



УДК 697.7

**М. В. БОДРОВ**, д-р техн. наук, зав. кафедрой отопления и вентиляции,  
**А. Н. ПЫЛАЕВ**, аспирант кафедры отопления и вентиляции

### **ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ТРУБ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ НАСЫПИ СОЧНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ**

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-85;  
эл. почта: tes84@mail.ru

*Ключевые слова:* вихревая труба, эффект Ранка, охлаждение насыпи сочного растительного сырья, энергетическое разделение потока.

---

*Приведены теоретические основы расчета вихревых энергоразделителей. Рассмотрена возможность внедрения вихревых труб в систему технологического кондиционирования насыпи сочного растительного сырья.*

---

В 1931 г. Жозефом Ранком был открыт вихревой эффект энергетического разделения газов, называемый часто эффектом Ранка. После доклада Ранка Французскому физическому обществу о своем открытии о нем забыли, и только с 1946 года вихревой эффект стал объектом исследований ученых разных стран. В СССР в XX веке первые широкие исследования вихревого эффекта были проведены проф. В. С. Мартыновским и доц. В. П. Алексеевым. Большую работу по созданию вихревых вакуум-аппаратов провела группа под руководством д-ра техн. наук М. Г. Дубинского, которым был опубликован ряд теоретических работ по закрученным потокам. Большое количество экспериментов по исследованию вихревого эффекта, проведенных в нашей стране и за рубежом, позволило раскрыть его основные особенности и подойти к теоретическому обоснованию.

Внешне простой вихревой эффект на самом деле включает в себе самый сложный газодинамический процесс, происходящий в пространственном турбулентном потоке вязкого сжимаемого газа. Этим фактом объясняется неудача попыток многих ученых найти аналитическое решение задачи. На основе проведенных исследований разработаны полуэмпирические методики расчета вихревого эффекта и некоторых видов вихревых аппаратов [1]. Несмотря на внешнюю простоту реализации вихревого эффекта, хороших результатов можно добиться только при выполнении некоторых специфических для вихревых аппаратов требований.

В первую очередь эти требования относятся к конструктивному исполнению вихревой трубы. Ввиду сравнительно низкой экономичности вихревой трубы режим ее должен быть подобран строго соответствующим заданным условиям. Предельная эффективность вихревой трубы обеспечивается хорошей организацией входа сжатого газа в сопло и вихревую зону, строгой цилиндричностью и чистотой омываемых вихрем поверхностей, достаточной длиной вихревой зоны и правильным выбором ее ограничителя. Для предотвращения подогрева вытекающего из отверстия диафрагмы холодного потока при омывании им теплых поверхностей обращенные к холодному потоку поверхности диафрагмы и корпуса следует покрывать теплоизолирующим слоем.

Построенная по спирали Архимеда внутренняя поверхность улитки должна быть тщательно отполирована.

При проектировании более сложных, основанных на вихревом эффекте установок, необходимо всегда иметь в виду основные преимущества вихревой трубы: исключительную простоту и надежность работы, которые и позволяют заменить ей в некоторых случаях термодинамически более совершенные аппараты. Поэтому с целью сохранения этих преимуществ в качестве вспомогательных устройств для утилизации энергии горячего потока следует применять струйный эжектор, а для регенерации – противоточный рекуперативный теплообменник.

Теплообменник оказывается наиболее сложным агрегатом в подобных установках и от его работы в большой степени зависят достижимые температурные пределы. Теплообменник должен удовлетворять следующим основным требованиям: максимально приближаться к противоточному и обеспечивать максимальную регенерацию при минимальном теплообмене с окружающей средой; иметь малые гидравлические сопротивления в трактах при максимальном коэффициенте теплоотдачи; иметь малую тепловую инерционность, малочувствительным к конденсации и замерзанию влаги на его рабочих поверхностях, а также устойчивость к коррозии.

Конструктивная схема вихревого энергоделителя (противоточной вихревой трубы) приведена авторами на рис. 1.

