

УДК 533.697.3

doi: 10.32620/aktf.2019.3.02

А. С. КУЛИК, Д. В. СОКОЛ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА РАНКА-ХИЛША ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВИХРЕВЫМИ ЭНЕРГОРАЗДЕЛИТЕЛЯМИ**

Предметом изучения в статье являются процессы в системах управления с использованием вихревых энергоразделителей. *Целью* является анализ вихревых энергоразделителей, в которых наблюдается эффект Ранка-Хилша. *Задачи*: рассмотрение истории открытия, сущность и применение эффекта Ранка-Хилша; обзор основных конструкций вихревых энергоразделителей; рассмотрение возможных вихревых энергоразделителей и особенностей управления ими; выделение актуальных направлений исследований. Получены следующие **результаты**. В работе рассмотрено устройство вихревого энергоразделителя, в котором проявляется эффект Ранка-Хилша. Описан ряд основных параметров, по которым определяют эффективность работы вихревого энергоразделителя и производятся расчеты для повышения его КПД. Представлены результаты исследования, связанные с влиянием габаритных размеров вихревого энергоразделителя, формой, размерами и количеством входных сопел на его эффективность. Описаны основные виды конструкций вихревых энергоразделителей: противоточный и проточный. Наиболее популярным вариантом получения описательной модели вихревого энергоразделителя является использование уравнений термо- и гидродинамики. Однако для дальнейшего управления системами, базирующимися на использовании эффекта Ранка-Хилша, такой подход не является практичным. Для этого применяются иные способы определения математической модели вихревого энергоразделителя, связанные обработкой его экспериментальных частотных характеристик. С целью получения точных и адекватных результатов коррекции системы с вихревым энергоразделителем применяется метод интервальных логарифмических амплитудно-частотных характеристик, причем структура его математической модели имеет дробные показатели степени. Представлены актуальные направления исследований вихревых энергоразделителей и варианты их практического использования в двигателестроении, медицине, акустических системах, промышленности, системах терморегуляции, авиации. **Выводы**. Научная значимость приведенного обзора состоит в следующем: определение актуальных направлений различного рода научных исследований.

Ключевые слова: эффект Ранка-Хилша; вихревой энергоразделитель; система управления; математическая модель.

Введение

В современных энергетических технологиях находят применение нетрадиционные способы преобразования энергии. Одним из них является способ, основанный на вихревом эффекте Ранка-Хилша [1], который заключается в разделении потока газа на его холодную и горячую составляющие.

Впервые этот эффект был открыт в 1932 г. французским инженером Жозефом Ранком [2] при исследовании процессов, происходящих в устройствах для очистки газа от пыли. В 1946 г. немецкий исследователь Рудольф Хилш предложил усовершенствованную конструкцию вихревого энергоразделителя [3], которая в последствии была внедрена в промышленность. Поэтому этот эффект называется эффектом Ранка-Хилша.

В Советском Союзе впервые исследования эффекта Ранка-Хилша провели В. С. Мартыновский и В. П. Алексеев [4-7] в 1952 г. В их работах пред-

ставлены результаты исследования самого процесса энергоразделения и его практическое применение.

Задачами разработки методов расчета и конструирования вихревых энергоразделителей занимался А. П. Меркулов [8]. Помимо исследования эффекта Ранка-Хилша в своей работе он рассматривал эффективность вихревого энергоразделителя, влияние на нее различных факторов, что подтверждал результатами термодинамического и газодинамического исследования.

Задачу практического применения вихревых энергоразделителей решал А. Д. Суслов [9]. Им было предложено использование вихревых энергоразделителей для сепарации газовых смесей, нагрева и охлаждения газов и различных устройств, применение вихревых энергоразделителей в отраслях народного хозяйства.

К концу XX века учеными всего мира было выдвинуто существенное количество идей и теорий по применению эффекта Ранка-Хилша. За систематиза-

цию накопленных знаний впервые взялся А. Ф. Гуцол [10]. Как результат – он провел анализ существующих теорий, объясняющих вихревой эффект, выявил их недостатки и противоречия, и выдвинул собственную идею физической природы данного эффекта. А. Ф. Гуцол предложил рассматривать поток газа как совокупность микрообъемов, имеющих разную скорость движения.

Развитие нескольких способов преобразования энергии приводит к тому, что каждый из них находит свое практическое и научное место применения. Таким образом, развитие технологий, работающих на эффекте Ранка-Хилша, привело к определенным тенденциям их использования в определенных областях знаний. За рубежом эффект Ранка-Хилша нашел свое применение в различных системах управления [11-13]. В Украине вихревые энергоделители эксплуатируются в автомобильной, нефтегазовой и химической промышленности [14-16].

Целью данной работы является аналитический обзор исследований по применению эффекта Ранка-Хилша с точки зрения возможности управления процессом энергоделения потока воздуха.

1. Постановка задачи исследования

Для выявления основных актуальных направлений исследований физических процессов в вихревых энергоделителях, а также их практические применения в системах управления, требуется про-

вести аналитический обзор исследований и публикаций.

2. Физическая сущность эффекта Ранка-Хилша

Рассмотрим на примере устройства вихревого энергоделителя (рис. 1) [2].

Устройство состоит из корпуса, тангенциального входного сопла, диафрагмы, регулирующего клапана и отверстия под выходные потоки воздуха.

Главной отличительной особенностью вихревого энергоделителя является его способность разделять входной газ высокого давления на холодный и горячий потоки. Когда газ высокого давления тангенциально поступает в вихревой энергоделитель через одно или несколько впускных сопел, его расширение создает быстро вращающийся вихрь. Вращающийся газ проходит по периферийным слоям энергоделителя, часть его покидает ее в виде горячего потока воздуха, а другая часть отводится назад вдоль центральной оси с помощью регулирующего клапана. По сравнению с входным потоком периферия энергоделителя имеет высокую температуру, а центральная часть имеет низкую температуру. Несмотря на внешне простой энергетический процесс и множества вариантов его описания [10, 17, 18], не существует ни одного, который можно было назвать единственно верным.

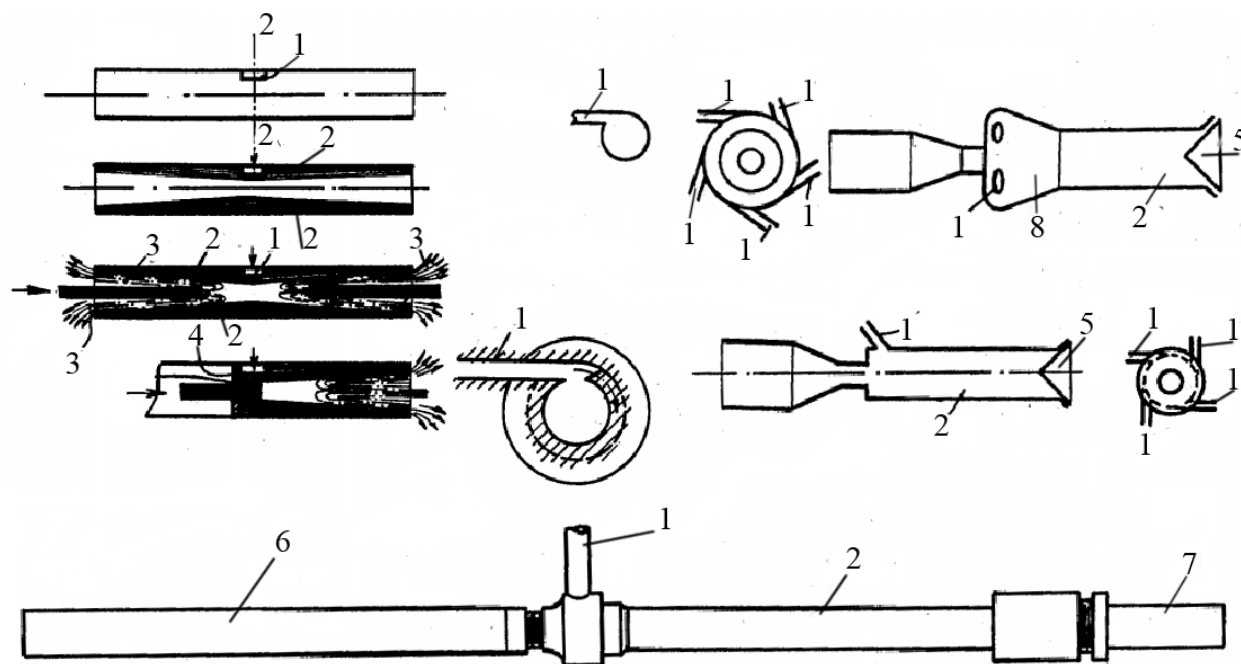


Рис. 1. Схематическое изображение устройства вихревого энергоделителя: 1 – тангенциальное входное сопло; 2 – вихревой энергоделитель; 3 – выходящие потоки воздуха; 4 – диафрагма; 5 – регулировочный клапан; 6 – цилиндр, подсоединенный к выходу холодного потока воздуха; 7 – цилиндр, подсоединенный к выходу горячего потока воздуха; 8 – камера в форме усеченного конуса

