

Я.А. Коркодинов

I.A. Korkodinov

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

О.Г. Хурматуллин

O.G. Khurmatullin

«Урал-инструмент-Пумори», г. Пермь
Ural-Tool-Pumori Ltd, Perm

ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА РАНКА – ХИЛЬША

THE APPLICATION OF RANQUE – HILSH EFFECT

Рассматривается история открытия и применения эффекта Ранка – Хильша в России и за рубежом. Описывается сущность эффекта и основные понятия, необходимые для его изучения, простейшие случаи вихревого движения. Дан обзор основных конструкций вихревых трубок. Рассматривается возможность и особенности применения вихревых трубок для сепарации газов. Делаются выводы и обозначаются дальнейшие направления исследования.

Ключевые слова: эффект Ранка – Хильша, вихревая трубка, охлаждение и нагревание газа, конденсация жидкости, сепарация природного и попутного газа.

The history and application of Ranque – Hilsh effect in Russia and abroad are considered. The main conception of effect is presented. The two main cases of vortex motion are considered. The main design features are reviewed. The probability and special features of vortex tube application for gas separation are considered. The conclusions are made. Further investigations are described.

Keywords: Ranque – Hilsh effect, vortex tube, gas cooling and heating, fluid condensation, natural and associated gas separation.

1931 ç. <. ЪіŌıŬ½ äeo ó£½ññŌóó ōñ½ăñëíŌŬë ç äeŬ½ ũçñŌŌŬ½ íŌıçŬŌñ ß ç ŬŌıë ōçŋëñçŬŬ ~ăăñıŌ, £ıçŬŌŌıçŬŌŬı ç ŬŌŌçñŌóó ōñ½ăñëíŌŬë ç ŬñŌŋëıçŌ é ŬçŬ é £ıçŬŌñŌŌŬçŬ äŬŌŬı çı£ı ó äŬç ũñŌóó ōñ½ăñëíŌŬë ŌıăñëŌăñëŌó äŬŌŬı. 1. ōŬ çñ½ çŋëñçŬŬ ~ăăñıŌ Ōñ ß ç äeoŌ ōăëíŌŬ£ıŌ½ íıŬñ½ŌŋıŌ½ ŬŬŬăñŬŌçŬ½, ó ōŬŬñŬçıŌŌ Ōñ ó½ñçŬ äeŬŬŬçñŌŌ . 2. Ŭçăıç ç 1946 ç. 3. ŬŌçăŬ ŬăŬŬçŌıçŬçıç ëñ£ŬçăŌŌ ŬçŬŋ ~ŬăñëŌ½ñŌŌç, í ōıçñ äëñŬçŬçŌ ç ŬŌŬŋŬıŌŌ çŋëñçŬŬ ŋeŬŬıŌ. 4. çŬŬ éıŬŌ äŬçŬŌçŌ ŋçñŬŌŬŬŌă äŬ çŬñ½Ŭ ½ŋeŬ, ó ŬŋŌ ñ ŋ£ ñeŬçŋë ŬŋëíŌ ōıçñ ŌıŌıçŌ éıŬŌŬ äŬ ōŬŬñŬçıŌŌŌ ~ăăñıŌı. 5. ŌŬŬŬăñ½Ŭ çññŬŌŌ ŬăŬŬçŌıçŬçıŌ ō -

сячи работ по применению эффекта в самых разных областях человеческой деятельности, от охлаждения кабин поездов до создания холодильных установок в развивающихся сообществах африканского континента.

В Советском Союзе первые исследования эффекта Ранка начали проводиться В.С. Мартыновским и В.П. Алексеевым [1–4] в Одесском технологическом институте в 1952 г. Активное развитие теории, разработку методов расчета и конструирование вихревых труб проводил А.П. Меркулов [5]. По его инициативе было проведено шесть всесоюзных конференций. В его трудах рассматривается возможность применения вихревых труб для осушения сжатых газов. Широко известна книга А.Д. Суслова [6], в которой рассматриваются вихревые аппараты, применяемые для охлаждения и нагревания газов, сепарации двухфазных сред, разделения газовых смесей и вакуумирования.

А.Ф. Гуцол сделал обзор [7], в котором обобщил большинство существующих на тот момент российских теорий. Также он выдвинул свою теорию, согласно которой разделение газа в вихревой трубе происходит с помощью микрообъемов с разной кинетической энергией и скоростью. Более быстрый газ будет двигаться на периферию, тогда как более медленный будет скапливаться в центре. Широко известны в мире работы А.И. Леонтьева [8], в которых он предлагает свое объяснение процессов, происходящих в вихревой трубе. В работе [9] рассматриваются возможности применения вихревых трубок в сушильных процессах.

