

## Математическое моделирование процессов холодоснабжения с использованием вихревых труб в овощехранилищах

*П.Л. Лекомцев, Е.В. Дресвянникова, А.М. Ниязов, С.В. Орлов*

*ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, г.Ижевск*

**Аннотация:** в статье рассмотрены вопросы моделирования тепловых эффектов в вихревых трубах с использованием прикладных программ, на примере CFD-комплекса FlowVision. Рассмотрены вопросы практического применения теплового эффекта в вихревых трубах, предложено использование процесса холодоснабжения в вихревых трубах для управления микроклиматом в овощехранилищах с целью повышения сохранности продукции. Данная статья представляет интерес для широкого круга читателей, занимающихся вопросами моделирования в пакетах прикладных программ.

**Ключевые слова:** тепловой эффект, холодоснабжение, теплоснабжение, микроклимат, моделирование, САПР, прикладная программа, 3D-модель. CFD-комплекс, FlowVision.

Решение продовольственной безопасности страны связано как с увеличением урожайности сельскохозяйственных культур, так и с повышением сохранности собранного урожая. Сохранность урожая важная задача, заключающаяся в сохранении качества и свежести продукции на длительный срок хранения. Одним из самых распространенных способов сохранения продукции в свежем виде – это консервация овощей. В данном случае мы говорим про консервацию – это хранение овощей при низких температурах. Понижение температуры в овощехранилище позволяет снизить обменные процессы в продукте, сократить потерю влаги и тем самым обеспечить свежесть овощей, пищевую пригодность, качество, товарный вид и витамины, так необходимые для здорового питания людей на более длительный период времени относительно того, если бы мы хранили продукцию при комнатной температуре. Современные технологии хранения овощей, позволяющие качественно сохранить урожай. [1-6] Тесно связаны с холодильными установками. Чаще всего в качестве холодильной установки используют компрессорную холо-

дильную установку, работающую по обратному тепловому циклу. Холодильники снижают температуру в хранилище до требуемых значений, но при этом тратится большое количество энергии на генерацию холода, поэтому поиск энергоэффективных и мало затратных технологий в процессах охлаждения сельскохозяйственной продукции является актуальной задачей.

В качестве одного из перспективных направлений развития в технологии хранения овощей можно отметить использование холодильных установок на основе вихревого эффекта. [3]

Вихревой эффект заключается в том, что при движении закрученного потока газа, наблюдается понижение температуры в центральных слоях потока газа. Эффект был обнаружен инженером Ж. Ранком в 1931 г. и подробно исследован физиком Р. Хильшем в 1946 г. [7,8,9,10]

Вихревой холодильно-нагревательный аппарат представляет собой цилиндрическую камеру, в которую тангенциально подается сжатый газ. Под действием центробежных сил газ разделяется на охлажденный и нагретый потоки. Через центральное отверстие из камеры вытекает охлажденный поток газа, нагретый поток получают из периферийных отверстий. [5,6,11,12]

Образование охлажденного и нагретого потоков газа 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, т.е.

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

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 известное выражение  $i=C_p \cdot T$ , 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 [13,14]

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

где  $\mu = G_X / G_T$  – относительный расход (доля) охлажденного потока;  $\Delta T_X = T_C - T_X$  – эффект охлаждения охлажденного потока;  $\Delta T_T = T_T - T_C$  – эффект нагревания нагретого потока;  $T_C$ ,  $T_X$  и  $T_T$  – температура соответственно сжатого газа, охлажденного и нагретого потоков, К.

При проектировании вихревой трубы, в зависимости от поставленных условий работы, определяющие размеры аппарата рассчитывают исходя из режима максимального охлаждения или режима максимальной холодопроизводительности. При неохлаждаемой камере разделения  $\Delta T_X$  достигает максимума при  $\mu = 0,2 \dots 0,4$ .

