



УДК 628.8: 631.2

**М. В. БОДРОВ<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, зав. кафедрой отопления и вентиляции;  
**М. Н. ЧЕКАРДОВСКИЙ<sup>2</sup>**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры инженерных систем и сооружений; **А. Н. ПЫЛАЕВ<sup>1</sup>**, аспирант кафедры отопления и вентиляции; **А. В. БЕШЛЯГА<sup>1</sup>**, магистрант кафедры отопления и вентиляции

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТРУБ В ХРАНИЛИЩАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-85; эл. почта: tes84@inbox.ru

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38.

Тел.: (3452) 28-37-71; chekardovskijmn@tyuiu.ru

*Ключевые слова:* вихревые трубы, овощекртофелехранилища, вихревой эффект, массовый расход воздуха, холодопроизводительность, теплопроизводительность.

---

*Приведены результаты экспериментальных исследований низконапорных вихревых труб. Обоснованы технико-экономические условия применения вихревых энергоделителей в системах технологического кондиционирования воздуха овощекртофелехранилищ. Разработана технологическая схема укрупненных блоков вихревых холодильников для охлаждения воздуха в системах активной вентиляции насыпи сочного растительного сырья.*

---

### Введение

В настоящее время в нашей стране имеется существенная потребность в технических устройствах по технологическому нагреву и охлаждению воздуха в сельскохозяйственных комплексах различного назначения [1, 2]. Главными требованиями к таким установкам являются: простота эксплуатации, термодинамическое совершенство, безотказная работа в нестационарных условиях. Также немаловажным фактором являются: низкая капитальная стоимость, исключение ядовитых и горючих веществ, пожарная и взрывобезопасность. Вихревые энергоделители или вихревые трубы (ВТ) по своим технико-экономическим характеристикам полностью решают эти задачи, имея возможность одновременной или попеременной выработки теплоты или холода одним устройством. Однако основным препятствием для повсеместного применения вихревых труб в строительстве является их невысокий коэффициент полезного действия (КПД не более 2,5...3 %), поэтому область их применения крайне невелика [3–5].

### Результаты исследований

При изучении термодинамических параметров вихревых энергоделителей основными величинами являются: температура  $T_1^*$ , °С, поступающего в сопло



сжатого воздуха, его давление, Па, а также температуры и давления холодного  $T_x^*$  и  $p_x^*$  и горячего  $T_\Gamma^*$  и  $p_\Gamma^*$  потока, соответственно.

Эффективность охлаждения  $\Delta t_x$ , °С, холодного потока сжатого воздуха определяется по зависимости (1):

$$\Delta t_x = T_1^* - T_x^*, \quad (1)$$

а горячего – по формуле (2):

$$\Delta t_\Gamma = T_\Gamma^* - T_1^*. \quad (2)$$

Определение относительного массового расхода холодного потока  $\mu$  и горячего потока  $(1-\mu)$  проводится по зависимостям:

$$\mu = \frac{G_x}{G}; \quad \frac{G_\Gamma}{G} = 1 - \mu, \quad (3)$$

где  $G_x$  – расход холодного воздуха, кг/ч;

$G_\Gamma$  – расход горячего воздуха, кг/ч;

$G$  – общий расход воздуха,  $G = G_x + G_\Gamma$ , кг/ч.

При исследовании температурных показателей вихревых энергоделителей следует представлять их функции в виде  $\Delta t_x = f(\mu)$  и  $\Delta t_\Gamma = f(\mu)$ .

Учитывая равенство энергий входящего и выходящего из адиабатной ВТ потоков (при отсутствии теплообмена с окружающей средой), можно аналитически определить эффекты охлаждения  $\Delta t_x$  или подогрева  $\Delta t_\Gamma$ .

Уравнение энергии для 1 кг воздуха, проходящего через ВТ:

$$i_1 = \mu \cdot i_x + (1 - \mu) \cdot i_\Gamma, \quad (4)$$

где  $i_1$ ,  $i_x$ ,  $i_\Gamma$  – удельные энтальпии входящего, холодного и горячего потоков соответственно, кДж/кг.

