

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВИХРЕВЫХ ТРУБ НА ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ТЕРМОСЕПАРАЦИИ

А.Ю. Орлов, Н.В. Орлова, М.В. Савушкин

Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; orlov.andrey1983@gmail.ru

**Ключевые слова и фразы:** вихревая труба; вихревой эффект; гидравлическое сопротивление.

**Аннотация:** Представлено исследование влияния конструктивно-технологических особенностей вихревых труб различных типов и конструктивных вариантов на их режимные характеристики и параметры процесса термосепарации.

### Обозначения

$a, b, n, z, k$ – коэффициенты аппроксимации;	$\Delta$ – погрешность расчетов, %;
$c$ – теплоемкость, Дж·кг <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> ;	$\Delta p$ – перепад давления на участке, Па;
$D$ – диаметр, м;	$\delta$ – относительное сопротивление на участке;
$F$ – площадь, м <sup>2</sup> ;	$\zeta$ – местные сопротивления;
$G$ – массовый расход воздуха, кг/с;	$\lambda$ – коэффициент трения;
$g$ – ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup> ;	$\mu$ – доля холодного потока, %.
$L$ – длина, м;	
$p$ – давление, Па;	
$Q$ – количество теплоты, Вт;	
$R$ – универсальная газовая постоянная, Дж·кг <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> ;	
$T$ – температура воздуха, К;	
	<b>Индексы</b>
	акт – активный; в.п – винтовой поток; вх – вход; вых – выход; гор – горячий; д – дроссель; диафр – диафрагма; закр – закручивающее устройство; о – открытый; ост – остаточный; пот – поток; с – струя; соп – сопло; тр – труба; хол – холодный.

Экономия энергоресурсов определяется дальнейшим развитием совершенствованием производств, а также радикальным улучшением использования тепловой энергии на промышленных предприятиях. При этом одним из направлений данного комплекса мероприятий является повышение эффективности работы топливоиспользующих и теплоэнергетических установок, так как именно здесь имеют место высокие потери энергоресурсов. Существенным резервом экономии является использование вторичных энергоресурсов, которые неизбежно появляются во многих энергоемких технологических процессах. Существуют теоретические и инженерные решения, обеспечивающие повышение КПД и эффективность работы теплоиспользующих агрегатов и установок, а также разработки по использованию теплоты вторичных энергоресурсов, обеспечивающие в конечном счете ощутимую экономию топливно-энергетических ресурсов.

Одним из возможных типов энергосбережения является термотрансформация (теплотрансформация) с использованием вихревой трубы Ранка-Хилша (ВТ). Основной физической феномен вихревого эффекта Ранка – это температурная стратификация сплошной среды: разделение исходного закрученного потока воздуха (газа, пара, жидкости) с равномерной по сечению начальной температурой на входе на два выходящих потока – «горячий» периферийный и «холодный» осевой.

Проблема термотрансформации до сих пор содержит многочисленные парадоксы и противоречия и представляет значительный научный интерес. В науке и технике основные вопросы разделения состоят в минимизации энергозатрат и

в максимально достижимых КПД. Решение задачи использования тепла в процессе сушки дисперсных материалов в конвективных сушилках с использованием ВТ требует разработки соответствующей экспериментально-аналитической базы и инженерной методики расчета, в связи с чем необходимо исследовать газо-, гидро- и термодинамические характеристики ВТ для разработки на их основе инженерной методики расчета, позволяющей рассчитать конструктивные параметры ВТ.