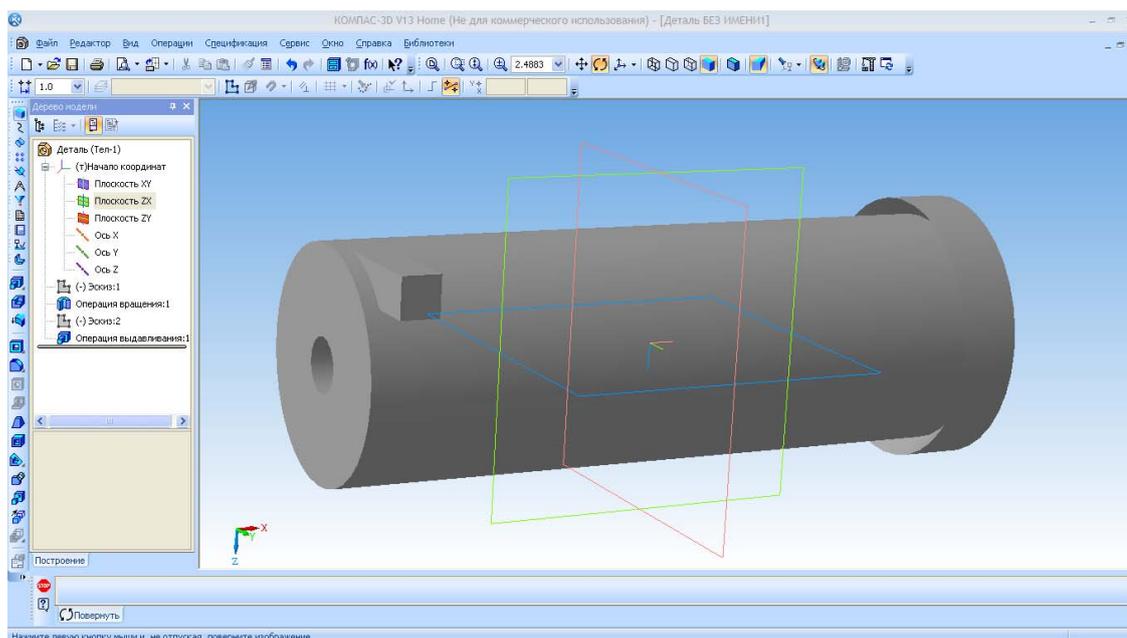
Для оптимизации параметров вихревых труб наряду с натурными экспериментальными стендами может использоваться также и численное моделирование при помощи современных CFD-комплексов, например, FlowVision. [15]

Для моделирования процессов в вихревой трубе необходимо создать 3D-модель вихревой трубы. Для этой задачи была использована САПР Компас 3D.

Геометрии расчетной области сохраняются в форматах VRML или STL. При импорте геометрии в FlowVision, система автоматически разбивает пространство на замкнутые подобласти, ограниченные геометрическими поверхностями. Дополнительно создается еще одна подобласть, которая является внешней по отношению к геометрии. [15,18]

Для решения поставленной задачи использовали модель: «полностью сжимаемая жидкость». Данная модель описывает стационарное и нестационарное движение смеси идеальных газов при любых числах Маха (до-, транс-, сверх- и гиперзвуковые течения). [14,16,17,18]

В качестве входной жидкости был выбран воздух при нормальных условиях.



**Рис.1. 3D модель вихревой трубы**

В результате решения задачи были получены поля температур и скоростей (рис.2, 3).