Следовательно, применяя формулу определения энтальпии  $i = c_p T$  при постоянной теплоемкости воздуха  $c_p = \text{const}$  получим:

$$T_1^* = \mu \cdot T_x^* + (1 - \mu) \cdot T_\Gamma^*, \quad \text{или} \quad \mu \cdot \Delta t_x = (1 - \mu) \cdot \Delta t_\Gamma. \quad (5)$$

Удельная холодопроизводительность ВТ,  $q_x$ , кДж/кг:

$$q_x = \mu \cdot \Delta t_x \cdot c_p = (1 - \mu) \cdot \Delta t_\Gamma \cdot c_p, \quad (6)$$

а общая холодопроизводительность  $Q_x$ , Вт, и теплопроизводительность  $Q_\Gamma$ , Вт, соответственно равны:

$$Q_x = q_x \cdot G = \mu \cdot \Delta t_x \cdot c_p \cdot G; \quad (7)$$

$$Q_\Gamma = q_\Gamma \cdot G = (1 - \mu) \cdot \Delta t_\Gamma \cdot c_p \cdot G. \quad (8)$$

В ВТ охлаждается не весь подаваемый воздух, как в идеальной турбине, а только небольшая его часть  $\mu$ , поэтому величина адиабатного КПД вихревого энергоделителя определяется произведением  $\mu \cdot \eta$ , что и будет являться экономическим показателем оценки их эффективности [6, 7].



Коэффициент температурной эффективности  $\eta_x$  является показателем эффекта охлаждения при изэнтропном расширении с начальных параметров сжимаемого воздуха  $p_1^*$  и  $T_1^*$  до значений холодного потока  $p_x$  и  $T_x^*$ :

$$\eta_x = \frac{\Delta t_x}{T_1^* \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{\pi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (9)$$

где  $k$  – показатель адиабаты;  $\pi$  – степень расширения воздуха.

Проведенные авторами исследования позволяют сделать вывод, что теплоизолированные ВТ как генераторы холода примерно в 4 раза хуже идеальной турбины и в 2,0...2,5 раза хуже реальной турбины, т. к. максимальное значение  $\mu \cdot \eta$  не превышает 25...30 % [8, 9]. Наибольшую термодинамическую эффективность имеют низконапорные большерасходные ВТ, использующие воздух с рабочим давлением до 0,15 МПа, однако вихревой эффект по совершенству цикла не может конкурировать ни с паровыми, ни с газовыми детандерными циклами.

Рассмотрим частные случаи, когда технические преимущества вихревых энергоразделителей становятся выше несовершенства цикла и низкого КПД, например, устройства разделителей газовых смесей, интенсификаторов процессов горения, в вихревых холодильниках и холодильниках-нагревателях, в осушителях воздуха и газов. Считается рациональным применение ВТ в системах циклического нагрева и охлаждения для попеременного использования как холодного, так и горячего воздуха и при небольших производительностях по холоду [10, 11].

В настоящее время авторами в научной и специальной литературе не обнаружено примеров применения ВТ в технологических процессах сельскохозяйственного производства. В то же время прослеживается новая перспективная область применения ВТ в процессе сушки и хранения сельскохозяйственной продукции, когда по технологическим требованиям необходима попеременная подача в слой нагретого и охлажденного воздуха (сушка травы при заготовке грубых кормов и т. п.).

Наиболее перспективным направлением применения ВТ в промышленности являются хранилища сочного растительного сырья (СРС), в которых технологически требуется сравнительно небольшой период эксплуатации холодильных установок (не более 10...15 суток в период охлаждения насыпи закладываемой на хранение продукции). В весенний период холодопроизводительности установок достаточно на продление технологических температурных параметров хранения до 15 суток. Таким образом, с учетом периодичности работы систем активной вентиляции охлажденный воздух в насыпи СРС необходимо подавать не более 180 часов в год. Отметим сравнительно небольшую холодопроизводительность систем охлаждения воздуха, требуемую для поддержания температурно-влажностного режима в насыпях СРС [12].