Вихревой энергоразделитель не имеет движущихся частей, компактен по размеру, и их конструкция проще, чем другие холодильные системы. С самого начала изучения эффекта Ранка-Хилша были определены основные параметры, которые наиболее подвержены влиянию внешних факторов, сами могут влиять на климатические параметры и быть зависимыми от управляющего воздействия. В работах А. П. Меркулова [8] и А. Д. Суслова [9] для того, чтобы оценить эффективность вихревого энергоразделителя, был введен ряд параметров: КПД, весовой расход сжатого воздуха G , температурная эффективность η , изобарная теплоемкость c_p , общая холодо- Q_x и теплопроизводительность Q_t , весовая доля потока μ , падение температуры воздуха ΔT и ряд других.

3. Основные конструкции вихревых энергоразделителей

Одним из первых способов повышения эффективности вихревых энергоразделителей было изменение их конструкций.

Наиболее простыми и очевидными изменяемыми параметрами были размеры энергоразделителя: длина, его внешний и внутренний диаметры, а также диаметры входных и выходных отверстий. Казалось бы, что найти взаимосвязь между размерами и эффективностью – задача тривиальная и не требует большого числа исследований, хотя исследования в этом направлении проводятся и на текущий момент [19-21]. Однако большинство предложенных работ лишь повторяют результаты предыдущих.

После определения оптимальных размеров вихревого энергоразделителя на первое место стала задача выбора входного сопла. Так еще в работе А. П. Меркулова [8] были проведены расчеты, показы-

вающие влияние формы входного сопла на характеристики вихревого энергоразделителя. Экспериментальными исследованиями по вопросу поиска ее оптимальных размеров занимались [22-24]. И, опять же, не смотря на наличие большого числа подобных работ, их результаты доказывают сделанные намного ранее выводы.

На протяжении поисков конструкции, которая давала бы наибольшую эффективность, нашли обширное применение два вида энергоразделителя: противоточный и прямоточный (рис. 2) [25]. У противоточного вихревого энергоразделителя отверстия горячего и холодного потоков воздуха находятся на его противоположных концах; в то время как у прямоточного вида эти отверстия расположены с одного конца (в противоположном от входного сопла), что реализовано за счет использования специального регулирующего клапана.

Однако с годами пришли к выводу, что в противоточном энергоразделителе диапазон изменения температуры холодного воздуха значительно шире по сравнению с видом прямоточного энергоразделителя [26-28].

В работах [29-31] были представлены вихревые энергоразделители, отличающиеся от вышеупомянутых видов геометрий, количеством входных сопел, числом потоков и другими критериями.

4. Математическая модель вихревого энергоразделителя

Ряд работ киевского академика А. А. Халатова посвящен детальному пошаговому описанию процессов, происходящих в вихревом энергоразделителе, с позиции теплообмена и гидродинамики [32-35]: начиная с моделей турбулентности и заканчивая математическим описанием и методами расчета закрученных потоков.

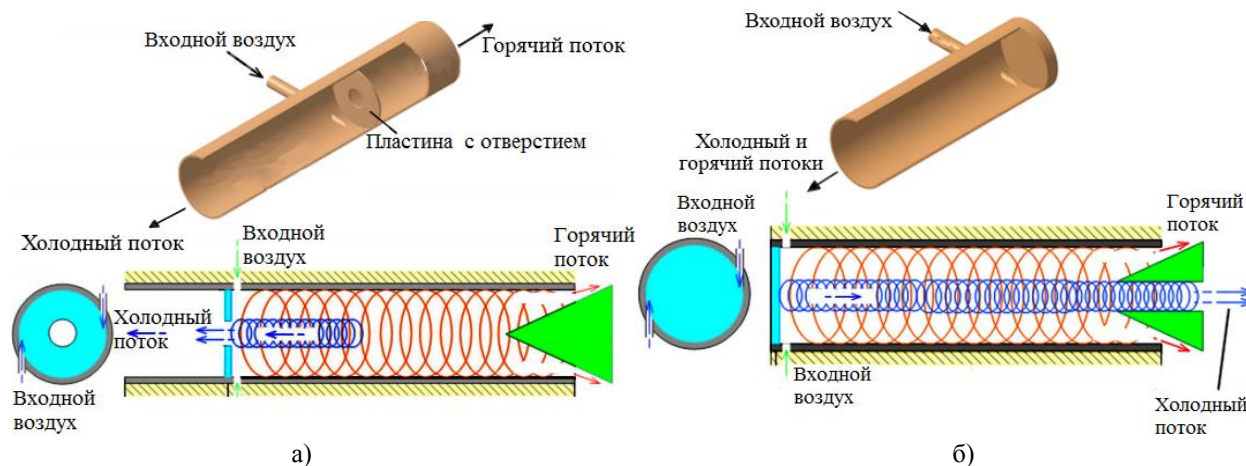


Рис. 2. Иллюстрация эффекта Ранка-Хилша в противоточном (а) и прямоточном (б) вихревых энергоразделителях

В своей работе [36] он обобщил экспериментальные данные о параметрах вихревого энергоразделителя, тем самым представил зависимость между формой сечения канала, числами Рейнольдса и фактором аналогии Рейнольдса.

Зависимость между входными и выходными параметрами вихревого энергоразделителя была однозначно определена, несмотря на отсутствие полного понимания процесса энергоразделения. Выходные параметры подвергаются наибольшему влиянию при изменении давления и температуры входного воздуха и положению дросселя, регулирующего выход нецелевого потока воздуха (горячего потока – в охлаждаемых вихревых энергоразделителях, холодного потока – в нагреваемых энергоразделителях) [37-39]. Общая холодо- и теплопроизводительность вихревого энергоразделителя представлена как [39]

$$Q_x = G \mu c_p \Delta T_x; \quad (1)$$

$$Q_r = G = (1 - \mu) \Delta T_r, \quad (2)$$

где ΔT_x – среднемассовое значение снижения температуры охлажденного потока, К;

ΔT_r – среднемассовое значение снижения температуры подогретого потока, К.

Для того чтобы управлять выходными параметрами, разрабатываются системы управления с использованием различных принципов управления.

В диссертационной работе Н. В. Скибицкого [40] было отмечено, что объекты, имеющие неопределенности измерений (коим и является вихревой энергоразделитель), требуют особого подхода к решению задач идентификации и управления. Для описания такого вида неопределенности необходимо использовать интервальную модель объекта, когда неопределенные параметры задаются не в виде точечных значений, а в виде интервалов их возможных значений.

В работе [41] С. Н. Пасичника к исследованию вихревого энергоразделителя был применен иной подход. Он рассматривал вихревой энергоразделитель как объект с бесконечным числом переменных состояний. Причиной этому также стала неопределенность измерений, таким образом, он пришел к выводу, что наиболее адекватная математическая модель вихревого энергоразделителя имеет структуру с дробными показателями степени. Это значит, что динамика движения внутри него описывается дробными производными. Предложенный оператор передачи представлен в следующем виде [41]:

$$\bar{W}_{вэ}(s) = \frac{\bar{Q}_x(s)}{\bar{Z}(s)} = \frac{\bar{k}_{вэ}}{(\bar{T}_1 s + 1)^{\bar{\nu}_1} (\bar{T}_2 s + 1)^{\bar{\nu}_2}}, \quad (3)$$

где $\bar{W}_{вэ}(s)$ – интервальная передаточная функция ВЭ по управляющему воздействию;

$\bar{Q}_x(s)$ – изображение управляемой величины – потока энтальпии холодного воздуха;

$\bar{Z}(s)$ – изображение управляющего воздействия – линейного положения регулирующего органа вентиля;

$\bar{k}_{вэ} = [-1,7 \cdot 10^5; -9 \cdot 10^4]$ Вт/м – интервальное значение коэффициента передачи вихревого энергоразделителя;

$\bar{T}_1 = [11,8; 20]$ с, $\bar{T}_2 = [1,5; 1,66]$ с – интервальные значения постоянных времени;

$\bar{\nu}_1 = [0,2; 0,46]$, $\bar{\nu}_2 = [0,72; 1,79]$ – интервальные значения показателей степени.