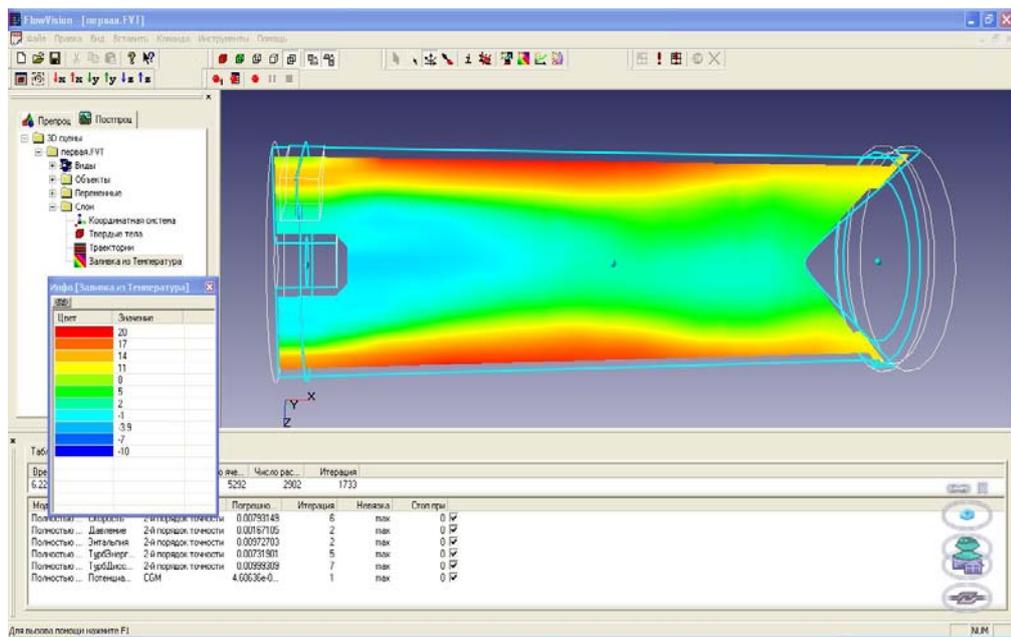


Рис.2. Поле температур вдоль трубы

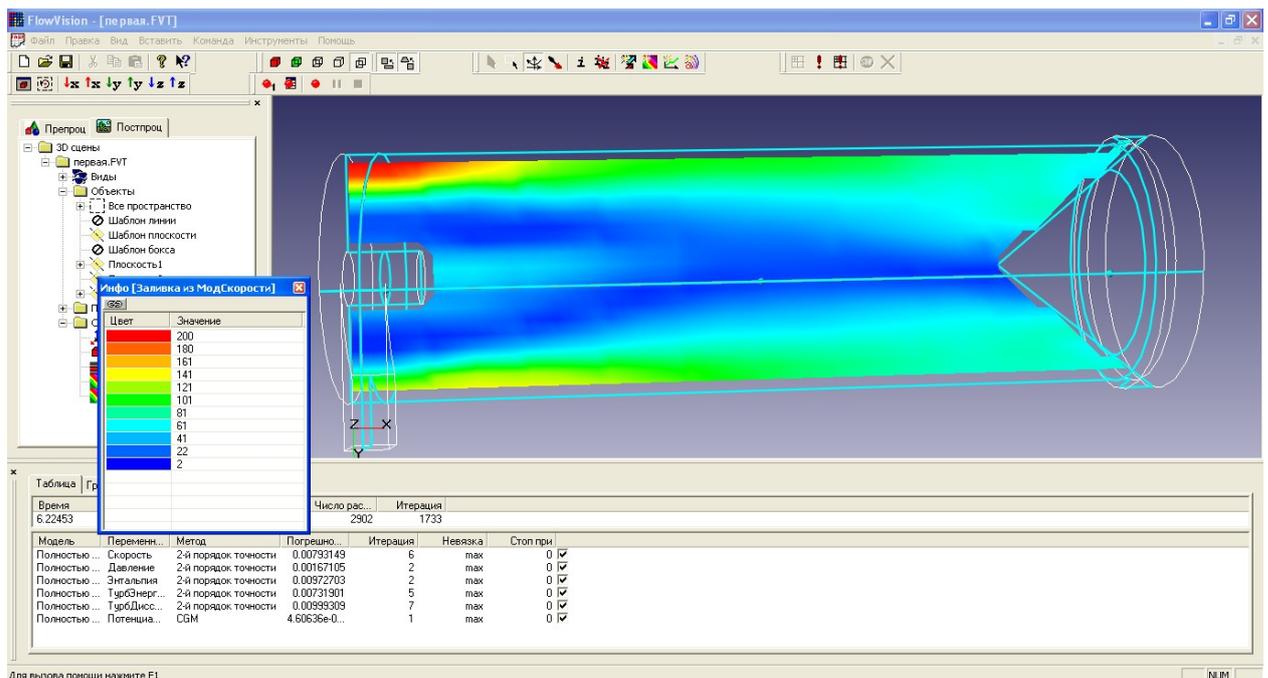