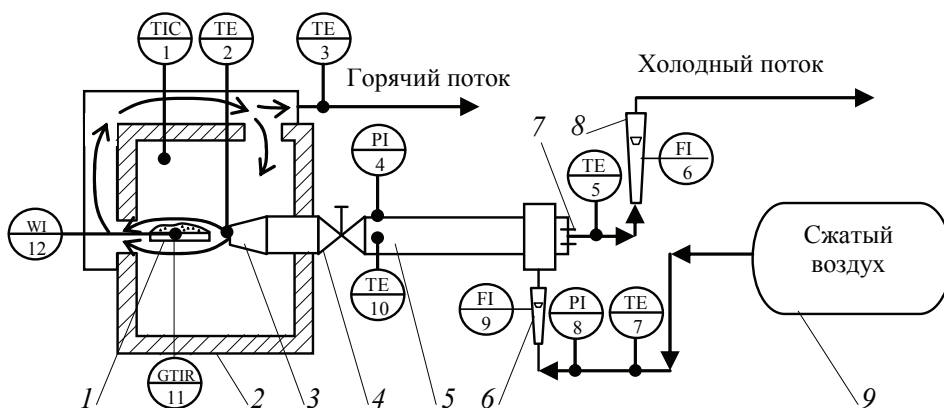
Основой разработки такого газогидродинамического расчета для ВТ также является прямой эксперимент. Это вызывается специфическими особенностями, отличающими течения в ВТ от течений в большинстве «обычных» устройств, а именно: сильно закрученные потоки с мощными внутренними «активными» струями; большие давления на входе; большие, но дозвуковые скорости на выходе из закручивающих устройств; многократные их изменения (увеличения) при расширении воздуха (сжимаемых сред) не только в завихрителе, но и в других элементах трубы; а для «несжимаемой» воды в огромных начальных давлениях (в опытах Балмера – 200...500 атм).

Схема экспериментальной установки, созданной на кафедре «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» ФГБОУ ВПО «ТГТУ» для исследования ВТ и процессов сушки с ВТ, представлена на рис. 1.

Исследовались виды и варианты ВТ трех типов, семи вариантов:

1) ВТ Меркулова со слабо конической внутренней поверхностью: внутренний диаметр 15,9...24,3 мм, длина трубы 164 мм, три тангенциальных сопла с площадью поперечного сечения 15,75 мм<sup>2</sup>, диаметры диафрагм 6, 8, 13,1 мм;

2) ВТ Nex Flow 40 (Н, С): внутренний диаметр 11 мм, длина трубы 110 мм, шесть тангенциальных подводов с площадью поперечного сечения 19,2 мм<sup>2</sup>, Н – диаметр диафрагмы 9,1 мм, С – диаметр диафрагмы 6,3 мм;



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для исследования ВТ и процессов сушки с ВТ: 1 – образец на подложке (измерение скорости трубкой Пито WI12, измерение и регистрация веса и температуры GTIR 11); 2 – сушильная камера (регулирование температуры в термостатируемой камере TIC1, измерение температуры на выходе из камеры ТЕ3); 3 – обдув высушиваемого образца (измерение температуры на выходе из сопла ТЕ2); 4 – дроссельная задвижка; 5 – ВТ (измерение давления PI8 и температуры ТЕ7 на входе в ВТ, измерение температуры выходящего холодного потока ТЕ5, измерение давления PI4 и температуры ТЕ10 перед дроссельной задвижкой); 6 – ротаметр на входе воздуха (измерение расхода воздуха FI9); 7 – диафрагма; 8 – ротаметр на выходе холодного воздуха (измерение расхода холодного воздуха FI6); 9 – компрессор с ресивером

3) ВТ Nex Flow 4 (Н, С): внутренний диаметр 4,6 мм, длина трубы 70 мм, шесть тангенциальных подводов с площадью поперечного сечения 4,8 мм<sup>2</sup>, Н – диаметр диафрагмы 2,8 мм, С – диаметр диафрагмы 2 мм.

Проводились серии экспериментов с ВТ, в которых измерялись все характеристики труб в штатном и однопоточных режимах (при закрытом дросселе и при заглушенной диафрагме). Диапазон давлений от 0,1 до 0,6 МПа с шагом 0,1 МПа. Расход воздуха на входе и выходах в ВТ пересчитывался в зависимости от температуры воздуха, далее считалась доля «холодного» потока  $\mu$ . После обработки полученных данных рассчитывалась погрешность материального и теплового балансов (суммарного и по потокам)  $\Delta$  и  $\Delta_{\text{пот}}$ , %, соответственно.