Из-за того, что не существует однозначного уравнения, описывающего эффект Ранка-Хилша с учетом всех влияющих на него факторов, математическая модель вихревого энергоразделителя формируется только на основании экспериментальных характеристик. В работе [42] предлагается аппаратно-программный комплекс (рис. 3), позволяющий получать необходимые экспериментальные характеристики вихревого энергоразделителя.

Решение задачи идентификации структуры и параметров математической модели вихревого энергоразделителя на основе экспериментальных частотных характеристик в условиях интервальной неопределенности представлено в работе [43].

Одним из основных этапов синтеза системы автоматического управления является коррекция динамических свойств системы, или же синтез корректирующего устройства. Для получения наиболее точных результатов коррекции системы с вихревым энергоразделителем в работах [44, 45] применяется метод интервальных логарифмических амплитудно-частотных характеристик. Особенность математической модели вихревого энергоразделителя также сказывается на простом анализе качества системы, так как она не позволяет использовать готовые пакеты программ (MatLab, MathCAD, Maple) для построения динамических характеристик.

Однако большинство работ, связанных с разработкой различных систем управления на базе вихревого энергоразделителя, упрощают его математическую модель, так как целью реализации таких систем является не исследование эффекта Ранка-Хилша с точки зрения продуктивного управления, а практическое применение этого эффекта [27, 46]. По этой же причине для улучшения показателей качества таких систем используют классический ПИД-регулятор [47, 48].

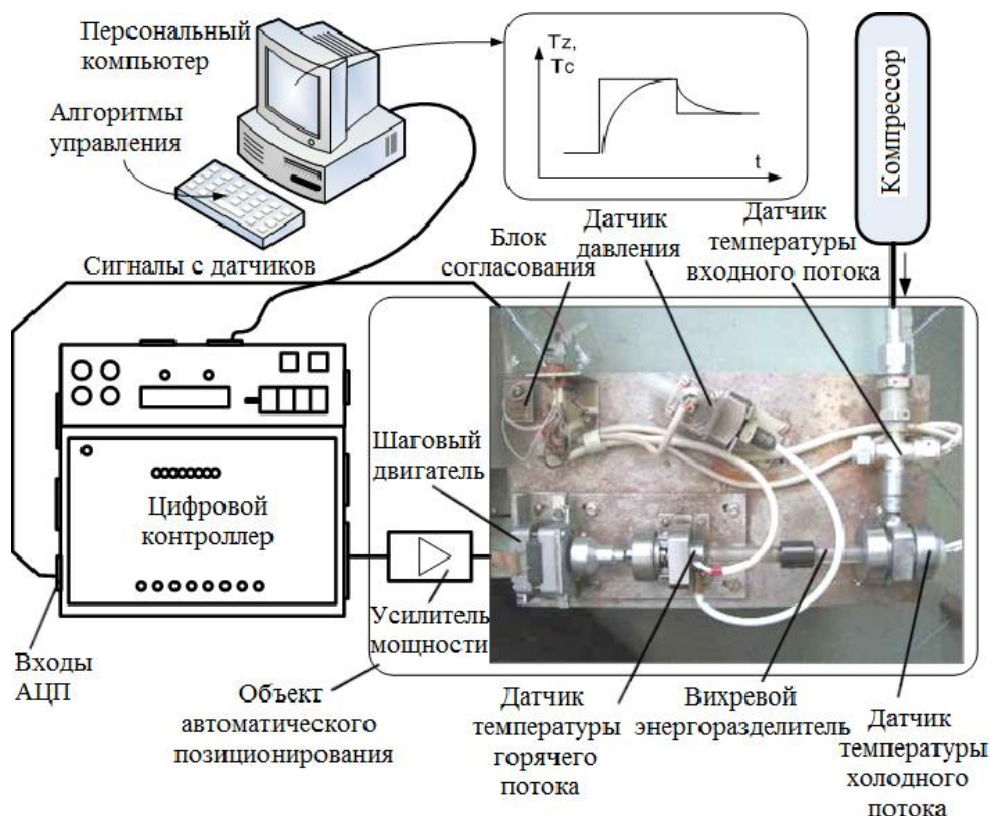


Рис. 3. Схема связи аппаратных средств аппаратно-программного комплекса для исследования вихревого энергоделителя

Впрочем, пока еще отсутствует информация о применении рационального управления [49] к такому особому роду объектам, как вихревой энергоделитель. Использование такого подхода может облегчить расчеты, связанные с его математической моделью, повысить эффективность работы вихревого энергоделителя по сравнению с [45], а также выявлять дестабилизирующие воздействия на систему [50] и парировать устраняемые причины этих воздействий.

5. Актуальные направления исследований

К настоящему времени уже сформировались основные направления в исследовании эффекта Ранка-Хилша. Ученые ряда стран занимаются прикладными задачами применения вихревых энергоделителей. Так, зарубежные ученые проводят исследования в двигателестроении [51-53], медицине (рис. 4) [48, 54, 55], акустических системах [56, 57], промышленности [58, 59], системах терморегуляции [60, 61], авиации [59, 62].

На сегодняшний день наиболее известными учеными в этом направлении также являются Ш. А. Пиралишвили (Россия) [63, 64], Mohammad O. Hamdan (OAE) [65, 66], Smith Eiamsa-ard (Таиланд) [67, 68]. В Украине с вихревыми энергоделителями работают для очищения газов [69] и в автомобилестроении [14], также в Украине массово производятся вихревые энергоделители для личного использования или в промышленности в составе рефрижераторных систем и систем охлаждения.

Заключение

В работе рассмотрены основные виды конструкций вихревого энергоделителя: противоточный (преимущественно используется именно он) и прямоточный. Приведены работы, содержащие в себе получение описательной модели вихревого энергоделителя при помощи уравнений термо- и гидродинамики. Отмечены используемые подходы к управлению системами, основанными на эффекте Ранка-Хилша. Обозначены актуальные на сегодняшний день направления использования вихревых энергоделителей в мире.

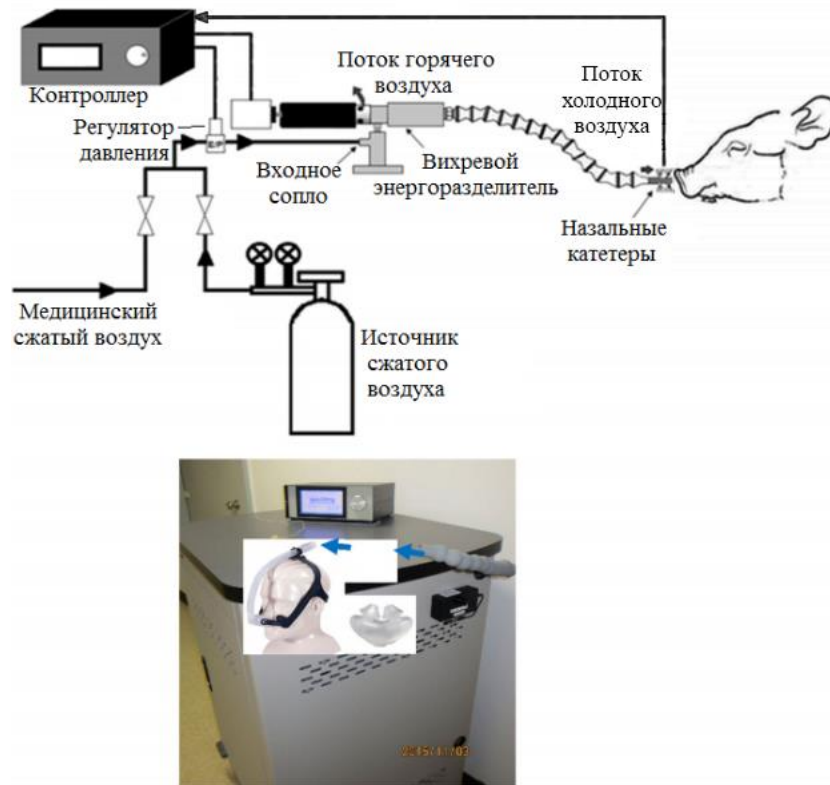


Рис. 4. Схематическое изображение клинического прототипа с контуром охлаждения, используемого для интраназального охлаждения мозга

Литература

1. Ranque, G. J. Experiments on Expansion in a Vortex with Simultaneous Exhaust of Hot Air and Cold Air [Text] / G. J. Ranque // *Le Journal de Physique et le Radium*. – 1933. – Vol. 4, no. 6. – P. 112-114.