Следует отметить также зарубежные работы. Обширное исследование по применению вихревых трубок для сепарации газов было проведено в Oak Ridge National Laboratory [10]. В работе [11] делается предположение о возникновении обратного цикла Карно внутри вихревой трубки. Обширный обзор литературы, попытка модифицировать теорию из [11], а также ряд новых экспериментальных данных были получены в работе [12].

Сущность эффекта Ранка – Хильша. Рассмотрим подробнее устройство вихревой трубки (рис. 1). Вихревая трубка состоит из следующих частей: одно или несколько входных отверстий, вихревая камера, выходы для холодного и горячего газа и непосредственно сама трубка [12]. Сжатый газ под высоким давлением (6 бар) проникает в вихревую камеру. После этого газ закручивается и движется по направлению к выходу горячего газа. Часть газа охлаждается, расширяется и концентрируется в центре трубки. Другая часть газа приобретает более высокую скорость, нагревается и остается на периферии. При достижении контрольного клапана горячая составляющая выходит через выход горячего газа. Холодная составляющая сталкивается с контрольным клапаном и начинает двигаться в обратном направлении. Часть ее потом выходит через выход холодного газа, а часть движется обратно к контрольному клапану. Несмотря на кажущуюся простоту эффекта, причины его воз-

никновения не выяснены до сих пор. В настоящее время имеются тысячи самых разных его объяснений, но одного, которое можно было бы назвать единственно верным, не существует. Несмотря на то что были написаны подробные монографии по применению данного эффекта на практике [5, 6], в действительности данный эффект используется достаточно мало. Чтобы попытаться понять сущность эффекта, рассмотрим основные понятия гидродинамики вихревых потоков и характеристики вихревых труб [7].

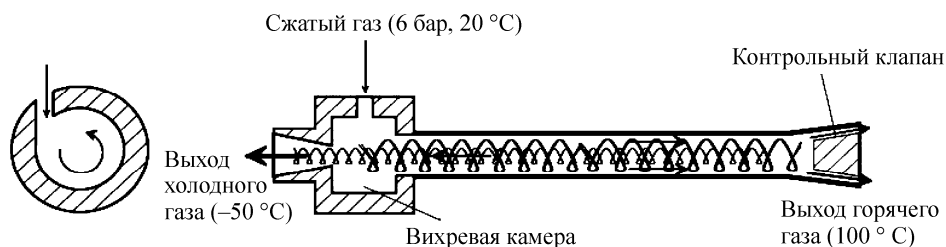


Рис. 1. Устройство вихревой трубки

Основные понятия. Для того чтобы оценить эффективность той или иной трубки, разными авторами вводятся некоторые параметры. Рассмотрим наиболее известные из них.

Будем рассматривать следующие пять основных параметров системы: давление p , температуру T , плотность ρ , скорость V и энтальпийный поток \hat{H} (рис. 2). Обозначим данные параметры на входе — p_{in} , T_{in} , ρ_{in} , V_{in} , \hat{H}_{in} , на выходе горячего потока — p_h , T_h , ρ_h , V_h , \hat{H}_h , на выходе холодного потока — p_c , T_c , ρ_c , V_c , \hat{H}_c .

Для постоянного потока условие сохранения массы жидкости в вихревой трубке можно записать как

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_h + \dot{m}_c,$$

где \dot{m}_c — поток массы жидкости на выходе холодного потока, запишем его как $\varepsilon \dot{m}_{in}$; \dot{m}_h — поток массы жидкости на выходе горячего потока, запишем его как $(1 - \varepsilon) \dot{m}_{in}$; \dot{m}_{in} — масса жидкости на входе; ε — доля холодного потока, одна из основных и наиболее известных характеристик вихревых трубок, находится по формуле

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_{in}}.$$

[illegible]

Ἐἵ ἰῦñ ḤçóøñŌóñ äëöŌ öŬ Öí£ çíöá ἰçí£öóçñēñ ½ ḤçóøñŌóñ½ öç ö ç ÖŬ-øññŌŌ ½ çóëëñ½.