По результатам проведенных в ННГАСУ экспериментальных исследований ВТ, авторами получены термодинамические и теплотехнические характеристики вихревых энергоразделителей. На рис. 1 и 2 приведены графические интерпретации влияния давления сжатого воздуха  $p_1^*$  на входе в ВТ на степень



охлаждения  $\Delta t_x$  и нагрева  $\Delta t_r$  воздуха за трубой на её холодопроизводительность  $\mu \cdot \Delta t_x$  и теплопроизводительность  $(1-\mu) \cdot \Delta t_r$  при различных значениях  $\mu = G_x / G$  и абсолютных давлениях сжатого воздуха  $p_1^* = 5,0$  ата, 4,0 ата и 3,0 ата.

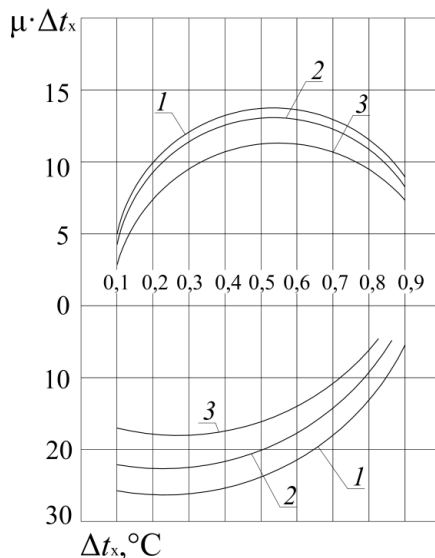


Рис. 1. Характеристики  $\Delta t_x = f_1(\mu)$  и  $\mu \Delta t_x = f(\mu)$  для давлений сжатого воздуха:  
1 –  $p_1^* = 5$  ата; 2 –  $p_1^* = 4$  ата; 3 –  $p_1^* = 3$  ата

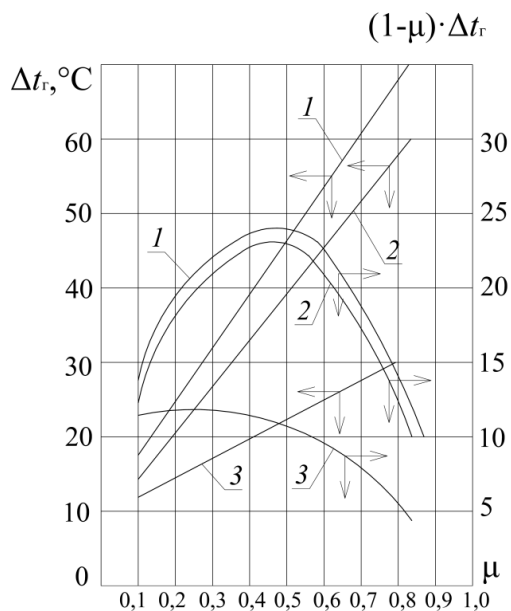


Рис. 2. Характеристики  $\Delta t_r = f_1(\mu)$  и  $(1-\mu) \Delta t_r = f(\mu)$  для давлений сжатого воздуха:  
1 –  $p_1^* = 5$  ата; 2 –  $p_1^* = 4$  ата; 3 –  $p_1^* = 3$  ата



При получении тепловых и аэродинамических показателей использовалась ВТ со следующими характеристиками: внутренний диаметр  $D = 10$  мм; длина рабочей части (камеры энергетического разделения)  $L = 120$  мм; относительная длина  $L/D = 120/10 = 12$ ; диаметр диафрагмы  $D_d = 5$  мм; относительный диаметр диафрагмы  $\bar{d}_d = D/D_d = 10/5 = 2$ .