В результате получены основные характеристики ВТ: расходы, давления и температуры входного, горячего и холодного потоков, а также дополнительно давление потока перед дросселем (рис. 2–4). Для изучения гидравлических сопротивлений ВТ были проведены дополнительные серии экспериментов, со всеми типами ВТ, в которых измерялись расходы при закрытых дросселе и диафрагме. Также для более качественного анализа возможностей ВТ увеличены диапазоны давления на входе в ВТ. Для всех ВТ давление на входе изменялось от 0,1 до 0,6 МПа с шагом 0,1 МПа.

Для большей точности измеряемых данных, при полностью открытом дросселе ротаметр с «холодной» стороны трубы переключался к «горячему» концу вихревой трубы. Для газо-, гидродинамического расчета ВТ получены расчетные уравнения гидравлических сопротивлений по участкам [3]:

для завихрителей

$$p_{\text{вх}}^2 - p_{\text{вых.закр}}^2 = \frac{G_{\text{вх}}^2 RT_{\text{вх}}}{F_{\text{соп.}\Sigma}^2} \left( \zeta_{\text{закр}} + 2 \ln \frac{p_{\text{вх}}}{p_{\text{закр.вых}}} \right); \quad (1)$$

для горячего периферийного потока

$$p_{\text{гор.вх}}^2 - p_{\text{гор.вых}}^2 = \frac{G_{\text{гор}}^2 RT_{\text{гор}}}{F_{\text{гор.с}}^2} \left( \frac{\lambda_{\text{в.п.гор}} L_{\text{в.п.гор}}}{D_{\text{гор.с}}} + 2 \ln \frac{p_{\text{гор.вх}}}{p_{\text{гор.вых}}} \right); \quad (2)$$

для дросселя

$$p_{\text{д}}^2 - p_{\text{вых}}^2 = \frac{G_{\text{гор}}^2 RT_{\text{гор}}}{F_{\text{акт.д}}^2} \left( \zeta_{\text{д}} + 2 \ln \frac{p_{\text{д}}}{p_{\text{вых}}} \right); \quad (3)$$

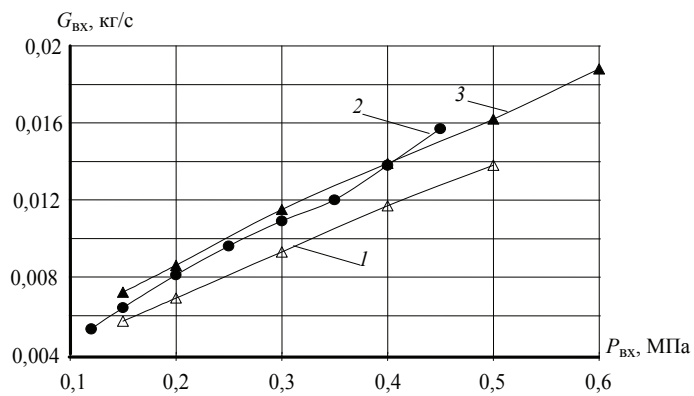
для центрального холодного потока

$$p_{\text{хол.вх}}^2 - p_{\text{диафр}}^2 = \frac{G_{\text{хол}}^2 RT_{\text{хол}}}{F_{\text{хол.с}}^2} \left( \frac{\lambda_{\text{в.п.хол}} L_{\text{в.п.хол}}}{D_{\text{хол.с}}} + 2 \ln \frac{p_{\text{хол.вх}}}{p_{\text{диафр}}} \right); \quad (4)$$