ḡũĩōĩōũōōũ ũōēũ;ũ äēō½ñō ñōĩ äũō öōñ ξίçóêēñōōũĩōō, ółó ĩōē;ũ -
ĩōō ĩ;ũēũĩōō,

[illegible]

Đeó ~ö½ çñžóóóŎí íóë;Üž íóó, ç óóíž ñ½í äÜ äÜë½Üžñ (1), Ütöíñöü
 äÜtöÜ ÖÖÜÜ Ñž ž ÖßÜÇÜ Éí½;ÜÖöÜÇÜ jÜÖöÜëí, Üêçtö çíÖ àñÇÜ Üíá çëí àñŎó
 ó éíçŎí ÖÜž Ö Ñž ž ÖßÜÇÜ ÑëÜÇÜÇÜ jÜÖöÜëí.

Ἰσοῦς Ὑδροστατικὴ ἀπέναντι τοῦ ὁριζοντίου, ἀπὸ τοῦ ὁριζοντίου ἡ ἑξήμισι τοῦ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ἡ ἑξήμισι τοῦ ὁριζοντίου, ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ἡ ἑξήμισι τοῦ ὁριζοντίου.

$$v = \frac{C}{r} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \right],$$

Ἐν τῷ C ὁ r_0 — ἡ ὁριζοντίου, ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου.

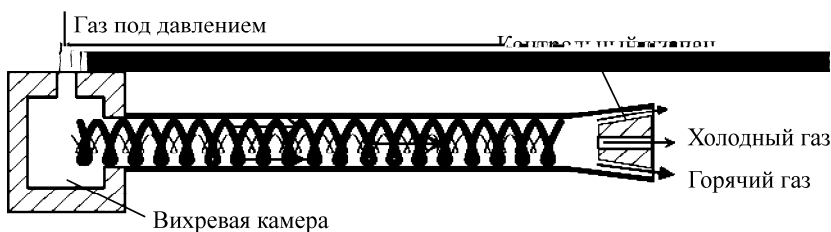
Ἐν τῷ ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου.

$$vr'' = \text{const}, n = -1 \quad (0 < r < r^*), n \leq 1 \quad (r^* \leq r).$$

Ἐν τῷ ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου.

Основные конструкции вихревых трубок. Ἐν τῷ ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου.

Прямоточная вихревая трубка. Ἐν τῷ ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου.



Ἐν τῷ ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου ὁ ὅτι ὁ ὁριζοντίου.

На эффективность вихревой трубки значительное влияние оказывает ее геометрия. Одним из важных параметров является отношение длины трубки к ее диаметру. Соответственно, чем больше это отношение, тем эффективнее вихревая трубка. Чтобы сократить длину трубки, сохранив ее эффективность, применяют конические вихревые трубки (рис. 4). Для охлаждения широко используют конические трубки, в которые подается еще один поток газа с температурой как у входного потока, но при меньшем давлении. В этом случае охлаждающий эффект трубок возрастает.

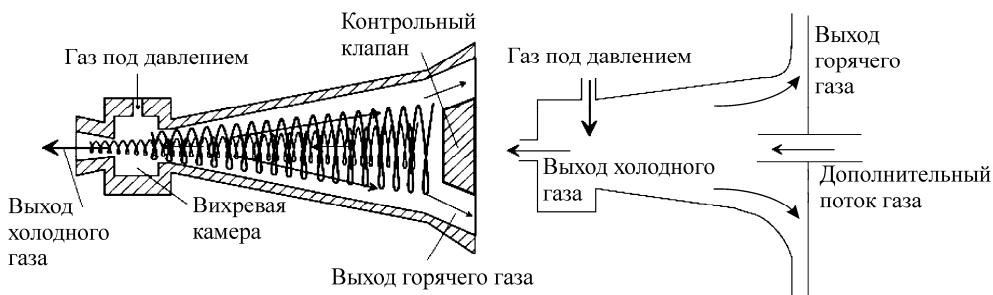


Рис. 4. Коническая вихревая трубка

В наши дни повсеместно распространено применение вихревых трубок как холодильников (см. www.vortexair.biz, www.airtx.com, www.newmantools.com).

Для их применения в данном качестве необходим лишь поток сжатого газа. На протяжении многих лет разными авторами предлагаются усовершенствования вихревых трубок, работающих как холодильные установки. Далее рассмотрим некоторые из них.