2. Пат. 20060101 США, МПК F25B 9/02, F25B 9/04. Method and apparatus for obtaining from a fluid under pressure two currents of fluids at different temperatures [Text] / Ranque G. J.; заявитель и патентообладатель Ranque G. J. – № 1952281; заявл. 06.12.32; опублик. 27.03.34, – 1 с. : ил.

3. Hilsch, R. Die Expansion von Gasen im Zentrifugalfeld als Kälteprozess [Text] / R. Hilsch // *Zeitschrift für Naturforschung*. – 1946. – Vol. 1, no. 4. – P. 208-214.

4. Мартыновский, В. С. О холодильном эффекте вихревой трубы [Текст] / В. С. Мартыновский, Л. З. Мельцер // *Холодильная техника*. – 1952. – Вып. 4. – С. 51-53.

5. Мартыновский, В. С. Вихревой эффект охлаждения и его применение [Текст] / В. С. Мартыновский, В. П. Алексеев // *Холодильная техника*. – 1953. – Вып. 3. – С. 63-67.

6. Мартыновский, В. С. Термодинамический анализ эффекта вихревого температурного разделения газов и паров [Текст] / В. С. Мартыновский, В. П. Алексеев // *Теплоэнергетика*. – 1955. – Вып. 11. – С. 31-34.

7. Мартыновский, В. С. Исследование эффекта вихревого температурного разделения газов и паров

[Текст] / В. С. Мартыновский, В. П. Алексеев // *ЖТФ*. – 1956. – Т. 26. – Вып. 10. – С. 2303-2315.

8. Меркулов, А. П. Вихревой эффект и его применение в технике [Текст] / А. П. Меркулов. – М. : Машиностроение, 1969. – 185 с.

9. Вихревые аппараты [Текст] / А. Д. Сулов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин, Ю. В. Чижииков. – М. : Машиностроение, 1985. – 256 с.

10. Гуцол, А. Ф. Эффект Ранка [Текст] / А. Ф. Гуцол // *Успехи физических наук*. – 1997. – Т. 167, № 6. – С. 665-687. doi: 10.3367/UFNr.0167.199706e.0665.

11. Алексеенко, В. П. Разработка и исследование вихревых систем термостатирования авиационного оборудования [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.07.07 / Алексеенко Василий Петрович ; Сам. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королёва. – Самара, 2002. – 23 с.

12. Jonathon, M. N. The Ranque-Hilsch vortex tube and its application to spacecraft environmental control systems [Text] / M. N. Jonathon // *NASA. Manned Spacecraft Center*. – 1970. – 35 p. doi: 10.13140/RG.2.1.1182.2481

13. Computer Controlled Vortex Tube Refrigerator Unit, with SCADA [Электронный ресурс] / Edibon. *Technical Teaching Equipment*. – 2016. – 15 p. – Режим доступа: <http://www.edibon.com/en/files/equipment/TPVC/catalog>. – 16.05.2019 г.

14. Возный, А. В. Дисково-колодочный тормоз с принудительным охлаждением типа «вихревая труба»: конструкция, теория и расчет (часть пер-

вая) [Текст] / А. В. Возный // Проблемы тертя та эношування. – 2015. – Т. 4, № 69. – С. 51-57.

15. Бетлинский, В. Ю. Двухпоточные регулируемые вихревые трубы в промышленных установках очистки и осушки газов [Текст] / В. Ю. Бетлинский, М. А. Жидков, В. П. Овчинников // Газовая промышленность. – 2008. – С. 72-75.

16. Трехпоточные вихревые трубы в нефтедобывающей и газовой промышленности (аналитический обзор) [Текст] / А. П. Рябов, А. П. Гусев, М. А. Жидков, Д. А. Жидков // Нефтегазовые технологии. – 2007. – С. 2-7.

17. Аликина, О. Н. Гидродинамика и теплообмен в вихревой трубке Ранка-Хилша (вычислительный эксперимент) [Текст] : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.05 / Аликина Ольга Николаевна ; Пермский гос. ун-т. – Пермь, 2003. – 122 с.

18. Вишератин, К. Н. Гидродинамика вихревых холодильных устройств (трубок Ранка) [Электронный ресурс] / К. Н. Вишератин, М. В. Калашиник – 2013. – 3 с. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/315107632_GIDRODINA_MIKA_VIHREVIH_HOLODILNYH_USTROJSTV_TRUBOK_RANKA. – 16.05.2019 г.

19. Hamdan, M. O. Experimental analysis on vortex tube energy separation performance [Text] / M. O. Hamdan, E. Elnajjar // Heat Mass Transfer. – 2011. – P. 1637-1642. doi: 10.1007/s00231-011-0824-6.

20. Numerical investigation on flow behavior and energy separation in a micro-scale vortex tube [Text] / N. Rahbar, M. Taherian, M. Shateri, M. S. Valipour // Thermal Science. – 2015. – Vol. 19, no. 2. – P. 619-630. doi: 10.2298/TSCI120316206R.

21. Кукис, В. С. Оптимизация параметров вихревой трубы [Текст] / В. С. Кукис, Д. В. Шабалин, Е. А. Омельченко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – Ч. 2, № 10. – С. 66–70. doi: 10.18454/IRJ.2227-6017.

22. Nimbalkar, S. An experimental investigation of the optimum geometry for the cold end orifice of a vortex tube [Text] / S. Nimbalkar, M. R. Muller // Applied Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29, no. 2-3. – P. 509-514. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.03.032.

23. Experimental study on a simple Ranque-Hilsch vortex tube [Text] / C. M. Gao, K. J. Bosschaart, J. C. H. Zeegers, A. T. A. M. de Waele // Cryogenics. – 2005. – Vol. 43, no. 3. – P. 173-183. doi: 10.1016/j.cryogenics.2004.09.004.

24. Gao, C. Experimental study on the Ranque-Hilsch vortex tube [Text] / C. Gao // Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven. – 2005. – P. 151. doi: 10.6100/IR598057.

25. Eiamsa-Ard, S. Experimental investigation on energy separation in a counter-flow Ranque-Hilsch vortex tube: Effect of cooling a hot tube [Text] / S. Eiamsa-Ard, K. Wongcharee, P. Promvong // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 37, no. 2. – P. 156-162. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.09.013.

26. Eiamsa-Ard, S. Review of Ranque-Hilsch effects in vortex tubes [Text] / S. Eiamsa-Ard, P. Promvong // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2008. – Vol. 12, no. 7. – P. 1822-1842. doi: 10.1016/j.rser.2007.03.006.

27. Хаит, А. В. Исследование эффекта энерго-разделения с целью улучшения характеристик вихревой трубы [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.04.13 / Хаит Анатолий Вильич ; Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2012. – 24 с.

28. Katanoda, H. Energy Separation Mechanism in Uni-Flow Vortex Tube Using Compressible Vortex Flow [Text] / H. Katanoda, M. H. bin Yusof // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. – 2014. – Vol. 8, no. 6. – P. 937-940.

29. Devade, K. D. Comparative Study of Short Straight Divergent Vortex Tube and Long Convergent Vortex Tube [Text] / K. D. Devade // Proceedings of 3rd International Conference on Recent Trends in Engineering & Technology (ICRTET'2014), Chandwad, 28-30 March 2014. – Chandwad, 2014. – P. 978-993.

30. Jadhav, S. S. Experimental Investigation of Multi Nozzle Vortex Tube [Text] / S. S. Jadhav, K. D. Devade // Special Issue on International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering (IJTARME). – 2018. – Vol. 7, no. 1. – P. 16-21.

31. Thermodynamics of the Ranque-Hilsch effect in the three-flow vortex tubes [Text] / M. A. Zhidkov, V. A. Devisilov, D. A. Zhidkov, O. V. Kirikova, V. S. Spiridonov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2015. – Vol. 49, no. 4. – P. 523-531. doi: 10.1134/S0040579515040211.

32. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Том 1. Криволинейные потоки [Текст] / А. А. Халатов, А. А. Авраменко, И. В. Шевчук. – Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 1996. – 290 с.

33. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Том 2. Вращающиеся системы [Текст] / А. А. Халатов, А. А. Авраменко, И. В. Шевчук. – Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 1996. – 288 с.

34. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Том 3. Закрученные потоки [Текст] / А. А. Халатов, А. А. Авраменко, И. В. Шевчук. – Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2000. – 474 с.

35. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Том 4. Инженерное и технологическое оборудование [Текст] / А. А. Халатов, А. А. Авраменко, И. В. Шевчук. – Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2000. – 212 с.

36. Халатов, А. А. Обобщение опытных данных по фактору аналогии Рейнольдса для интенсификаторов теплообмена различного типа [Текст] / А. А. Халатов, А. В. Окишев, В. Н. Онищенко // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 5. – С. 5-13.

37. Алексеенко, В. П. Расчет характеристик вихревых систем термостатирования [Текст] / В. П. Алексеенко, А. С. Стукалов, П. Ю. Якимов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11, № 5. – С. 170-176.
38. Кулик, А. С. Экспериментальное исследование характеристик вихревого энергоразделителя [Электронный ресурс] / А. С. Кулик, С. Н. Пасичник, В. Г. Джулгаков // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 3. – С. 65-68. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2010_3_11. – 17.05.2019 г.
39. Пиралишвили, Ш. А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш. А. Пиралишвили, В. М. Поляев, М. Н. Сергеев; под общ. ред. А. И. Леонтьева. – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 412 с.
40. Скибицкий, Н. В. Интервальные методы в задачах построения моделей объектов и процессов управления [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Скибицкий Никита Васильевич; М. энергетический ин-т (техн. ун-т) – М., 2005. – 40 с.
41. Кулик, А. С. Идентификация математической модели вихревого энергоразделителя [Электронный ресурс] / А. С. Кулик, С. Н. Пасичник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 10. – С. 192-196. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2010_10_43. – 17.05.2019 г.
42. Кулик, А. С. Апаратно-програмний комплекс для дослідження вихрового ефекту [Текст] / А. С. Кулік, В. Г. Джулгаков, С. М. Пасічник // *Вісник ХНТУСГ*. – 2010. – Вып. 102. – С. 85-87.
43. Кулик, А. С. Идентификация математической модели вихревого энергоразделителя в частотной области [Электронный ресурс] / А. С. Кулик, С. Н. Пасичник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 7. – С. 192-196. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2012_7_38. – 17.05.2019 г.
44. Кулик, А. С. Синтез системы позиционирования потока энтальпии вихревого энергоразделителя [Электронный ресурс] / А. С. Кулик, С. Н. Пасичник // *Системы обработки информации*. – 2010. – Вып. 6. – С. 115-121. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2010_6_26. – 17.05.2019 г.
45. Пасичник, С. Н. Решение задачи стабилизации температуры воздуха в кабине транспортного средства [Текст] / С. Н. Пасичник, Д. В. Сокол // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – Вып. 4. – С. 12-19. doi: 10.32620/aktit.2018.4.02.
46. Вихревые устройства в системах вентиляции [Текст]: науч. изд. / Я. А. Гусенцова [и др.]; Восточноукраинский нац. ун-т им. Владимира Даля. – Луганск: [б.и.], 2006. – 296 с.
47. Sreeraj, P. V. Design and Implementation of PID Controller with Lead Compensator for Thermal Process [Text] / P. V. Sreeraj // *International Journal of Computer Applications*. – 2013. – Vol. 67, no. 1. – P. 26-31. doi: 10.5120/11361-6593.
48. A new approach to selective brain cooling by a Ranque-Hilsch vortex tube [Text] / M. B. Fazel, Y. Wang, L. Keenlside, T.-Y. Lee // *Intensive Care Medicine Experimental*. – 2016. – Vol. 4, no. 1. – 14 p. doi: 10.1186/s40635-016-0102-5.
49. Кулик, А. С. Элементы теории рационального управления объектами [Текст]: монография / А. С. Кулик. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2016. – 255 с.
50. Сокол, Д. В. Переваги використання принципу управління за діагнозом для управління вихровим енергороздільником [Текст] / Д. В. Сокол // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні», Харків, 20-23 листопада 2018 г. – Х., 2018. – Т. 2. – С. 11.
51. Sreenivasa, B. K. R. Air cooling in automobiles using vortex tube refrigeration system [Text] / B. K. R. Sreenivasa, K. Govindarajulu // *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*. – 2013. – Vol. 5, no. 2. – P. 341-348. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.1408.
52. Кукус, В. С. Оценка возможности обеспечения оптимальной температуры наддувочного воздуха при работе дизеля на различных нагрузочных режимах [Электронный ресурс] / В. С. Кукус, Д. В. Шабалин, Ю. А. Постол // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2015. – № 1. – С. 20-25. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dvs_2015_1_6. – 17.05.2019 г.
53. Соколова, А. А. Исследование возможности применения вихревых труб в системах тепловой защиты от обледенения элементов ГТД [Текст] / А. А. Соколова // *Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева*. – 2013. – Т. 1. – С. 246-257.
54. Voronchikhin, S. G. A Mobile Medical Thermostatic Unit Based on the Ranque-Hilsch Vortex Effect [Text] / S. G. Voronchikhin, M. A. Tuev // *Biomedical Engineering*. – 2019. – Vol. 52, no. 5. – P. 361-364. doi: 10.1007/s10527-019-09848-6.
55. Азаров, А. И. Вихревые трубы: от эффекта Ранка до ... «эффекта Ранка» [Электронный ресурс] // *Новые технологии - инжиниринг*. – 2007. – 21 с. – Режим доступа: <http://att-vesti.narod.ru/J23-2.HTM>. – 17.05.2019 г.
56. Thermofluid-Acoustic Analysis of a Ranque-Hilsch Vortex Tube [Text] / W. Wisnoe, K. M. A. Rahman, Y. Istihat, V. D. Natarajan // *Procedia Technology*. – 2016. – Vol. 26. – P. 544-551. doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.068.
57. Istihat, Y. Wavelet Transform Of Acoustic Signal From A Ranque-Hilsch Vortex Tube [Text] / Y. Istihat, W. Wisnoe // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 8. – P. 1-9. doi: 10.1088/1757-899X/88/1/012005.
58. Крупененков, Н. Ф. К вопросу применения эффекта Ранка-Хильша (Вихревая труба) на пред-

приятных по производству колбасных изделий [Текст] / Н. Ф. Крупененков // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2013. – № 1. – 12 с.

59. Rayapati, S. Fabrication and experimental analysis of a vortex tube [Text] / S. Rayapati, L. Vishnu, M. Prakash // *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. – 2018. – Vol. 119, no. 14. – P. 29-33.

60. Zhai, X. Research on the application of vortex tube type of cooling jacket in coal mine [Text] / X. Zhai // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1864, no. 1. – P. 1-6. doi: 10.1063/1.4993037.

61. Numerical and experimental analysis of a heat-pipe-embedded printed circuit board for solid state lighting applications [Text] / T. K. Salem, F. S. Khosroshahi, M. Aric, M. O. Hamdan, M. Budakli // *Experimental Heat Transfer*. – 2017. – Vol. 32, no. 1. – P. 1-13. doi: 10.1080/08916152.2017.1397818.

62. Basse, N. T. Modelling of Vortex-Induced Aviation Turbulence [Electronic resource] / N. T. Basse. – 2018. – 20 p. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/1711.00276v2>. – 17.05.2019.

63. Вихревой эффект, Том 2: Технические приложения [Текст] / В. В. Бирюк, Ш. А. Пиралишвили, С. В. Веретенников, А. И. Гурьянов. – М.: Научтехлитиздат. – 2014. – Т. 2. – 491 с.

64. Анализ теплофизических процессов в вихревых трубах [Текст] / Ш. А. Пиралишвили, С. В. Веретенников, Г. Ш. Пиралишвили, О. В. Василюк // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. – 2017. – № 49. – С. 127-141. doi: 10.15593/2224-9982/2017.49.12.

65. Hamdan, M. O. Experimental Study of Vortex Tube Energy Separation under Different Tube Design [Text] / M. O. Hamdan, S.-A. B. Al-Omari, A. S. Oweimer // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2018. – Vol. 91. – P. 306-311. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.10.034.

