

# Применение вихревой технологии очистки сбросных газов производства винилхлорида

**В.А. Девисилов**, канд. техн. наук, доцент

**Д.А. Жидков**, аспирант

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

e-mail: devisilov@bmstu.ru, grena\_der@mail.ru

## Ключевые слова:

винилхлорид,  
сбросной газ,  
экология,  
вихревой эффект,  
вихревая труба,  
неадиабатная вихревая труба,  
технологическая схема,  
конденсация,  
температура,  
давление,  
холодопроизводительность,  
температурная эффективность,  
стендовые испытания.

*Представлена расчетная оценка применения вихревых труб Ранка–Хилша для низкотемпературной очистки сбросных газов производства винилхлорида. Показано, что реализация рекуперативной схемы с вихревыми трубами позволит улучшить экологические и экономические показатели основной химической технологии. Стендовые испытания вихревых генераторов холода в составе промышленного агрегата дали возможность получить их термодинамические характеристики на реальном сбросном газе и техническом азоте. Установлено, что при отсутствии рекуперативного теплообменника конденсация паров винилхлорида протекает в самой ВТ. Рекомендовано в случае необходимости применять трехпоточную вихревую трубу. При исследовании неадиабатной ВТ, охлаждаемой хладагентом, установлено расхождение эксперимента с теорией микрохолодильных циклов. Предлагается объяснить возникшее противоречие с позиций ударно-волнового механизма эффекта Ранка–Хилша, развиваемого авторами.*

## 1. Введение

Винилхлорид ( $C_2H_3Cl$ ) производится в промышленности путем хлорирования ацетилена или этилена [1]. Это сырье для получения общеизвестного пластика поливинилхлорида (ПВХ), из которого производятся технические и бытовые изделия. На рис. 1 представлена упрощенная технологическая схема производства винилхлорида (ВХ) со стендовой привязкой вихревой трубы (подробнее о стенде ниже). Реакция синтеза ВХ экзотермическая, поэтому после основного реактора следует стадия утилизации выделенной теплоты. Сконденсированный при охлаждении реакционной смеси целевой продукт отделяется в сепараторе-накопителе и идет на дальнейшую переработку. Окончательная конденсация паров ВХ осуществляется с помощью хладагента, который представляет собой водный раствор хлорида кальция (25%  $CaCl_2$ ). Газовая смесь (сбросной газ) после низкотемпературной стадии направляется на сжигание.

Несмотря на охлаждение при  $-10 \div -20^\circ C$ , в сбросном газе в варианте хлорирования ацетилена оста-

ется значительное количество паров ВХ (до 10% объемных). Последний при горении выделяет раздражающие, токсичные и коррозионно-активные вещества, среди которых, в частности, обнаруживается и высокотоксичный фосген. Поэтому решение задачи уменьшения концентрации винилхлорида в сбросном газе промышленного производства позволит уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду и, кроме того, поможет снизить потери ВХ как целевого продукта.

Априори понятно, что понизить концентрацию ВХ в сбросном газе можно, если охладить его до более низкой температуры, чем это делается с помощью водного раствора  $CaCl_2$ . Для этого, например, можно использовать дополнительную холодильную установку с соответствующим испарителем. Возможен также вариант охлаждения сбросного газа с помощью турбодетандера, который реализует перепад давления, теряемый при дросселировании. Но это, учитывая относительно небольшое количество сбросного газа (до 400  $nm^3/час$ ), довольно сложные и дорогостоящие технологии.