Анализ рис. 1 позволяет сделать вывод, что максимальный эффект охлаждения воздуха  $\Delta t_x$  наблюдается при  $\mu = 0,2 \dots 0,35$  (рис. 1). Он возрастает с увеличением величин  $p_1^*$ . Максимальное значение  $\Delta t_x$  находится в пределах  $22 \dots 24$  °С при  $p_1^* = 5,0$  ата, до  $20 \dots 24$  °С – при  $p_1^* = 4,0$  ата и  $16 \dots 19$  °С – при  $p_1^* = 3,0$  ата.

На рис. 2 показано, что максимальный наблюдаемый в экспериментах эффект нагрева воздуха в ВТ  $\Delta t_r$  наблюдается при  $\mu > 0,85$ , а минимальные значения  $(1 - \mu) \cdot \Delta t_r$  при  $\mu = 0,4$  ( $p_1^* = 3,0$  ата),  $\mu = 0,4 \dots 0,55$  ( $p_1^* = 4,0$  ата),  $\mu = 0,5 \dots 0,6$  ( $p_1^* = 5,0$  ата). Абсолютные значения  $\Delta t_r$  достигали  $70$  °С и выше ( $p_1^* = 5,0$  ата), более  $60$  °С ( $p_1^* = 4,0$  ата), превышали  $30$  °С ( $p_1^* = 3,0$  ата), а величины  $(1 - \mu) \cdot \Delta t_r \approx 45, 42$  и  $27$ , соответственно, при  $p_1^* = 5,0; 4,0; 3,0$  ата.

Выработанная вихревыми энергоделителями теплота может быть использована в качестве дополнительной для систем отопления хранилищ.

При использовании ВТ предлагается их рациональная установка в укрупненные блоки для получения расчетной (заданной) холодопроизводительности. Схема обвязки блока ВТ из 10 одинаковых вихревых труб приведена на рис. 3. В осенний и весенний периоды года нагретый поток воздуха удаляется в атмосферу, а холодный поток направляется в приточный воздуховод системы вентиляции. В холодный период года горячий поток воздуха поступает в приточный воздуховод, а холодный поток удаляется в атмосферу.

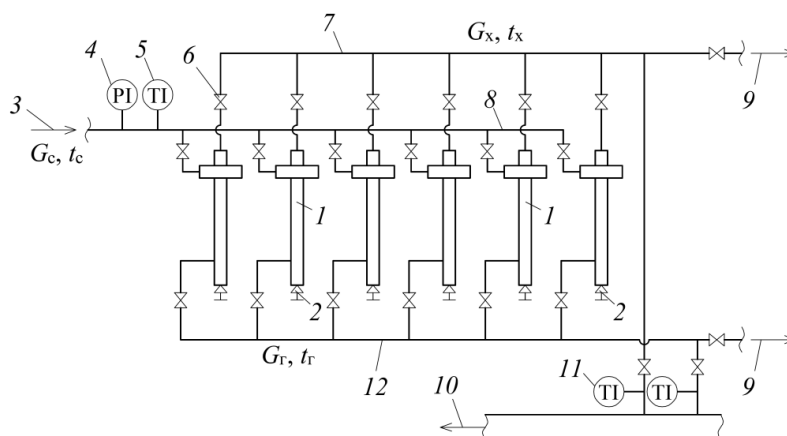


Рис. 3. Принципиальная схема обвязки блока вихревых труб: 1 – ВТ; 2 – дроссель; 3 – сжатый воздух от компрессора; 4 – манометр; 5 – термометр на входе в установку; 6 – отсекающая арматура; 7 – магистраль холодного воздуха; 8 – магистраль сжатого воздуха; 9 – выброс в атмосферу; 10 – магистраль поступающего в насыпь воздуха; 11 – термометр на выходе из установки; 12 – магистраль горячего воздуха

Учеными ННГАСУ [1, 5] были проведены исследования с сопоставлением приведенных затрат и выявлены допустимые области применения аналогичных по производительности рассматриваемым ВТ парокомпрессионных генераторов холода и детандеров.