66. Hamdan, M. O. Numerical analysis of enhanced heat transfer in developing laminar pipe flow using decaying swirl at the inlet [Text] / M. O. Hamdan // *Journal of Enhanced Heat Transfer*. – 2017. – Vol. 23, no. 4. – P. 283-298. doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.2017021032.

67. Numerical analysis for curved vortex tube optimization [Text] / M. Bovand, M. S. Valipour, S. Eiamsa-Ard, A. Tamayol // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 50. – P. 98-107. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.11.012.

68. Application of Response Surface Methodology to optimization of a standard Ranque-Hilsch vortex tube refrigerator [Text] / M. Bovand, M. S. Valipour, K. Dincer, S. Eiamsa-Ard // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Vol. 67, no. 1-2. – P. 545-553. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.03.039.

69. Исследование функционирования вихревой трубы с двухфазным потоком [Текст] / В. П. Шаповров, И. В. Пятак, О. Я. Пятак, С. С. Брянкин // *Восточно-европейский журнал передовых техноло-*

гий. – 2017. – Т. 4, № 10. – С. 1-11. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108424.

References

1. Ranque, G. J. Experiments on Expansion in a Vortex with Simultaneous Exhaust of Hot Air and Cold Air. *Le Journal de Physique et le Radium Publ.*, 1933, vol. 4, no. 6, pp. 112-114.

2. Ranque, G. J. *Method and apparatus for obtaining from a fluid under pressure two currents of fluids at different temperatures*. Patent USA, no. 20060101, 1934.

3. Hilsch, R. Die Expansion von Gasen im Zentrifugalfeld als Kälteprozeß. *Zeitschrift für Naturforschung Publ.*, 1946, vol. 1, no. 4, pp. 208-214.

4. Martynovskii, V. S., Mel'tser, L. Z. O kholodil'nom effekte vikhrevoi trubyy [About the refrigeration effect of the vortex tube]. *Kholodil'naya tekhnika*, 1952, vol. 4, pp. 51-53.

5. Martynovskii, V. S., Alekseev, V. P. Vikhrevoi effekt okhlazhdeniya i ego primeneniye [Vortex cooling effect and its application]. *Kholodil'naya tekhnika*, 1953, vol. 3, pp. 63-67.

6. Martynovskii, V. S., Alekseev, V. P. Termodinamicheskii analiz effekta vikhrevogo temperaturnogo razdeleniya gazov i parov [Thermodynamic analysis of the effect of vortex temperature separation of gases and vapors]. *Teploenergetika*, 1955, vol. 11, pp. 31-34.

7. Martynovskii, V. S., Alekseev, V. P. Issledovanie effekta vikhrevogo temperaturnogo razdeleniya gazov i parov [Investigation of the effect of vortex temperature separation of gases and vapors]. *ZhTF*, 1956, vol. 26, no. 10, pp. 2303-2315.

8. Merkulov, A. P. *Vikhrevoi effekt i ego primeneniye v tekhnike* [Vortex effect and its application in engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969, 185 p.

9. Suslov, A. D., Ivanov, S. V., Murashkin, A. V., Chizhikov, Yu. V. *Vikhrevyye apparaty* [Vortex machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 256 p.

10. Gutsol, A. F. Effekt Ranka [Ranque effect]. *Uspekhi fizicheskikh nauk Publ.*, 1997, vol. 167, no. 6, pp. 665-687. doi: 10.3367/UFNr.0167.199706e.0665.

11. Alekseenko, V. P. *Razrabotka i issledovanie vikhrevykh system termostatirovaniya aviatsionnogo oboruddovaniya*. Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk [Development and research of vortex systems of temperature control of aviation equipment. Avtoref. diss. ... cand. tech. sci.]. Samara, Samara gos. aerokosm. univ. im. S. P. Koroleva Publ., 2002. 23 p.

12. Jonathon, M. N. *The Ranque-Hilsch vortex tube and its application to spacecraft environmental control systems*. NASA. Manned Spacecraft Center, 1970. 35 p. doi: 10.13140/RG.2.1.1182.2481

13. *Computer Controlled Vortex Tube Refrigerator Unit, with SCADA*. Edibon. Technical Teaching Equipment, 2016. 15 p. Available at: <http://www.edibon>.

com/en/files/equipment/TPVC/catalog (accessed 16.05.2019).

14. Vozhyi, A. V. Diskovo-kolodochnyi tormoz s prinuditel'nym okhlazhdeniem tipa «vikhrevaya trubka»: konstruktziya, teoriya i raschet (chast' pervaya) [Disc-block brake with forced cooling of the «vortex tube» type: design, theory and calculation (part one)]. *Problemy teriya ta znoshuvannya*, 2015, vol. 4, no. 69, pp. 51-57.

15. Betlinskii, V. Yu., Zhidkov, M. A., Ovchinnikov, V. P. Dvukhpotochnye reguliruemye vikhrevye trubki v promyshlennykh ustanovkakh ochistki i osushki gazov [Dual flow adjustable vortex tubes in industrial gas cleaning and drying systems]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2008, pp. 72-75.

16. Ryabov, A. P., Gusev, A. P., Zhidkov, M. A., Zhidkov, D. A. Trekhpotochnye vikhrevye trubki v nefteobrabotnykh i gazovoi promyshlennosti [Three-flow vortex tubes in the oil and gas industry (analytical review)]. *Neftegazovye tekhnologii*, 2007, pp. 2-7.

17. Alikina, O. n. *Gidrodinamika i teploobmen v vikhrevoi trubke Ranka-Khilsha (vychislitel'nyi eksperiment)*. Avtoref. dys. ... kand. fiz.-mat. nauk [Hydrodynamics and heat transfer in the Ranque-Hilsch vortex tube (computational experiment). Avtoref. diss. ... cand. phys.-math. sci.]. Perm', Perm' gos. univ. Publ., 2003. 122 p.

18. Visheratin, K. N., Kalashnik, M. V. [Hydrodynamics of vortex refrigeration devices (Ranque tubes)]. *Gidrodinamika vikhrevykh kholodil'nykh ustroystv (trubok Ranka)*. 2013, 3 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/315107632_GIDRODINAMIKA_VIHKREVIKH_HOLODIL'NYKH_US_TROJSTV_TRUBOK_RANKA (Accessed 16 May 2019).

19. Hamdan, M. O., Elnajjar, E. Experimental analysis on vortex tube energy separation performance. *Heat Mass Transfer*, 2011, pp. 1637-1642. doi: 10.1007/s00231-011-0824-6.

20. Rahbar, N., Taherian, M., Shateri, M., Valipour, M. S. Numerical investigation on flow behavior and energy separation in a micro-scale vortex tube. *Thermal Science*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 619-630. doi: 10.2298/TSCI120316206R.

21. Kukis, V. S., Shabalin, D. V., Omel'chenko, E. A. Optimizatsiya parametrov vikhrevoi trubki [Optimization of the parameters of the vortex tube]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2016, vol. 2, no. 10, pp. 66-70. doi: 10.18454/IRJ.2227-6017.

22. Nimbalkar, S., Muller, M. R. An experimental investigation of the optimum geometry for the cold end orifice of a vortex tube. *Applied Thermal Engineering*, 2009, vol. 29, no. 2-3, pp. 509-514. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.03.032.

23. Gao, C. M., Bosschaart, K. J., Zeegers, J. C. H., de Waele A. T. A. M. Experimental study on a simple Ranque-Hilsch vortex tube. *Cryogenics*, 2005, vol. 43, no. 3, pp. 173-183. doi: 10.1016/j.cryogenics.2004.09.004.

24. Gao, C. Experimental study on the Ranque-Hilsch vortex tube. *Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven*, 2005, pp. 151. doi: 10.6100/IR598057.

25. Eiamsa-Ard, S., Wongcharee, K., Promvong, P. Experimental investigation on energy separation in a counter-flow Ranque-Hilsch vortex tube: Effect of cooling a hot tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 37, no. 2, pp. 156-162. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.09.013.

26. Eiamsa-Ard, S., Promvong, P. Review of Ranque-Hilsch effects in vortex tubes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, vol. 12, no. 7, pp. 1822-1842. doi: 10.1016/j.rser.2007.03.006.

27. Khait, A. V. *Issledovanie efekta energorazdeleniya s tsel'yu uluchsheniya kharakteristik vikhrevoi trubki*. Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of the effect of energy separation in order to improve the characteristics of the vortex tube. Avtoref. diss. ... cand. tech. sci.]. Omsk, Omsk gos. techn. univ. Publ., 2012. 24 p.