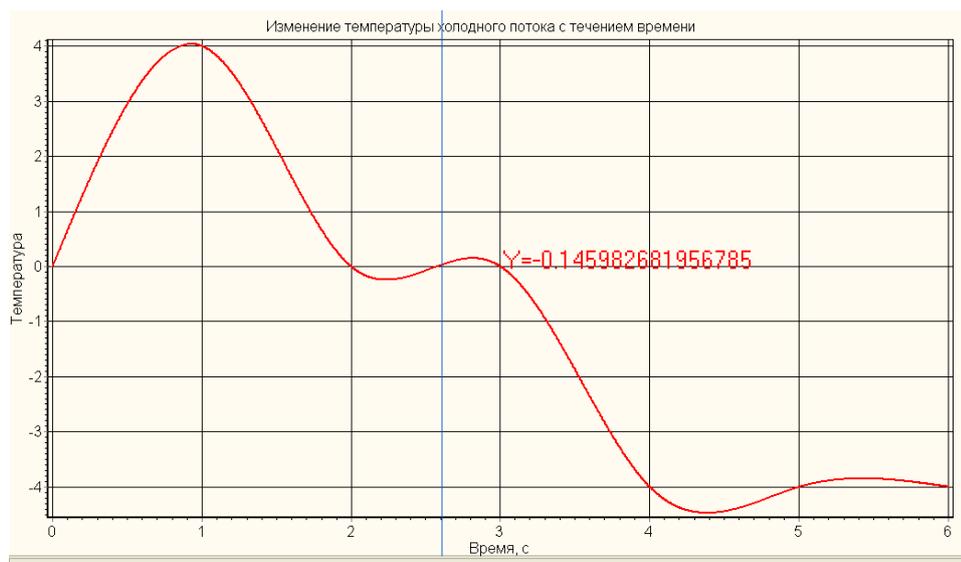
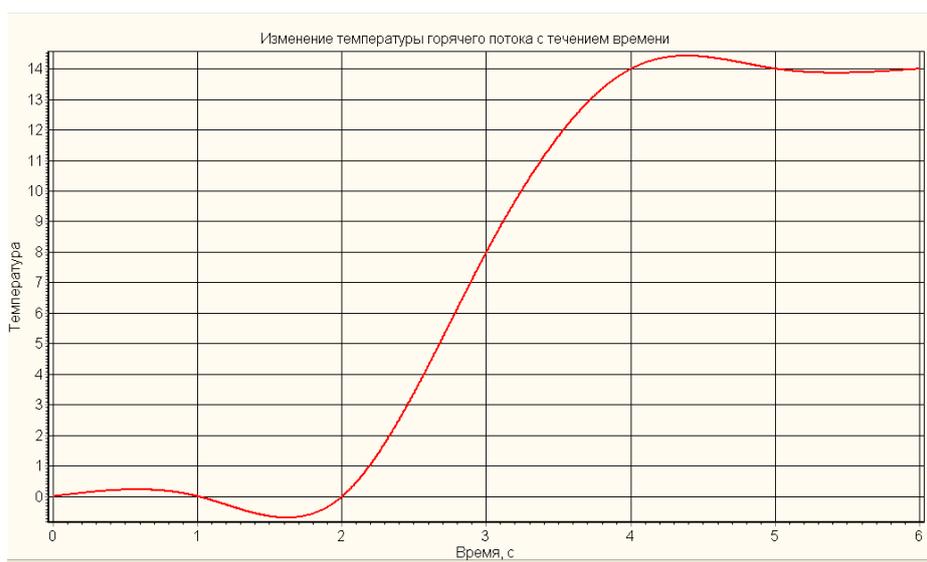