Графическая зависимость максимальной производительности вихревого холодильного устройства с адиабатной ВТ от годовой производительности его работы приведена на рис. 4. Точки, лежащие в заштрихованных областях кривых, соответствуют равенству приведенных затрат вихревого и другого сравниваемого с ним охладителя. Наличие двух кривых и расположенных между ними заштрихованных областей для турбодетандеров 1 и для парокомпрессионных холодильников 2 дано для случаев, когда отношения стоимости электроэнергии при сопоставлении различаются приблизительно в три раза.

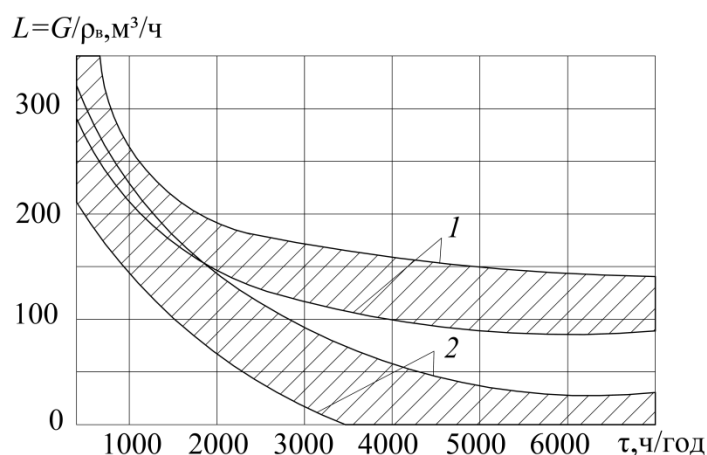


Рис. 4. Зависимость максимальной производительности вихревого холодильника от годовой продолжительности работы: 1 – относительно вихревого холодильника с турбодетандерами; 2 – относительно вихревого холодильника с холодильниками, использующими фреон

Анализ приведенных на рис. 4 кривых показывает, что экономичность вихревых холодильников снижается с увеличением их воздухопроизводительности и годовой продолжительности эксплуатации. Это объясняется большими энергетическими затратами при производстве сжатого воздуха, который является «рабочим телом» ВТ.

Например, при годовой продолжительности эксплуатации 2000 ч и максимальной текущей цене электроэнергии вихревой холодильник имеет наивысшую по приведенным затратам производительность  $L = G/\rho_v = 145$  и  $70 \text{ м}^3/\text{ч}$  соответственно по сравнению с турбодетандерным и парокомпрессионным способами охлаждения воздуха (где  $G$  – массовый расход воздуха,  $\text{кг}/\text{ч}$ ;  $\rho_v$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ). Полученный диапазон расходов охлажденного воздуха может быть принят за оптимальный при эксплуатации ВТ для охлаждения воздуха в системах активной вентиляции насыпи сочного растительного сырья овощекартофелехранилищ.

#### Выводы по проведенным исследованиям

По результатам аналитических и экспериментальных исследований, а также анализа литературных данных адиабатных вихревых энергоделителей