28. Katanoda, H., bin Yusof, M. H. Energy Separation Mechanism in Uni-Flow Vortex Tube Using Compressible Vortex Flow. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 2014, vol. 8, no. 6, pp. 937-940.

29. Devade, K. D. Comparative Study of Short Straight Divergent Vortex Tube and Long Convergent Vortex Tube. *Proceedings of 3rd International Conference on Recent Trends in Engineering & Technology (ICRET'2014)*. Chandwad, 2014, pp. 978-993.

30. Jadhav, S. S., Devade, K. D. Experimental Investigation of Multi Nozzle Vortex Tube. *Special Issue on International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering (IJTARME)*, 2018, vol. 7, no. 1, pp. 16-21.

31. Zhidkov, M. A., Devisilov, V. A., Zhidkov, D. A., Kirikova, O. V., Spiridonov, V. S. Thermodynamics of the Ranque-Hilsch effect in the three-flow vortex tubes. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2015, vol. 49, no. 4, pp. 523-531. doi: 10.1134/S0040579515040211.

32. Khalatov, A. A., Avramenko, A. A., Shevchuk, I. V. *Teploobmen i gidrodinamika v polyakh tsentrobezhnykh massovykh sil. Tom 1. Krivolineinye potoki* [Heat transfer and hydrodynamics in the fields of centrifugal mass forces. Volume 1. Curvilinear flows]. *Inst. tekhn. teplofiziki NAN Ukrainy Publ.*, 1996. 290 p.

33. Khalatov, A. A., Avramenko, A. A., Shevchuk, I. V. *Teploobmen i gidrodinamika v polyakh tsentrobezhnykh massovykh sil. Tom 2. Vrashchayushchiesya sistemy* [Heat transfer and hydrodynamics in the fields of centrifugal mass forces. Volume 2. Rotating systems]. *Inst. tekhn. teplofiziki NAN Ukrainy Publ.*, 1996. 288 p.

34. Khalatov, A. A., Avramenko, A. A., Shevchuk, I. V. *Teploobmen i gidrodinamika v polyakh tsentrobezhnykh massovykh sil. Tom 3. Zakruchennyye potoki* [Heat transfer and hydrodynamics in the fields of

- centrifugal mass forces. Volume 3. Swirling threads]. *Inst. tekhn. teplofiziki NAN Ukrainy Publ.*, 2000. 474 p.
35. Khalatov, A. A., Avramenko, A. A., Shevchuk, I. V. Teploobmen i gidrodinamika v polyakh tsentrobezhnykh massovykh sil. Tom 4. Inzhenernoe i tekhnologicheskoe oborudovanie [Heat transfer and hydrodynamics in the fields of centrifugal mass forces. Volume 4. Engineering and technological equipment]. *Inst. tekhn. teplofiziki NAN Ukrainy Publ.*, 2000. 212 p.
36. Khalatov, A. A., Okishev, A. V., Onishchenko, V. N. Obobshchenie opytikh dannykh po faktoru analogii Reinol'dsa dlya intensivatorov teploobmena razlichnogo tipa [Generalization of experimental data on the Reynolds analogy factor for heat exchange enhancers of various types]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2010, vol. 32, no. 5, pp. 5-13.
37. Alekseenko, V. P., Stukalov, A. S., Yakimov, P. Yu. Raschet kharakteristik vikhrevykh sistem termostatirovaniya [Calculation of the characteristics of the vortex temperature control systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2009, vol. 11, no. 5, pp. 170-176.
38. Kulik, A. S., Pasichnik, S. N., Dzhulgakov, V. G. [Experimental study of the characteristics of the vortex energy separator]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 3, pp. 65-68. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2010_3_11 (accessed 17.05.2019) (In Russian).
39. Piralishvili, Sh. A., Polyayev, V. M., Sergeev, M. N. *Vikhrevoi effekt. Eksperiment, teoriya, tekhnicheskie resheniya* [Swirl effect. Experiment, theory, technical solutions]. Moscow, UNPTs «Energomash» Publ., 2000. 412 p.
40. Skibitskii, N. V. *Interval'nye metody v zadachakh postroyeniya modelei ob'ektov i protsessov upravleniya*. Avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk [Interval methods in building object models and control processes. Avtoref. diss. ... dr. tech. sci.]. Moscow, Moscow energeticheskii inst. (tekhn. univ.) Publ., 2005. 40 p.
41. Kulik, A. S., Pasichnik, S. N. [Identification of the mathematical model of the vortex energy separator]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 10, pp. 192-196. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2010_10_43 (accessed 17.05.2019) (In Russian).
42. Kulik, A. S., Dzhulhakov, V. H., Pasichnyk, S. M. Aparatno-programnyy kompleks dlya doslidzhennya vykhrovoho efektu [Hardware and software complex for investigating the vortical effect]. *Visnyk KhNTUSH*, 2010, vol. 102, pp. 85-87.
43. Kulik, A. S., Pasichnik, S. N. [Identification of the mathematical model of the vortex energy separator in the frequency domain]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2012, no. 7, pp. 192-196. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2012_7_38 (accessed 17.05.2019) (In Russian).
44. Kulik, A. S., Pasichnik, S. N. [Synthesis of the enthalpy flow positioning system of the vortex energy separator]. *Sistemy obrobky informatsiyi*, 2010, vol. 6, pp. 115-121. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2010_6_26 (accessed 17.05.2019) (In Russian).
45. Pasichnik, S. N., Sokol, D. V. Reshenie zadachi stabilizatsii temperatury vozdukh v kabine transportnogo sredstva [The solution of the problem of stabilizing the air temperature in the vehicle cabin]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2018, vol. 4, pp. 12-19. doi: 10.32620/akt.2018.4.02.
46. Gusentsova, Ya. A. Vikhrevye ustroystva v sistemakh ventilyatsii [Vortex devices in ventilation systems]. *Vostochnoukrainskii nats. univ. im. Vladimira Dalya Publ.*, 2006. 296 p.
47. Sreeraj, P. V. Design and Implementation of PID Controller with Lead Compensator for Thermal Process. *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 67, no. 1, pp. 26-31. doi: 10.5120/11361-6593.
48. Fazel, M. B., Wang, Y., Keenlside, L., Lee, T.-Y. A new approach to selective brain cooling by a Ranque-Hilsch vortex tube. *Intensive Care Medicine Experimental*, 2016, vol. 4, no. 1. 14 p. doi: 10.1186/s40635-016-0102-5.
49. Kulik, A. S. *Elementy teorii ratsional'nogo upravleniya ob'ektami* [Elements of the theory of rational control of objects]. Kharkov, Nats. aerokosm. univ. im. N. Ye. Zhukovskogo «KhAI» Publ., 2016. 255 p.
50. Sokol, D. V. Perevahy vykorystannya pryntsyphu upravlinnya za diahnozom dlya upravlinnya vykhrovym enerhorozdil'nykom [Advantages of using the diagnostic management principle to control the vortex energy separator]. *Trudy Vseukrayins'koyi naukovotekhnichnoyi konferentsiyi «Intehrovani komp'yuterni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni»* [Proc. All-Ukrainian scientific and technical conference «Integrated computer technologies in mechanical engineering»]. Kharkov, 2018, vol. 2, pp. 11.
51. Sreenivasa, B. K. R., Govindarajulu, K. Air cooling in automobiles using vortex tube refrigeration system. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 2013, vol. 5, no. 2, pp. 341-348. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.1408.
52. Kukis, V. S., Shabalin, D. V., Postol, Yu. A. [Evaluation of the possibility of ensuring the optimum charge air temperature when the diesel engine is operating at various load conditions]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2015, no. 1, pp. 20-25. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dvs_2015_1_6 (accessed 17.05.2019) (In Russian).
53. Sokolova, A. A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya vikhrevykh trub v sistemakh teplovoi zashchity ot obledeneniya elementov GTD [Investigation of the possibility of using vortex tubes in systems of thermal anti-icing of elements of gas turbine engines]. *Rybinskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet im. P. A. Solov'eva*, 2013, vol. 1, pp. 246-257.
54. Voronchikhin, S. G., Tuev, M. A. A Mobile Medical Thermostatic Unit Based on the Ranque-Hilsch Vortex Effect. *Biomedical Engineering*, 2019,

vol. 52, no. 5, pp. 361-364. doi: 10.1007/s10527-019-09848-6.