Рис.3. Поле скоростей вдоль трубы

По результатам моделирования построены характеристики изменения температуры потоков с течением времени (рис 4.5).



**Рис.4. Зависимость температуры холодного потока от времени**



**Рис.5. Зависимость температуры горячего потока от времени**

По графикам видно, что установившееся значение температуры достигается через 4 секунды после начала подачи сжатого воздуха в вихревую трубу. До того, как температура установится постоянной, наблюдаются пульсации температуры.

По цветовым заливкам можно определить перепад температур между холодным, и горячим концами, в данном случае он составил 18 градусов.

Этого достаточно для обеспечения холодом небольшого овощехранилища. При этом исчезает потребность в вентилировании камер.

В данной работе проведено исследование энергетических параметров вихревой трубы Ранка-Хильша с помощью численного моделирования, а также рассмотрены возможности применения вихревой трубы в сельском хозяйстве. Моделирование эффекта Ранка на программном комплексе FlowVision позволило наглядно показать процесс энергоразделения в сечении вихревой трубы, кроме того, были получены характеристики, с помощью которых становится возможным регулировать температуру горячего и холодного потоков. Также численное моделирование позволяет подобрать наиболее эффективную конструкцию вихревой трубы и ее частей.

Таким образом, установки на базе вихревой трубы можно считать одним из перспективных направлений развития холодильно-нагревательной техники применительно к сельскохозяйственной отрасли.

### Литература

1. Босин И.Н. Охлаждение молока на комплексах и фермах. М.: Колос, 1993. 43 с.
2. Долматова Ю.А., Шишкин Г.И. Исследование процесса сушки конверсионного карбоната кальция в трубе-сушилке с помощью математической модели // Инженерный вестник Дона. 2011. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/566](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/566).
3. Дресвянникова Е.В., Лекомцев П.Л., Савушкин А.В. Возможности регулирования процессов тепловлажностной обработки в массообменных аппаратах при воздействии электрического поля // Инженерный вестник Дона. 2014. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2235](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2235).
4. Каменев П.Н., Сканави А.Н., Богословский В.Н. Отопление и вентилиция. М., Стройиздат, 1975. 483 с.

5. Оболенский Н.В., Денисюк Е.А. Холодильное и вентиляционное оборудование. М.: КолосС, 2006. 248 с.
6. Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения // Под. ред. А.И. Леонтьева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.
7. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. 600 с.
8. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб., 2001. 108 с.
9. Гинзбург И.П. Аэрогазодинамика. М.: Высшая школа, 1966. 404 с.
10. Методы расчета турбулентных течений / Под ред. В.Колльмана. М.: Мир, 1984. 464 с.
11. Азаров А.И. Вихревые трубы нового поколения // Конструктор. Машиностроитель. 2007. №3. СПб. с.18-24.
12. Пиралишвили Ш.А., Шувалов В.В., Жорник М.Н. Термотрансформаторы. Рыбинск, 2002. 127 с.
13. Суслов А.Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В., Чижиков Ю.В. Вихревые аппараты. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
14. Хинце И.О. Турбулентность. Ее механизм и теория. М.: Физматгиз, 1963. 680 с.
15. FlowVision. Версия 2.5. Примеры решения типовых задач. М.: ООО «ТЕСИС», 2008. 203 с.
16. Frohlingdorf, W. Numerical investigation of the compressible flow and the energy separation in the Ranque – Hilsch vortex tube /W. Frohlingdorf, H. Under // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1999. №42. pp.415–422.
17. Richardson, L.F. Proc. Roy. Soc. 1920. Bd.97. p.354.
18. Русак А.М., Целищев В.А., Ахметов Ю.М., Соловьев А.А., Пархимович А.Ю. Экспериментальное исследование вихревой трубы //