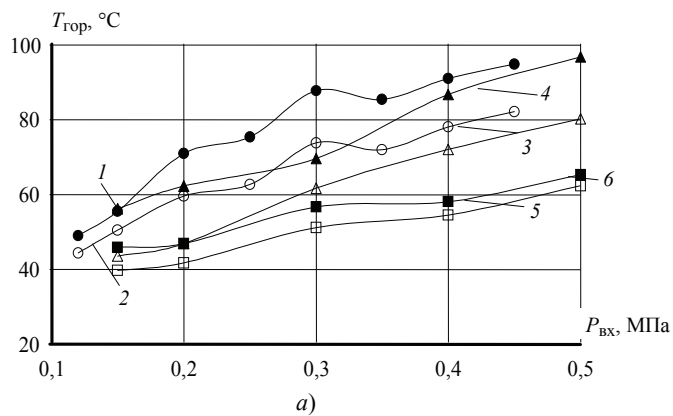
для диафрагмы

$$p_{\text{хол.диафр}}^2 - p_{\text{вых}}^2 = \frac{G_{\text{хол}}^2 RT_{\text{хол}}}{F_{\text{акт.диафр}}^2} \left( \zeta_{\text{диафр}} + 2 \ln \frac{p_{\text{хол.диафр}}}{p_{\text{вых}}} \right). \quad (5)$$

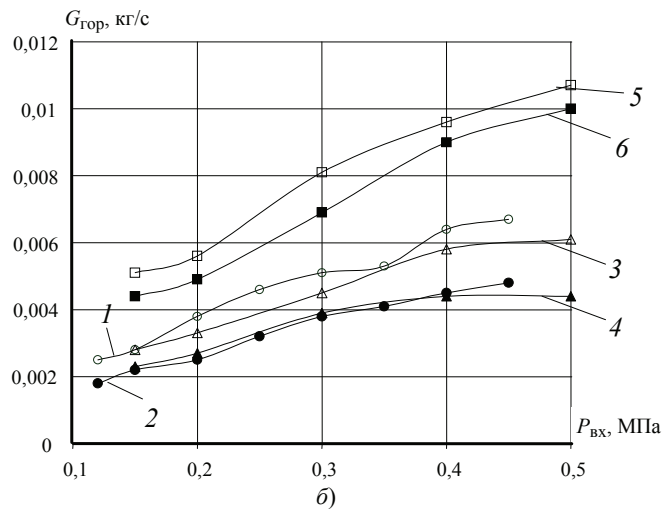
Для нахождения коэффициентов аппроксимации при обработке экспериментальных данных используется схема перебора вариантов из возможного диапазона изменения неизвестных и коэффициентов их аппроксимаций для каждого из проделанных опытов.



**Рис. 2. Зависимость расхода воздуха на входе в ВТ от давления:**  
 1 – ВТ Мерку-лова; 2 – ВТ Nex Flow 40H; 3 – ВТ Nex Flow 40C



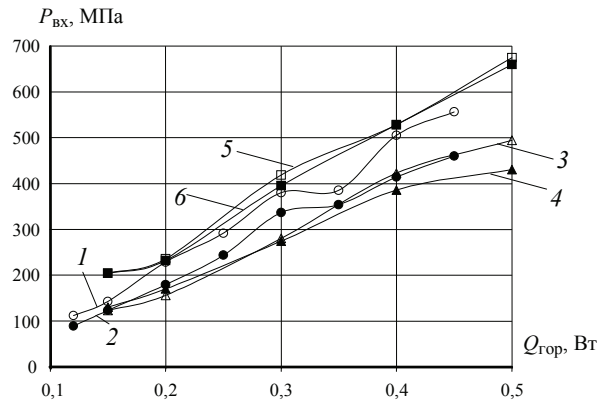
a)



б)

**Рис. 3. Зависимость температуры (а) и расхода (б) горячего теплоносителя от давления:**

1 – ВТ Меркулова,  $\mu = 0,55$ ; 2 – ВТ Меркулова,  $\mu = 0,65$ ; 3 – ВТ Nex Flow 40H,  $\mu = 0,5$ ;  
 4 – ВТ Nex Flow 40H,  $\mu = 0,6$ ; 5 – ВТ Nex Flow 40C,  $\mu = 0,3$ ; 6 – ВТ Nex Flow 40C,  $\mu = 0,4$