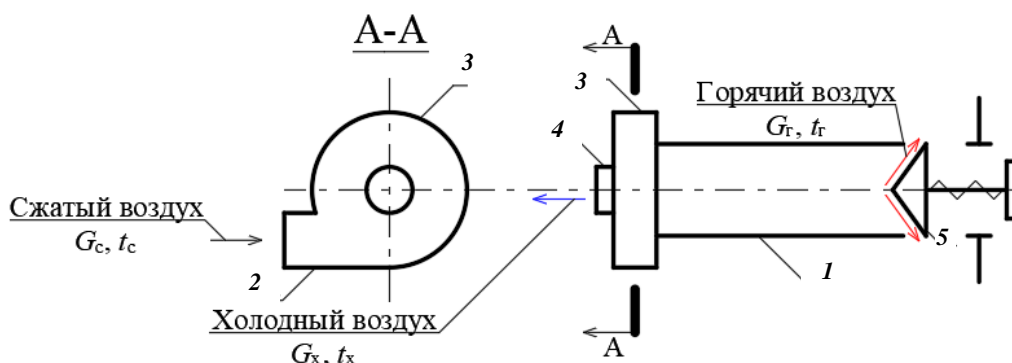


Рис. 1. Принципиальная схема вихревой трубы

Вихревая труба представляет собой гладкую цилиндрическую трубу (1), снабженную тангенциальным соплом (2), улиткой (3), диафрагмой с осевым отверстием (4) и дросселем (5). При втекании сжатого воздуха через сопло образуется круговой поток, приосевые слои которого заметно охлаждаются и отводятся через отверстие диафрагмы в виде холодного потока, а периферийные слои подгреваются и вытекают через дроссель в виде горячего потока. Образование охлажденного и нагретого потоков является результатом перераспределения энергии входящего в вихревую трубу сжатого газа. При отсутствии теплообмена с окружающей средой суммарное количество энергии охлажденного и нагретого потоков по закону сохранения энергии равно количеству энергии поступающего газа и определяется [2, 3]:



$$G_c \cdot i_c = G_x \cdot i_x + G_T \cdot i_T, \quad (1)$$

где  $G_c = G_x + G_T$  – расход сжатого газа, кг/с;  $G_x, G_T$  – расход соответственно охлажденного и нагретого потоков, кг/с;  $i_c, i_x, i_T$  – удельная энтальпия соответственно сжатого, охлажденного и нагретого потоков газа, Дж/кг.

Используя уравнение материального баланса и пренебрегая изменением удельной теплоемкости  $c_p$  газа, можно получить уравнение, связывающее эффекты охлаждения и нагревания газа в вихревой трубе с расходом одного из выходящих потоков (2):

$$\mu \cdot \Delta T_x = (1 - \mu) \cdot \Delta T_T, \quad (2)$$

где  $\mu = G_x / G_c$  – относительный расход (доля) охлажденного потока;  $\Delta T_x = T_c - T_x$  – эффект охлаждения охлажденного потока, К;  $\Delta T_T = T_T - T_c$  – эффект нагревания нагретого потока, К;  $T_c, T_x, T_T$  – температура соответственно сжатого газа, охлажденного и нагретого потоков, К.

При расчете конструкций современных вихревых труб нельзя пренебрегать теплообменом с окружающей средой. В ряде случаев специально предусмотрено интенсивное охлаждение стенок камеры разделения:

$$\mu \cdot \Delta T_x = (1 - \mu) \cdot \Delta T_T + \frac{q_{\text{охл}}}{c_p}, \quad (3)$$

где  $q_{\text{охл}} = Q_{\text{охл}} / G_c$  – удельный тепловой поток, Дж/кг;  $Q_{\text{охл}}$  – тепловой поток от стенок камеры в окружающую (охлаждающую) среду, Вт;  $c_p$  – удельная массовая теплоемкость, Дж / (кг · К).

Коэффициент температурной эффективности представляет собой отношение получаемого эффекта охлаждения  $\Delta T_x$  к эффекту охлаждения  $\Delta T_s$  при изоэнтальпийном расширении газа с параметрами  $p_c$  и  $T_c$  до давления охлажденного потока:

$$\eta_T = \frac{\Delta T_x}{\Delta T_s} = \frac{\Delta T_x}{T_c [1 - (1/\varepsilon)^{(k-1)/k}]}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon = p_c / p_x$  – степень расширения газа в вихревой трубе ( $p_c$  и  $p_x$  – давление сжатого газа и охлажденного потока), Па;  $T_c$  – температура сжатого газа, К;  $k$  – показатель адиабаты.