авторами сделаны выводы, что, несмотря на низкий термодинамический КПД, они являются не только оптимальными, но и теплотехнически рациональными аппаратами по выработке холода и теплоты для овощекартофелехранилищ в круглогодичном цикле эксплуатации. При проведении дальнейших исследований авторами будут изучены методы повышения энергоэффективности технологических конструкций укрупненных блоков вихревых холодильников.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дыскин, Л. М. Вихревые термостаты и воздухоохладители / Л. М. Дыскин. – Нижний Новгород: ННГУ, 1991. – 85 с.
2. Меркулов, А. П. Вихревой эффект и его применение в технике / А. П. Меркулов. – Москва : Машиностроение, 1969. – 183 с.
3. Султанова, Е. И. Вихревая труба как источник получения холода в лаборатории / Е. И. Султанова. – Текст : электронный // Инженерная механика в нефтегазовом деле : Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию факультета инженерной механики, Москва, 19–20 сентября 2018 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, 2018. – С. 11.
4. Суслов, А. Д. Вихревые аппараты / А. Д. Суслов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин, Ю. В. Чижиков. – Москва : Машиностроение, 1985. – 256 с.
5. Дыскин, Л. М. Повышение эффективности вихревой трубы / Л. М. Дыскин, А. К. Васин. – Текст : непосредственный // Великие реки – 2005 : Тезисы докладов Международного конгресса «Великие реки 2005», Нижний Новгород, 17–20 мая 2005 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2005. – С. 182.
6. Дыскин, Л. М. К расчету вихревых термостатов / Л. М. Дыскин // Известия высших учебных заведений. Энергетика. – 1985. – № 10. – С. 101–104.
7. Abdullaev, B. Natural gas purification from high hydrocarbons in a vortex tube / B. Abdullaev, A. Begmatov // *Universum: технические науки*. – 2025. – No. 5-11 (134). – P. 29-32. – DOI 10.32743/UniTech.2025.134.5.20000.
8. Картапов, Б. А. Разработка математической модели вихревой трубы / Б. А. Картапов. – Текст : электронный // Актуальные проблемы инженерных наук : материалы VIII (65-й) ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета, Ставрополь, 12–30 апреля 2021 года. – Ставрополь: Издательский дом «Тэсэра», 2021. – С. 304–309.
9. Пиралишвили, Ш. А. Визуализация структуры течения в противоточной вихревой трубе / Ш. А. Пиралишвили, С. В. Веретенников, В. А. Тряпина // *Тепловые процессы в технике*. – 2023. – Том 15, № 10. – С. 439–447.
10. Gutak, A. D. Experimental investigation and industrial application of Ranque-Hilsch vortex tube / A. D. Gutak // *International Journal of Refrigeration*. – 2015. – Volume 49. – P. 93–98. – DOI 10.1016/j.ijrefrig.2014.09.021.
11. Xue, Y. A critical review of temperature separation in a vortex tube / Y. Xue, M. Arjomandi, R. Kelso // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2010. – Volume 34, № 8. – P. 1367–1374. – DOI 10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010.
12. Луков, В. П. Исследования эффективности охлаждения воздухом с применением вихревой трубы / В. П. Луков. – Текст : электронный // *Современные материалы, техника и технологии*. – 2023. – № 2 (47). – С. 80–84.



**BODROV Mikhail Valerevich<sup>1</sup>, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of heating and ventilation; CHEKARDOVSKY Mikhail Nikolaevich<sup>2</sup>, doctor of technical sciences, professor, professor of the chair of engineering systems and structures; PYLAEV Aleksandr Nikolaevich<sup>1</sup>, postgraduate student of the chair of heating and ventilation; BESHLYAGA Artyom Vladislavovich<sup>1</sup>, master degree student of the chair of heating and ventilation**

## **PERSPECTIVES OF USING VORTEX TUBES IN AGRICULTURAL STORAGE FACILITIES**

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.  
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.  
Tel.: (831) 430-54-85; e-mail: tes84@inbox.ru

<sup>2</sup>Tyumen Industrial University.  
38, Volodarsky Street, Tyumen, 625000, Russia.  
Tel.: (3452) 28-37-71; e-mail: chekardovskijmn@tyuiu.ru

*Key words:* vortex tubes, vegetable and potato storage facilities, vortex effect, mass air flow rate, cooling capacity, heating capacity.