Самые горячие слои газа находятся на периферии вихревой трубки. Их высокая температура, а также высокая скорость турбулентного вихря обеспечивают большие значения коэффициента теплообмена с окружающей средой. Если искусственно охлаждать периферию вихревых трубок, то их КПД значительно возрастет. Существует два вида охлаждаемых вихревых труб (рис. 5): с охлаждающей рубашкой и с охлаждающим жидкостным вихрем [5]. Наружная поверхность первого вида охлаждается протекающей по рубашке жид-

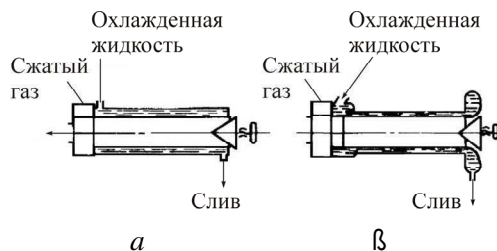


Рис. 5. Охлаждаемые вихревые трубки: а – с охлаждающей рубашкой; б – с охлаждающим жидкостным вихрем

костью. У второго есть кольцевая щель внутри трубы, через которую охлаждающая жидкость вводится с определенной скоростью закрутки и создает быстровращающийся цилиндрический слой, который движется к горячему концу и отводится через кольцевую щель около дросселя.

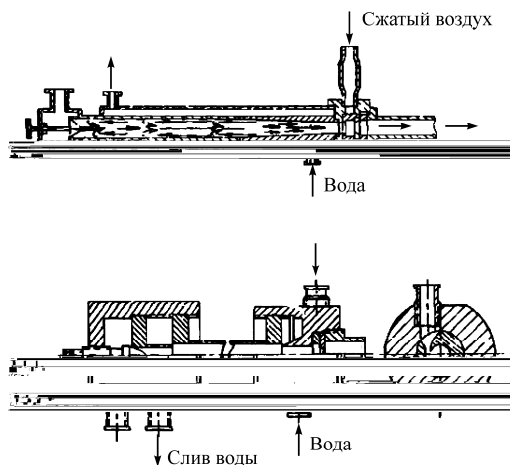


Рис. 6. Примеры конструкций охлаждаемых вихревых трубок

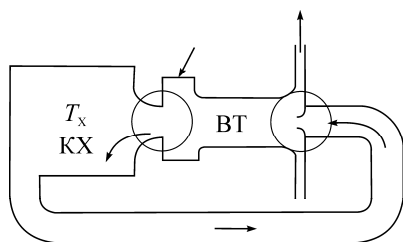


Рис. 7. Конструкция замкнутой вихревой трубки: T_x – температура в холодильной камере; КХ – холодильная камера; ВТ – вихревая трубка

лообмен (за счет многократной циркуляции) в самой трубке. К сожалению, данная схема не смогла создать интенсивную прокачку холодного воздуха, а введение холодильной камеры себя не оправдало.

Также возможны схемы, где горячий поток поступает в резервуар с жидкостью, где охлаждается до температуры входного потока, после чего вместе с входным потоком опять поступает в вихревую трубку.

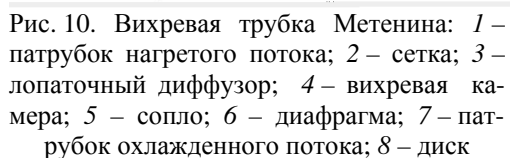
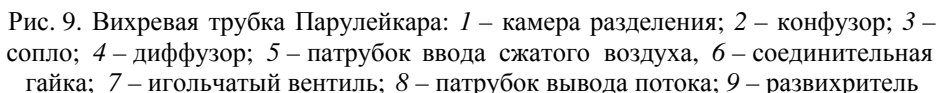
Разница температуры охлаждающей жидкости в $\pm 10^\circ\text{C}$ практически не влияет на эффект охлаждения. С другой стороны, регулировать температуру холодного потока вихревой трубы можно с помощью изменения расхода охлаждающей жидкости. На рис. 6 представлены примеры конструкций охлаждаемых вихревых трубок.

Вихревые трубки с многократной циркуляцией. Вихревые трубки обладают достаточно низким КПД (20–40 %). Для холодильных установок КПД можно повысить, используя энергию горячего потока, который обычно просто выбрасывается во внешнюю среду.

Можно подобрать такую конструкцию вихревой трубки, в которой поток не разделяется (рис. 7) [5]. В данной конструкции происходит многократная циркуляция потока. С каждым циклом температура охлажденной части потока становится еще ниже. В данном случае имеют место два основных процесса: вакуумирование холодного потока за счет раскрутки горячего потока и регенеративный теплообмен (за счет многократной циркуляции) в самой трубке.