**Рис. 4. Теплосодержание горячего воздуха от давления:** 1 – ВТ Меркулова,  $\mu = 0,55$ ; 2 – ВТ Меркулова,  $\mu = 0,65$ ; 3 – ВТ Nex Flow 40Н,  $\mu = 0,5$ ; 4 – ВТ Nex Flow 40Н,  $\mu = 0,6$ ; 5 – ВТ Nex Flow 40С,  $\mu = 0,3$ ; 6 – ВТ Nex Flow 40С,  $\mu = 0,4$

Расчетные уравнения для однопоточных схем ВТ составляются из сумм вышеприведенных соотношений для их элементов:

для трубы с заглушенной диафрагмой

$$p_{\text{вх}}^2 - p_{\text{вых}}^2 = -\frac{G_{\text{вх}}^2 RT_{\text{вх}}}{F_{\text{соп.}\Sigma}^2} \left( \zeta_{\text{закр}} + 2 \ln \frac{p_{\text{вх}}}{p_{\text{закр.вых}}} \right) + \frac{G_{\text{гор}}^2 RT_{\text{гор}}}{F_{\text{гор.с}}^2} \left( \frac{\lambda_{\text{в.п.гор}} L_{\text{в.п.гор}}}{D_{\text{гор.с}}} + 2 \ln \frac{p_{\text{закр.вых}}}{p_{\text{д}}} \right) + \frac{G_{\text{гор}}^2 RT_{\text{гор}}}{F_{\text{акт.д}}^2} \left( \zeta_{\text{д}} + 2 \ln \frac{p_{\text{д}}}{p_{\text{вых}}} \right), \quad (6)$$

где  $\zeta_{\text{закр}} = a_{\text{соп.закр}} + b_{\text{соп.закр}} \text{Re}^{n_{\text{соп}}}$ ,  $F_{\text{гор.с}} = h_{\text{соп}} b_{\text{соп}} z_{\text{соп}} z_z$ ,  $\zeta_{\text{д}} = a_{\text{д}} + k_{\text{д}} \Phi_{\text{д}}$ ,

$F_{\text{акт.д}} = z_{\text{ост.д}} F_{\text{о.д}}$ ;

для трубы с закрытым дросселем

$$p_{\text{вх}}^2 - p_{\text{вых}}^2 = -\frac{G_{\text{вх}}^2 RT_{\text{вх}}}{F_{\text{соп.}\Sigma}^2} \left( \zeta_{\text{закр}} + 2 \ln \frac{p_{\text{вх}}}{p_{\text{закр.вых}}} \right) + \frac{G_{\text{гор}}^2 RT_{\text{гор}}}{F_{\text{гор.с}}^2} \left( \frac{\lambda_{\text{в.п.гор}} L_{\text{в.п.гор}}}{D_{\text{гор.с}}} + 2 \ln \frac{p_{\text{закр.вых}}}{p_{\text{д}}} \right) + \frac{G_{\text{хол}}^2 RT_{\text{хол}}}{F_{\text{хол.с}}^2} \left( \frac{\lambda_{\text{в.п.хол}} L_{\text{в.п.хол}}}{D_{\text{хол.с}}} + 2 \ln \frac{p_{\text{д}}}{p_{\text{хол.диафр}}} \right) + \frac{G_{\text{гор}}^2 RT_{\text{гор}}}{F_{\text{акт.диафр}}^2} \left( \zeta_{\text{диафр}} + 2 \ln \frac{p_{\text{хол.диафр}}}{p_{\text{вых}}} \right), \quad (7)$$

где  $F_{\text{хол.с}} = (F_{\text{тр}} - F_{\text{гор.с}}) z_{\text{акт}}$ ,  $\zeta_{\text{диафр}} = k_{\text{диафр}} \left( 1 - \frac{F_{\text{диафр}}}{F_{\text{тр}}} \right)^{n_{\text{диафр}}}$ ,

$F_{\text{акт.диафр}} = z_{\text{ост.диафр}} F_{\text{диафр}}$ .