Адиабатный КПД равен отношению реальной холодопроизводительности к максимально возможной в идеальном процессе расширения с отдачей работы [4, 5]:

$$\eta = \frac{\mu \cdot \Delta T_x}{\Delta T_s}. \quad (5)$$

Рассматривая эффективность вихревой трубы, следует помнить, что необратимость процесса энергетического разделения газов, протекающего в ней, делает вихревую трубу низкоэффективным устройством. Основной зависимостью, отображающей работу вихрей трубы в качестве генератора тепла и холода, является зависимость эффекта охлаждения от различных факторов,

поэтому для построения обобщенных характеристик теплоизолированной вихревой трубы используются следующие безразмерные величины:  $\mu$ ,  $\pi$ , и  $\eta$ , представлены на рис. 2 [1].

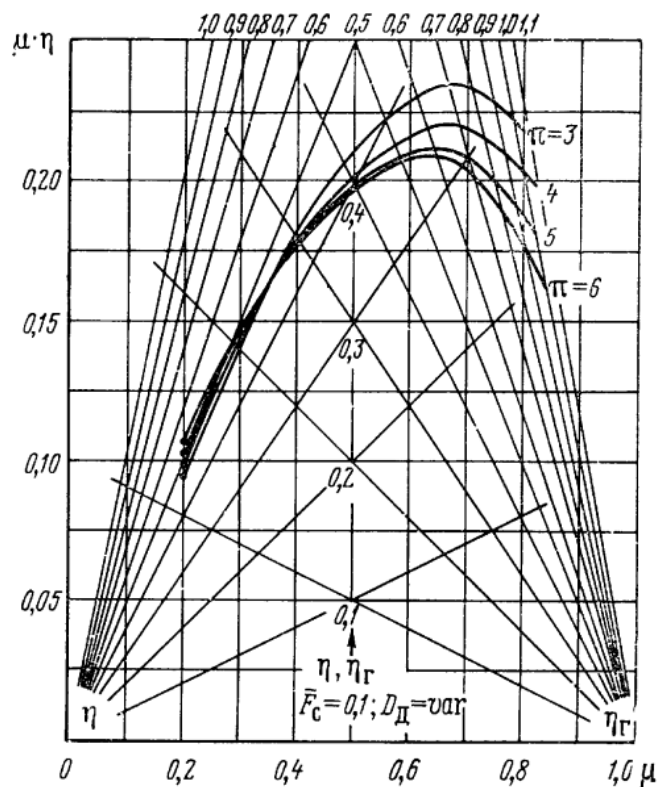


Рис. 2. Обобщенные характеристики вихревой трубы

В некоторых случаях, несмотря на сравнительно низкую термодинамическую эффективность процесса энергоразделения в вихревых трубах, целесообразность использования устройств на их основе вихревых аппаратов не вызывает сомнения [5]: абсолютная простота конструкции, ее высокая надежность и большой ресурс, доступность обслуживания без предъявления каких-либо особых квалификационных требований к обслуживающему персоналу; выполнение одновременно несколько функций (охлаждение и нагревание, охлаждение, осушка и нагревание, охлаждение и очистка, охлаждение и ректификация, охлаждение и озонирование и др.); сравнительно малые габариты и вес; организация процессов охлаждения, термостатирования, кондиционирования практически на любом экологически чистом рабочем газе (например, воздухе); создание потока охлажденного или подогретого газа во многих случаях исключает необходимость промежуточной передачи эксергии от одного теплоносителя к другому, обеспечивая при этом заметное снижение потерь и сохранение исходной холодо- или теплопроизводительности.

Одной из перспективных областей применения вихревых труб является хранение сельскохозяйственной продукции, в частности сочного растительного сырья, особенно, когда технология производства требует попеременной подачи горячего и холодного потоков в слой.