A technical drawing of a mechanical assembly, likely a pump or valve mechanism, shown in a perspective view. The assembly consists of a main cylindrical body (1) with a flange at one end. A central shaft (2) passes through the body. At the flange end, there is a circular component (3) with a central hub (4) and a surrounding ring (5). A small component (6) is attached to the side of the main body. At the other end of the main body, there is a complex assembly (7) with a central shaft (8) and a flange (9). The drawing is labeled with numbers 1 through 8, corresponding to the parts described in the text.

49



ᲔᲗᲉᲙᲚ᲏ ᲕᲟᲛᲧᲚ᲏ ᲑᲣᲓᲡᲁᲥ᲏.

Еще одним вариантом конструкции является вихревая трубка Метенина (рис. 10). На нагретом конце камеры разделения данной трубки установлены сетка 2 и лопаточный диффузор 3. Эти элементы позволяют сократить длину камеры разделения. В данной конструкции сетка является развихрителем. Она затормаживает внутренние части потока, передавшие значительную часть своей энергии внешним слоям. Эти внутренние части и формируют внутренний поток с пониженной температурой.

ḐṛäŮ; áĹŮćıŎŋ çóêêñç ê öëŮ-
ßŮ; Ñ; ĩñäíéíîóó ĆıŮç. Примене-

ние вихревых трубок для сепарации газов открыло большие перспективы для исследователей в самых разных областях. Например, природный и попутный нефтяной газы, добытые из скважины, не могут использоваться без предварительной обработки из-за большого содержания примесей. Так, в добываемом газе всегда присутствует влага в парообразном состоянии. При охлаждении газа или повышении давления влага конденсируется и может образовать свободную воду, лед или гидраты. Это может привести к коррозии металла, накоплению жидкости в линейной части газопровода, закупорке гидратными пробками и остановке подачи газа потребителям. Мировым лидером в применении вихревых трубок для осушки природного газа является немецкая

компания RWE Energy. Конструкция такой трубки (рис. 11) мало отличается от классической (см. рис. 1) [16]. При прохождении вдоль трубки часть газа охлаждается. Для некоторых компонентов, таких как пар, наступает температура конденсации. Также действует центробежная сила, которая при-

၂၀၁၈ ခုနှစ် ဇူလိုင်လ အထိ ရေပိုက်စနစ်များ ဖြစ်ပေါ်နေသည့် အတွက်၊ ဝါသနာရှိသူများ၏ အကြံပြုချက်များကို အခြေခံ၍ အောက်ပါအတိုင်း ဆောင်ရွက်မည် ဖြစ်ပါသည်။

၂၀၁၈ ခုနှစ် ဇူလိုင်လ အထိ ရေပိုက်စနစ်များ ဖြစ်ပေါ်နေသည့် အတွက်၊ ဝါသနာရှိသူများ၏ အကြံပြုချက်များကို အခြေခံ၍ အောက်ပါအတိုင်း ဆောင်ရွက်မည် ဖြစ်ပါသည်။

၂၀၁၈ ခုနှစ် ဇူလိုင်လ အထိ ရေပိုက်စနစ်များ ဖြစ်ပေါ်နေသည့် အတွက်၊ ဝါသနာရှိသူများ၏ အကြံပြုချက်များကို အခြေခံ၍ အောက်ပါအတိုင်း ဆောင်ရွက်မည် ဖြစ်ပါသည်။