55. Azarov, A. I. [Vortex tubes: from the Ranka effect to ... the «Ranka effect»]. *Novaya tekhnologii - inzhiniring*, 2007. 21 p. Available at: <http://att-vesti.narod.ru/J23-2.HTM> (accessed 17.05.2019) (In Russian).

56. Wisnoe, W., Rahman, K. M. A., Istihat, Y., Natarajan, V. D. Thermofluid-Acoustic Analysis of a Ranque-Hilsch Vortex Tube. *Procedia Technology*, 2016, vol. 26, pp. 544-551. doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.068.

57. Istihat, Y., Wisnoe, W. Wavelet Transform Of Acoustic Signal From A Ranque-Hilsch Vortex Tube. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 8, pp. 1-9. doi: 10.1088/1757-899X/88/1/012005.

58. Krupenenkov, N. F. K voprosu primeneniya effekta Ranka-Khil'sha (Vikhrevaya truba) na predpriyatiyakh po proizvodstvu kolbasnykh izdelii [On the issue of applying the Ranque-Hilsch effect (Vortex tube) at sausage enterprises]. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protssy i apparaty pishchevykh proizvodstv*, 2013, no. 1. 12 p.

59. Rayapati, S., Vishnu, L., Prakash, M. Fabrication and experimental analysis of a vortex tube. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2018, vol. 119, no. 14, pp. 29-33.

60. Zhai, X. Research on the application of vortex tube type of cooling jacket in coal mine. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1864, no. 1, pp. 1-6. doi: 10.1063/1.4993037.

61. Salem, T. K., Khosroshahi, F. S., Aric, M., Hamdan, M. O., Budakli, M. Numerical and experimental analysis of a heat-pipe-embedded printed circuit board for solid state lighting applications. *Experimental Heat Transfer*, 2017, vol. 32, no. 1, pp. 1-13. doi: 10.1080/08916152.2017.1397818.

62. Basse, N. T. *Modelling of Vortex-Induced Aviation Turbulence*. 2018. 20 p. Available at: <https://arxiv.org/abs/1711.00276v2> (accessed 17.05.2019).

63. Biryuk, V. V., Piralishvili, Sh. A., Veretennikov, S. V., Gur'yanov, A. I. *Vikhrevoi effekt, Tom 2: Tekhnicheskie prilozheniya* [Swirl Effect, Volume 2: Technical Applications]. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., 2014, vol. 2. 491 p.

64. Piralishvili, Sh. A., Veretennikov, S. V., Piralishvili, G. Sh., Vasilyuk, O. V. Analiz teplofizicheskikh protsessov v vikhrevykh trubakh [Analysis of thermophysical processes in vortex tubes]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2017, no. 49, pp. 127-141. doi: 10.15593/2224-9982/2017.49.12.

65. Hamdan, M. O., Al-Omari, S.-A. B., Oweimer, A. S. Experimental Study of Vortex Tube Energy Separation under Different Tube Design. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, vol. 91, pp. 306-311. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.10.034.

66. Hamdan, M. O. Numerical analysis of enhanced heat transfer in developing laminar pipe flow using decaying swirl at the inlet. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 283-298. doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.2017021032.

67. Bovand, M., Valipour, M. S., Eiamsa-Ard, S., Tamayol, A. Numerical analysis for curved vortex tube optimization. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 50, pp. 98-107. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.11.012.

68. Bovand, M., Valipour, M. S., Dincer, K., Eiamsa-Ard, S. Application of Response Surface Methodology to optimization of a standard Ranque-Hilsch vortex tube refrigerator. *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 67, no. 1-2, pp. 545-553. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.03.039.

69. Shaporev, V. P., Pitak, I. V., Pitak, O. Ya., Bryankin, S. S. Issledovanie funktsionirovaniya vikhrevoi truby s dvukhfaznym potokom [Investigation of the functioning of a vortex tube with a two-phase flow]. *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, 2017, vol. 4, no. 10, pp. 1-11. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108424.

Поступила в редакцию 23.05.2019, рассмотрена на редколлегии 12.06.2019

ЗАСТОСУВАННЯ ЕФЕКТУ РАНКА-ХІЛША ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ВИХРОВИМИ ЕНЕРГОРОЗДІЛЬНИКАМИ

А. С. Кулік, Д. В. Сокол

Предметом вивчення в статті є процеси в системах управління з використанням вихрових енергороздільників. **Метою** є аналіз вихрових енергороздільників, у яких спостерігається ефект Ранка-Хілша. **Задачі:** розгляд історії відкриття, сутність та застосування ефекту Ранка-Хілша; огляд основних конструкцій вихрових енергороздільників; розгляд можливостей вихрових енергороздільників і особливостей управління ними; виділення актуальних напрямків досліджень. Отримані наступні **результати**. В роботі розглянуто пристрій вихрового енергороздільника, в якому виявляється ефект Ранка-Хілша. Описано ряд основних параметрів, за якими визначають ефективність роботи вихрового енергороздільника та проводяться розрахунки для підвищення його ККД. Представлені результати дослідження, пов'язані з впливом габаритних розмірів вихрового енергороздільника, формою, розмірами та кількістю вхідних сопел на його ефективність. Описані основні види конструкцій вихрових енергороздільників: протиточний та прямоточний. Найбільш популярним варіантом отримання описової моделі вихрового енергороздільника є використання рівнянь термо- та гідродинаміки. Однак для подальшого управління системами, що базуються на використанні ефекту Ранка-Хілша, такий підхід не є

практичним. Для цього застосовуються інші способи визначення математичного моделі вихрового енергороздільника, пов'язані з обробкою його експериментальних частотних характеристик. Із метою отримання точних та адекватних результатів корекції системи із вихровим енергороздільником застосовується метод інтервальних логарифмічних амплітудно-частотних характеристик, причому структура його математичної моделі має дробові показники ступенів. Представлені актуальні напрямки досліджень вихрових енергороздільників і варіанти їх практичного використання в: двигунобудуванні, медицині, акустичних системах, промисловості, системах терморегуляції, авіації. **Висновки.** Наукова значимість наведеного огляду полягає в наступному: визначення актуальних напрямів різного роду наукових досліджень.

Ключові слова: ефект Ранка-Хілша; вихровий енергороздільник; система управління; математична модель.

APPLICATION OF THE RANQUE-HILSCH EFFECT IN CONTROL SYSTEMS

A. S. Kulik, D. V. Sokol

The subject matter in the article processes in control systems using vortical energy separators. The goal is an analysis of a vortical energy separator where the Ranque-Hilsch effect is considered. The tasks to be solved are consideration of the discovery history, the essence and using of the Ranque-Hilsch effect; main structures of vortical energy separators review; the possibilities of vortical energy separator consideration and its control features; highlighting relevant research areas. The following results were obtained. The paper considers the device of the vortical energy separator in which the Ranque-Hilsch effect is manifested. A number of basic parameters are described that determine the operating efficiency of the vortical energy separator and calculations are made to increase its efficiency. The results of the research are presented that related to the influence of the overall dimensions of the vortical energy separator, form, size and number of the inlet nozzles on its effectiveness. The main types of vortical energy separator design are described: counter-flow and uni-flow. The most popular option for obtaining a descriptive model of a vortical energy separator is to use the equations of thermal and hydrodynamics. However, for further control of systems based on the use of the Ranque-Hilsch effect, this approach is not practical. For this, other methods are used to determine the mathematical model of a vortical energy separator, related to the processing of its experimental frequency characteristics. In order to obtain accurate and adequate results of the correction system with the vortical energy separator, the method of interval logarithmic amplitude-frequency characteristics is used and its mathematical model has fractional exponents. The relevant research directions of the vortical energy separators and the variants of their practical use in the world are presented: engine building, medicine, acoustic systems, industry, thermoregulation systems, aviation. Conclusions. The scientific significance of the review is as follows: the definition of relevant areas in various kinds of scientific research.

Keywords: Ranque-Hilsch effect; vortical energy separator; control system; mathematical model.

Кулик Анатолий Степанович – д-р техн. наук, профессор, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, профессор кафедры систем управления летательными аппаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Сокол Дмитрий Вадимович – аспирант каф. «Системы управления летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Kulik Anatoliy Stepanovich – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, laureate of the State Prize of Ukraine in the field of science and technology, Professor of Dept. of Aircraft Control Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.kulik@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0001-8253-8784.

Sokol Dmitriy Vadimovich – Postgraduate at the Department «Control Systems of Aircraft», National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: d.sokol@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0003-0847-350X.