Технологические особенности хранения насыпи картофеля, особенно наличие периода охлаждения при закладке картофеля в овощекартофелехранилища, вызывает необходимость применения искусственных источников холода, особенно в южных районах нашей страны. Особенности формирования параметров микроклимата в овощекартофелехранилищах позволяют холодильным установкам на основе вихревых труб не только конкурировать по энергоэффективности с компрессионными, но и иметь по сравнению с ними явные технологические и экономические преимущества. Кроме того, вихревые трубы могут быть использованы в режиме аварийного отопления помещений хранилищ [6].

При использовании вихревых труб считается рациональным объединять их в блоки. Технологическая схема установки для создания холодного воздуха в весенний и летний периоды и теплого воздуха зимой на основе применения вихревых труб приведены на рис. 3.

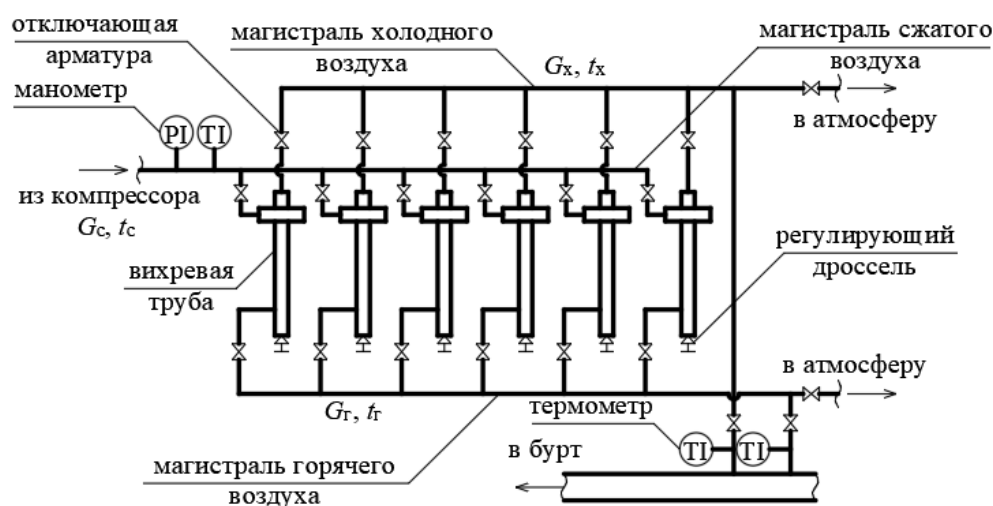


Рис. 3. Схема технологической холодильной установки на основе вихревых труб

Вихревые трубы снабжаются сжатым воздухом из компрессора по магистралям сжатого воздуха. Отметим, что наличие данных магистралей со сжатым воздухом является технологической необходимостью практически любого овощекартофелехранилища. Холодный поток поступает от каждой вихревой трубы в магистраль холодного воздуха, а горячий – в магистраль горячего воздуха. Регулирование относительного расхода каждой трубы осуществляется дросселями за счет снижения площади живого сечения. Для наблюдения за температурой и давлением предусмотрены термометры и манометры. После вихревых труб воздух поступает в воздуховод, который проведен до помещения с корнеплодами. Установка режимов работы и отключение вихревых труб по периодам года осуществляется отключающей арматурой. В осенний и весенний периоды года горячий воздух удаляется в атмосферу, а холодный направляется в систему вентиляции (и/или продувки насыпи продукции). В холодный период года холодный воздух удаляется в атмосферу, а горячий поступает в помещение.



Экономичность вихревых холодильников снижается с увеличением их производительности и годовой продолжительности работы. Это объясняется большими энергетическими затратами при производстве сжатого воздуха, который является «рабочим телом» вихревой трубы [6].