В уравнении (6) – семь неизвестных:  $a_{\text{соп.закр}}$ ,  $b_{\text{соп.закр}}$ ,  $n_{\text{соп}}$ ,  $z_z$ ,  $a_{\text{д}}$ ,  $k_{\text{д}}$ ,  $z_{\text{ост.д}}$ ; в уравнении (7) – 11 неизвестных, но из них только четыре не входят в уравнение (6):  $k_{\text{диафр}}$ ,  $n_{\text{диафр}}$ ,  $z_{\text{акт}}$ ,  $z_{\text{ост.диафр}}$ . Например, для серии с трубой Меркулова с диафрагмой 8 мм получены следующие значения коэффициентов сопротивлений при заглушенной диафрагме:  $a_{\text{соп.закр}} = 0,45$ ;  $b_{\text{соп.закр}} = 0,1$ ;  $n_{\text{соп}} = 0,2$ ;  $\zeta_{\text{закр}} = 1,36$ ;  $z_z = 2,5$ ;  $\lambda_{\text{гор}} = 0,025$ ;  $a_{\text{д}} = 0,55$ ;  $k_{\text{д}} = 0,6$ ;  $z_{\text{ост.д}} = 0,5$ ;  $\zeta_{\text{д}} = 1,2$ ;  $\Delta_{\text{пот}} = 9,3\%$ .

Для этой же серии при закрытом дросселе недостающие четыре коэффициента:  $\lambda_{\text{хол}} = 0,0125$ ;  $k_{\text{диафр}} = 1$ ;  $n_{\text{диафр}} = 0,5$ ;  $\zeta_{\text{диафр}} = 0,81$ ;  $z_{\text{акт}} = 0,2$ ;  $z_{\text{ост.диафр}} = 0,65$ ;  $\Delta_{\text{пот}} = -2,9\%$ .

### *Список литературы*

1. Коновалов, В.И. Сушка и другие технологические процессы с вихревой трубой Ранка–Хилша: возможности и экспериментальная техника / В.И. Коновалов, А.Ю. Орлов, Н.Ц. Гагапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 803–825.

2. О возможностях высокотемпературной сушки красителей и послеспиртовой барды с вихревой трубой / А.Ю. Орлов [и др.] // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов). СЭТТ–2011 : тр. Четвертой междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 20–23 сент. 2011 г. / МГАУ им. В.П. Горячкина. – М., 2011. – Т. 1. – С. 381–383.

3. Коновалов, В.И. Разработка расчета вихревых труб Ранка–Хилша / В.И. Коновалов, А.Ю. Орлов, Т. Кудра // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 74–107.

---

## **The Influence of Design Features of the Vortex Tube on the Parameters of Thermal Separation**

**A.Yu. Orlov, N.V. Orlova, M.V. Savushkin**

*Department “Technological Processes, Apparatus and Technosphere Safety”, TSTU;  
orlov.andrey1983 @ gmail.ru*

**Key words and phrases:** hydraulic resistance; vortex effect; vortex tube.

**Abstract:** The paper presents the study of the influence of structural and technological features of vortex tubes of various types and design options on their performance characteristics and thermal parameters of the process of thermal separation.

---

## **Einfluss der konstruktiven Besonderheiten der Wirbelrohre auf die Parameter des Prozesses der Thermoseparation**

**Zusammenfassung:** Es ist die Forschung des Einflusses der konstruktiv-technologischen Besonderheiten der Wirbelrohre der verschiedenen Typen und der konstruktiven Variante auf ihre Regimecharakteristiken und die Parameter des Prozesses der Thermoseparation dargelegt.

---

## **Influence des particularités constructives des tubes turbulents sur les paramètres du processus de la thermoséparation**

**Résumé:** Est présentée l'étude de l'influence des particularités constructives et technologiques des tubes turbulents de différents types et variants constructifs sur leurs caractéristiques de régime et paramètres du processus de la thermoséparation.

---

**Авторы:** *Орлов Андрей Юрьевич* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Орлова Наталия Вячеславовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Савушкин Максим Владимирович* – студент, ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Дмитриев Вячеслав Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и военная подготовка», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».