---

*The results of experimental studies of low-pressure vortex pipes are presented. The technical and economic conditions for using vortex energy separators in technological air conditioning systems for vegetable and potato storage facilities are substantiated. A technological scheme for large-scale vortex refrigerators for cooling air in active ventilation systems for juicy plant raw materials has been developed.*

---

## REFERENCES

1. Dyskin L. M. Vihrevye termostaty i vozduhookhladiteli [Vortex Thermostats and Air Coolers]. Nizhny Novgorod, NNGU, 1991. 85 p.
2. Merkulov A. P. Vihrevoy effekt i ego primeneniye v tekhnike [Vortex effect and its application in engineering]. Moscow, Mashinostroenie, 1969, 183 p.
3. Sultanova E. I. Vihrevaya truba kak istochnik polucheniya holoda v laboratorii [Vortex tube as a source of cold in the laboratory]. Inzhenernaya mekhanika v neftegazovom dele [Engineering mechanics in the oil and gas industry] : Sbornik tezisov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 75-letiyu fakulteta inzhenernoy mekhaniki, Moscow, 19–20 sentyabrya 2018 goda. Moscow, Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet nefti i gaza (natsionalny issledovatel'skiy universitet) imeni I. M. Gubkina, 2018. P 11.
4. Suslov A. D., Ivanov S. V., Murashkin A. V., Chizhikov Yu. V. Vihrevye apparaty [Vortex apparatuses]. Moscow, Mashinostroenie, 1985, 256 p.
5. Dyskin L. M., Vasin A. K. Povysheniye effektivnosti vikhrevoy trubyy [Increasing the Efficiency of a Vortex Pipe]. Velikie reki – 2005 [Great Rivers – 2005] : Tezisy dokladov Mezhdunarodnogo kongressa «Velikie reki 2005», Nizhniy Novgorod, 17–20 maya 2005 goda. Nizhniy Novgorod, Nizhegorodskiy gosudarstvennyy arhitekturno-stroitelnyy universitet, 2005. P 182.
6. Dyskin L. M. K raschetu vikhrevykh termostatov [To the calculation of vortex thermostats]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energetika [News of higher educational institutions. Energetika]. 1985, № 10, P. 101–104.
7. Abdullaev B., Begmatov A. Natural gas purification from high hydrocarbons in a vortex tube. Universum: tekhnicheskie nauki [Universum: Technical sciences], 2025, No. 5-11 (134). P. 29–32. DOI 10.32743/UniTech.2025.134.5.20000.



8. Kartapov, B. A. Razrabotka matematicheskoy modeli vikhrevoy trubyy [Development of a Mathematical Model of a Vortex Pipe]. Aktualnye problemy inzhenernykh nauk [Actual Problems of Engineering Sciences] : materialy VIII (65y) ezhegodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Severo-Kavkazskogo federalnogo universiteta, Stavropol, 12–30 aprelya 2021 goda. Stavropol, Tesera, 2021. P 304–309.

9. Pirashvili Sh. A., Veretennikov S. V., Tryapina V. A. Vizualizatsiya struktury techeniya v protivotochnoy vikhrevoy trubey [Visualization of the Flow Structure in a Counterflow Vortex Pipe]. Teplovye processy v tekhnike [Thermal Processes in Engineering]. 2023, № 10, Vol. 15. P. 439–447.

10. Gutak A. D. Experimental investigation and industrial application of Ranque-Hilsch vortex tube. International Journal of Refrigeration. 2015, Vol. 49. P. 93–98. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2014.09.021.

11. Xue Y., Arjomandi M., Kelso R. A critical review of temperature separation in a vortex tube. Experimental Thermal and Fluid Science. 2010, Vol. 34, №. 8. P. 1367–1374. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010.

12. Lukov V. P. Issledovaniya effektivnosti okhlazhdeniya vozduhom s primeneniem vikhrevoy trubyy [Research on the Effectiveness of Air Cooling Using a Vortex Tube]. Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii [Modern Materials, Techniques, and Technologies], 2023, № 2 (47). P. 80–84.

© **М. В. Бодров, М. Н. Чекардовский, А. Н. Пылаев, А. В. Бешляга, 2026**

Получено: 23.01.2026 г.