В заключение авторы отмечают, что динамика полей относительной влажности в насыпях продукции имеет саморегулирующийся характер, который определяется ее теплофизическими свойствами, что не зависит от формирования температурных полей в циклах вынужденной и естественной конвекции. Возможность разделения процессов контроля тепла и влаги при охлаждении продукции позволяет упростить общие аналитические решения по нахождению закономерностей формирования температурных полей [7].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меркулов, А. П. Вихревой эффект и его применение в технике / А. П. Меркулов. – Москва : Машиностроение, 1969. – 183 с. – Текст : непосредственный.
2. Бодров, М. В. Расчет вихревых энергоделителей для систем холодо- и теплообеспечения овощекартофелехранилищ / М. В. Бодров. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – С. 370–376.
3. Суслов, А. Д. Вихревые аппараты / А. Д. Суслов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин, Ю. В. Чижиков. – Москва : Машиностроение, 1985. – 256 с. – Текст : непосредственный.
4. Кириллин, В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – Москва : Книга по Требованию, 2013. – 416 с. – Текст : непосредственный.
5. Пиралишвили, Ш. А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш. А. Пиралишвили, В. М. Поляев, М. Н. Сергеев ; под редакцией А. И. Леонтьева. – Москва : Энергомаш, 2000. – 412 с. – Текст : непосредственный.
6. Бодров, В. И. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха производственных зданий сельхозназначения / В. И. Бодров, Л. М. Махов, Е. В. Троицкая. – Москва : АСВ, 2014. – 240 с. – ISBN 978-5-4323-0025-6. – Текст : непосредственный.
7. Повышение энергоэффективности пассивных систем обеспечения параметров микроклимата в производственных помещениях / М. В. Бодров, А. А. Смыков, А. Ф. Юланова, А. Е. Руин. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 4 (60). – С. 84–89.

**BODROV Mikhail Valerevich, doctor of technical sciences, holder of the chair of heating and ventilation; PYLAEV Aleksandr Nikolaevich, postgraduate student of the chair of heating and ventilation**

#### THE USE OF VORTEX TUBES FOR COOLING THE MOUND OF JUICY VEGETABLE RAW MATERIALS

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia. Tel.: +7 (831) 430-54-85;  
e-mail: tes84@mail.ru

*Key words:* vortex tube, Ranque effect, cooling the mound of juicy vegetable raw materials, energy flow separation.



*The article presents theoretical fundamentals of the calculation of vortex energy separators. The possibility of introducing vortex tubes into the system of technological conditioning of a mound of succulent vegetable raw materials is considered.*

#### REFERENCES

1. Merkulov A. P. Vихревой эффект i ego primeneniye v tekhnike [Vortex effect and its application in engineering]. Moscow, Mashinostroeniye, 1969, 183 p.
2. Bodrov M. V. Raschyot vихреvykh energorazdeliteley dlya sistem kholodo- i teploobespecheniya ovoshchekartofelekhranilishch [Calculation of vortex energy separators for cold and heat supply systems of vegetable and potato storages]. Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU], 2011, № 7. P. 370-376.
3. Suslov A. D., Ivanov S. V., Murashkin A. V., Chizhikov Yu. V. Vихревые аппараты [Vortex apparatuses]. Moscow, Mashinostroeniye, 1985, 256 p.
4. Kirillin V. A., Sychyov V. V., Sheyndlin A. E. Tekhnicheskaya termodinamika [Technical thermodynamics]. Moscow, Kniga po Trebovaniyu, 2013. 416 p.
5. Piralishvili Sh. A., Polyayev V. M., Sergeev M. N. Vихревой эффект. Eksperiment, teoriya, tekhnicheskie resheniya [The vortex effect. Experiment, theory, technical solutions]. Pod red. A.I. Leonteva. Moscow, Energomash, 2000. 412 p.
6. Bodrov V. I., Makhov L. M., Troitskaya E. V. Otopleniye, ventilyatsiya i konditsionirovaniye vozdukha proizvodstvennykh zdaniy selkhozoznacheniya [Heating, ventilation and air conditioning of agricultural production buildings]. Moscow, ASV, 2014. 240 p. – ISBN 978-5-4323-0025-6.
7. Bodrov M. V., Smykov A. A., Yulanova A. F., Ruin A. E. Povysheniye energoeffektivnosti passivnykh sistem obespecheniya parametrov mikroklimate v proizvodstvennykh pomeshcheniyakh [Increasing the energy efficiency of passive systems providing microclimate parameters in industrial spaces ]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2021. № 4 (60). P. 84-89.

© М. В. Бодров, А. Н. Пылаев, 2023

Получено: 10.10.2023 г.