Сборник трудов Российской научно-технической конференции «Мавлютовские чтения». Том 4. / Уфа: УГАТУ, 2006. С.101 – 105.

### References

1. Bosin I.N. Ohlazhdenie moloka na kompleksah i fermah. [Cooling milk complexes and farms]. M.: Kolos, 1993. 43 p.
  2. Dolmatova Ju.A., Shishkin G.I. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2011. № 4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/566.
  3. Dresvjannikova E.V., Lekomcev P.L., Savushkin A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2235.
  4. Kamenev P.N., Skanavi A.N., Bogoslovskij V.N. Otoplenie i ventiljacija [Heating and ventilation]. M., Strojizdat, 1975. 483 p.
  5. Obolenskij N.V., Denisjuk E.A. Holodil'noe i ventiljacionnoe oborudovanie [Refrigeration and ventilation equipment]. M.: KolosS, 2006. 248 p.
  6. Piralishvili Sh.A., Poljaev V.M., Sergeev M.N. Vihrevoj jeffekt. Jeksperiment, teoriya, tehnicheckie reshenija [Vortex effect. Experiment, theory, technical solutions] Pod. red. A.I. Leont'eva. M.: UNPC «Jenergomash», 2000. 412 p.
  7. Abramovich G.N. Prikladnaja gazovaja dinamika [Applied gas dynamics]. M.: Nauka, 1991. 600 p.
  8. Belov I.A., Isaev S.A. Modelirovanie turbulentnyh techenij [Simulation of turbulent flows]. SPb., 2001. 108 p.
  9. Ginzburg I.P. Ajerogazodinamika [Aerohidrodinamic] M.: Vysshaja shkola, 1966. 404 p.
  10. Metody rascheta turbulentnyh techenij [Methods of calculation of turbulent flows] / Pod red. V.Koll'mana. M.: Mir, 1984. 464 p.
  11. Azarov A.I. Konstruktor. Mashinostroitel'. 2007. №3. SPb. pp.18-24.
  12. Piralishvili Sh.A., Shuvalov V.V., Zhornik M.N. Termotransformatory [The thermo-transformers]. Rybinsk, 2002. 127 p.
  13. Suslov A.D., Ivanov S.V., Murashkin A.V., Chizhikov Ju.V. Vihrevye apparaty [Vortex apparatus]. M.: Mashinostroenie, 1985. 256 p.
  14. Hince I.O. Turbulentnost'. Ee mehanizm i teoriya [The turbulence. Its mechanism and theory]. M.: Fizmatgiz, 1963. 680 p.
-



15. FlowVision. Versija 2.5. Primery reshenija tipovyh zadach [Examples of typical tasks]. M.: ООО «TESIS», 2008. 203 p.

16. Frohlingsdorf, W. Numerical investigation of the compressible flow and the energy separation in the Ranque – Hilsch vortex tube W. Frohlingsdorf, H. Under. Int. J. Heat and Mass Transfer. 1999. №42. pp.415–422.

17. Richardson, L.F. Proc. Roy. Soc. 1920. Bd.97. p.354.

18. Rusak A.M., Celishhev V.A., Ahmetov Ju.M, Solov'ev A.A., Parhimovich A.Ju. Sbornik trudov Rossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Mavljutovskie chtenija» (Proc. All-Russian scientific-technical conference "Mavlutova reading"). Tom 4. Ufa: UGATU, 2006. pp.101 – 105.