ပုံရိပ် ၁၃. ရေပိုက်စနစ် အမှန်တရား အခြေအနေ အခြေအနေ

အောက်ပါအတိုင်း ဆောင်ရွက်မည် ဖြစ်ပါသည်။

Список литературы

1. Зейд Оўцтјоу ㄣ.т., Цѣнѣиѣе ㄣ.т. д. әҮзҮНӧзәОҮ½ ~аањіѡ цӧеѣңҮү өөҮБ // ҮҮзҮНӧзәОҮ өнѣОӧјі. – 1952. – \ 4.
2. Зейд Оўцтјоу ㄣ.т. һзҺјтҺң ㄣ.т. ㄠӧеѣңҮү ~аањіѡ ÜēзіϕÑñÖó ó нҮү äëö½ҺŌňŌón // ҮҮзҮНӧзәОҮ өнѣОӧјі. – 1953. – \ 3.
3. Зейд Оўцтјоу ㄣ.т., һзҺјтҺң ㄣ.т. Днѣ½ҮНӧОї½ооҺтјоу іОїзӧѣ ~аањіѡ цӧеѣңҮү өн½әнѣіОÜēӨҮү еіғНҺнӧ́ ціғҮ́ ó әіеҮ́ // ДҺăҮ-Ōнѣңнӧ́ јі. – 1955. – \ 11.
4. Зейд Оўцтјоу ㄣ.т., һзҺјтҺң ㄣ.т. Äâањіѡ цӧеѣңҮү өн½әнѣіОÜēӨҮү еіғәнНҺнӧ́ әнѣңҗѣ ē әіеҮ́ ó Üä öĐі äēҮңнѣі цӧәҮнѣ Үӧзәüі – ЪҮзәоҮӧ // Гѣңтӧо һぞでてて. – 1956. – \ 1.
5. ЦнѣҮзҮ́ һ.т. ㄠӧеѣңҮү ~аањіѡ ó нҮү äëö½ҺŌňŌón ч өнѣОӧ́н – З.: Зейд ОўтӧөҮнӧ́, 1969. – 185 і.
6. ㄠӧеѣңҮ́ н іääіēіö / һ.г. тҮтҮ́, т.ㄠ. гҮіӨҮ́, һ.ㄠ. ЗҮēіүјӧ, ù.ㄠ. ЫӧφӧҮ́. – З.: Зейд ОўтӧөҮнӧ́, 1985. – 256 і.
7. һҮтҮ́ һ.т. Äâањіѡ тјіјі // Ътәнѣӧ âӧфӧҺтјіē ŌіҮі. – 1997. – Ъ. 167, \ 6. – т. 665–687.
8. Leont'ev A.I. Gasdynamic methods of temperature stratification // Fluid dynamics. – 2002. – Vol. 37, \ 4. – P. 512–536.
9. тҮӨҮ́зҮ́ ㄣ.т., дәзҮ́ һ. ù ., һіōīāҮ́ ㄣ.т. тҮүјі ó НѣҮ́он өнѣӨҮ́Ү-ЦӧоҺтјон әēҮтҺтјі і цӧеѣңҮү өөҮБҮү тјіјі – Үӧзәüі: çҮғ½Ү́ӨҮтӧ́ ó ~јтән-ëӧ½ҺŌňṒ өнѣОӧ́ // ㄠҺтӧӧ́ ԷһԷ. – 2010. – Ъ. 16, \ 4. – т. 803–825.
10. Baker P.S., Rathcamp W.R. Investigations on the Ranque – Hilsh (vortex) tube / Oak Ridge National Laboratory. – Oak Ridge, 1954. – 38 ѳ.
11. Ahlborn B.K., Gordon J.M. The vortex tube as a classic thermodynamic refrigeration cycle // Journal of applied physics. – 2000. – Vol. 88, \ 6. – P. 3645–3653.
12. Gao C. Experimental study on the Ranque – Hilsh vortex tube // PhD Study. – 2005. – 151 ѳ.
13. Fulton C.D. Comments on the vortex tube // J. ASRE Refrigerating Engng, – 1950. – Vol. 58.
14. Cockerill T. Ranque – Hilsh vortex tube // Master thesis, University of Cambridge, 1995.
15. Linderstorm-Lang C.U. Studies on transport of mass and energy in the vortex tube // The significance of the secondary flow and its interaction with the tangential velocity distribution. Riso report, Denmark, 1971. – 30 ѳ.
16. Gronner J. Successful experience with vortex tube technology at the epe cavity storage of RWE Energy // 23rd World Gas Conference. – Amsterdam, 2006. – 11 ѳ.

ぢŪ;ŪôñŌŪ 1.11.2012

Сварогский Александр Александрович – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: svarogjk1989@rambler.ru).

Урал-Инструмент-Пумори Олег Гаднанович – соискатель ПНИПУ, «Урал-инструмент-Пумори» (614107, г. Пермь, ул. Инженерная, 14, e-mail: oleg@uipumori.ru).

Korkodinov Iaroslav Aleksandrovich – Graduate Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: svarogjk1989@rambler.ru).

Khurmatullin Oleg Gadnanovich – Applicant, Ural-Tool-Pumori Ltd (614107, Perm, Inzhenernaya st., 14, e-mail: oleg@uipumori.ru).