиндр, 2 – парный вихрь.

Направление вращения менее энергетичного вихря таково, что любой предмет, вставленный в трубку, будет вращаться в сторону, противоположную входному потоку. (Отметим, что полые цилиндры с отверстиями на боковых стенках вращаются в направлении, совпадающем с входным потоком). При встрече такого двойного вихря с неподвижной спиралью менее энергетичные микровихри, расположенные ближе к оси трубы, будут более интенсивно отклоняться к оси трубы, чем внешние “катящиеся” вихри (Рис. 7). Кроме того, при взаимодействии со спиралью может возникать большое число мелкомасштабных вихрей различной интенсивности. Характерный масштаб микровихрей, образование которых наблюдается при разрушении крупномасштабных вихрей, по оценкам [18], составляет около 1 мм.

Двойные спирали и более сложные вихревые структуры были найдены в трубке Ранка при исследовании поля оптической фазовой плотности методом гильберт – оптики [18] и поля скоростей методом лазерной доплеровской визуализации [19]. Некоторые вопросы возникновения и классификации вихревых структур рассмотрены в [20].

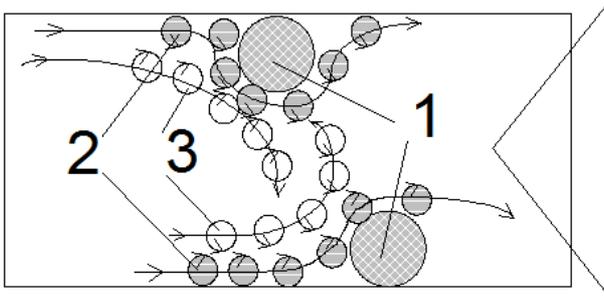


Рис. 7. Возможный механизм разделения двойных вихрей жесткой спиралью. 1 - жесткая спираль, 2 - внешний «катящийся» вихрь, 3 - внутренний более медленный вихрь.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены два сравнительно простых подхода, позволяющие повысить характеристики обычной трубки Ранка. Суть подходов в использовании некоторых спиральных структур, помещаемых в камеру энергетического разделения. Спиральные структуры могут быть жесткими и неподвижными или гибкими и вращающимися, однако их параметры закрутки должны соответствовать параметрам закрутки периферийного горячего потока. Другими словами, в наших опытах повышение холодопроизводительности связано с использованием некоторых когерентных структур.

Первая когерентная структура – это неподвижная жесткая спираль с обратным направлением завивки. Параметры закрутки (пространственный шаг и угол спирали) близки к параметрам закрутки потока воздуха. По сути спираль является зеркальным отражением потока воздуха. Такая спираль позволяет повысить холодопроизводительность на 25% и одновременно понизить температуру холодного воздуха.

Вторая когерентная структура – эластичный стержень. Под действием струи воздуха стержень трансформируется в спираль и вращается с частотой 4-50 Гц в направлении, обратном потоку воздуха через тангенциальный ввод. Гибкий стержень является самосогласующимся элементом, легко меняющим форму под действием потока. Эффективность вращающихся гибких стержней в наших экспериментах была ниже, чем для жесткой спирали, что связано с особенностями использованного материала.

Основываясь в основном на факте обратного вращения объектов, помещаемых в вихревую трубу, мы предположили, что механизм, приводящий к повышению производительности вихревой трубы, связан со сложной структурой периферийного горячего потока воздуха, состоящего по крайней мере из двух потоков с противовращающимися микровихрями. Возмущение этих потоков когерентными структурами улучшает условия разделения микровихрей с различными энергиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ranque G.J. Experiences sur la D?tente Gira-taire avec Productions Simultanees d'un Ec-happement d'Air Chaud et d'Air Froid. *J. de Physique et le Radium Series*, 4:112, 1933.
- [2] US Patent No 1,952,281 from March, 1934. Ranque G.J. Method and apparatus for obtaining from fluid under pressure two currents of fluids at different temperatures.
- [3] Hilsch R. Die Expansion von Gasen in Zen-trifugalfeld als Kaeltersprocess. *Zeitschrift fur Naturforschung*, (1), 1946.
- [4] Hilsch R. The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as Cooling Process. *Review of Scientific Instruments*, 18(2):108-111, 1947.
- [5] Меркулов А.П. *Вихревой эффект и его применение в технике*. Машиностроение, М., 1969. 183 с.
- [6] Гутта Ф., Лили Д., Сайрд Н. *Закрученные потоки*. Мир, М., 1987.
- [7] Гуцол А.Ф. Эффект Ранка. *Review of Scientific Instruments*, 167(6):665-687, 1997.
- [8] Kurosaka M. Acoustic Streaming in Swirling Flow and the Ranque-Hilsch (Vortex Tube) Effect. *J. Fluid Mech.*, 124:139, 1982.
- [9] Tarunin E.L., Alikina O.N. Computational experiments for Ranque-Hilsch vortex tube. //Proceed. Intern. Conf. RDRAMM, V.6, N2, p.363-371, 2001.
- [10] Perez-Saborid M., Herrada M.A., Gomez-Barea A., Barrero A. Downstream evolution of unconfined vortices: mechanical and thermal aspects. *J. Fluid Mech.*, 471:51-70, 2002.
- [11] Гольдшттик М.А., Штерн В.Н., Яворский Н.И. *Вязкие течения с парадоксальными свойствами*. Наука, Новосибирск, 1989.
- [12] RF patent No 2205335 from 08.11.2001. Vasiljev V.N., Visheratin K.N., Zarenkov A.A., Kolomiets C.M. Vortex tube.
- [13] RF patent No 2211414 from 25.01.2002. Vasiljev V.N., Visheratin K.N., Zarenkov A.A., Kolomiets C.M. Vortex tube.
- [14] *Аэродинамика закрученных потоков*. Под ред. Р.Б.Ахмедова. Мир, М., 1977. 240 с.
- [15] Финько В.Е. Особенности охлаждения и сжижения газа в вихревом потоке. *ЖТФ*, 53:1770-1776, 1983.
- [16] Kolomiets S. M., Vasiljev V.I., Visheratin K.N., Zarenkov A.A. Ranque Vortex Tube - Some Ways to Raised Efficiency. International conference "Fluxes and Structures in Fluids Sanct Petersburg, June 23-26, , p.92-93, 2003.
- [17] Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Мордасов А.П. *Закрученные потоки в гидротехнических сооружениях*. Энергатоиздат, М., 1990. 280 с.
- [18] Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н., Лебедев А.В.,Правдина М.Х., Яворский Н.И. Наблюдение крупномасштабных гидродинамических структур в вихревой трубке и эффект Ранка. *Письма в ЖТФ*, 23(23):84-90, 1997.
- [19] Белоусов П.П., Белоусов П.Я., Дубнищев Ю.Н. Лазерная доплеровская визуализация поля скоростей в закрученном потоке Ранка. *Письма в ЖТФ*, 28(16):6-11, 2002.
- [20] Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L., Shtork S.I. Helical vortices in swirl flow. *J. Fluid Mech.*, 382:195-243, 1999.