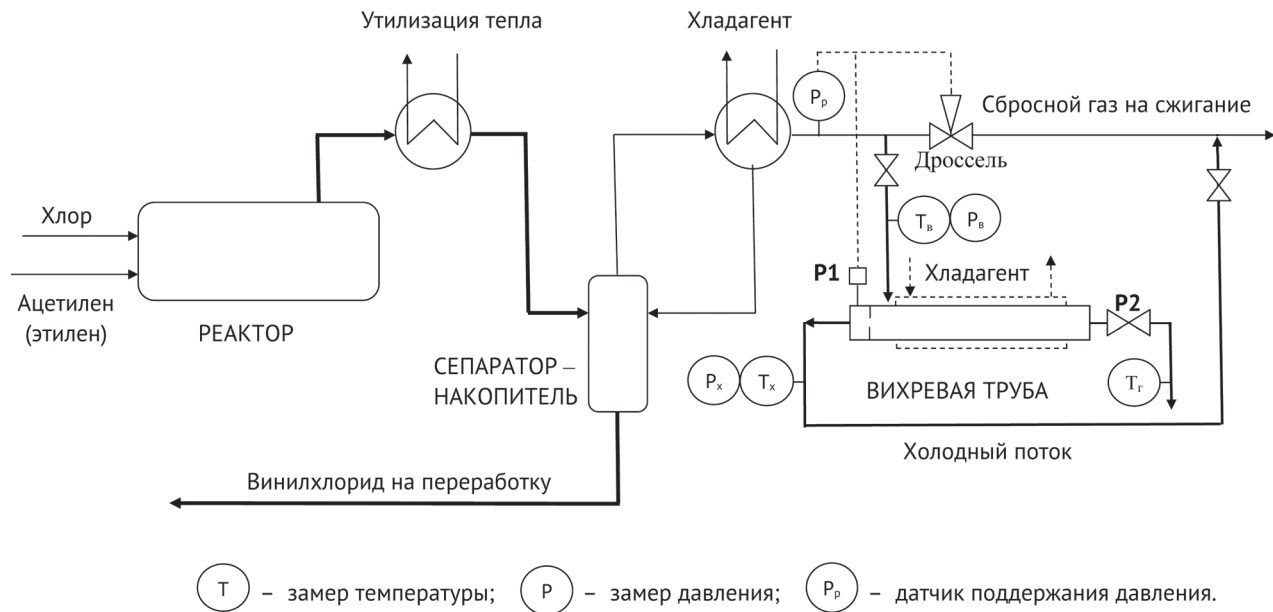


Рис. 1. Принципиальная схема привязки вихревой трубы к действующему производству винилхлорида.  
P1 – регулятор расхода; P2 – регулятор соотношения потоков

## 2. Постановка задачи

Мы предлагаем рассмотреть и реализовать в промышленности более простой и энергетически беззатратный способ охлаждения сбросного газа производства ВХ на основе вихревой трубы (ВТ) Ранка—Хилша [2], которая реализует располагаемый перепад давления, теряемый при дросселировании. ВТ по холодопроизводительности занимает промежуточное положение между дросселем и детандером, но при этом конструктивно проста и, следовательно, не менее надежна в эксплуатации, чем обычный дроссель.

В конце 1950-х годов малорасходные воздушные ВТ начали опытно использоваться для термостатирования (преимущественно охлаждения) различных объектов. А в 1960-1970-е годы их стали выпускать сериями для нужд машиностроительной, электронной, пищевой и других отраслей промышленности [3]. Что же касается высокопроизводительной химической технологии, где рабочим телом является смесь газов (как правило, токсичных и пожаровзрывоопасных), то в этот период проводились в основном поисковые исследования [4, 5]. Лишь в конце 1990-х годов появились первые промышленные вихревые установки (ВУ) в химической промышленности, например, для выделения метанола из продувочных газов синтеза [6]. Такая задержка во времени была связана с отсутствием простого и надежного устройства для регулирования производительности ВТ. Оно разработано только в начале 1990-х годов [7] и впервые применено в химической промышленности при производстве метанола.

В основу вихревой технологии конденсации примесей из сбросных газов химических производств положена простейшая технологическая схема с рекуперативным теплообменником (рис. 2). Она работает следующим образом. Сбросной газ под избыточным давлением поступает в высоконапорное пространство теплообменника T1, где его температура снижается за счет охлаждения холодным потоком газа, поступающим из ВТ. При этом происходит конденсация высококипящих компонентов с образованием жидкой фазы, которая отделяется в сепараторе С1. Далее газ направляется в ВТ, где происходит его расширение с одновременной закруткой и разделением на два потока — холодный и горячий. Холодный поток направляется в низконапорное пространство теплообменника, где отдает свой холод высоконапорному газу. Горячий поток смешивается с подогретым холодным потоком, и объединенный поток поступает в коллектор сбросного газа.

Автоматическая система управления технологическим процессом (АСУ ТП) позволяет вести процесс полностью в автоматическом режиме. Она обеспечивает необходимое давление за счет изменяемой геометрии соплового ввода ВТ (регулятор P1), поддерживает заданную долю холодного потока с помощью регулятора P2, автоматически удаляет жидкость из сепаратора в накопительную емкость (на схеме не показана) посредством регулятора P3 системы поддержания уровня.

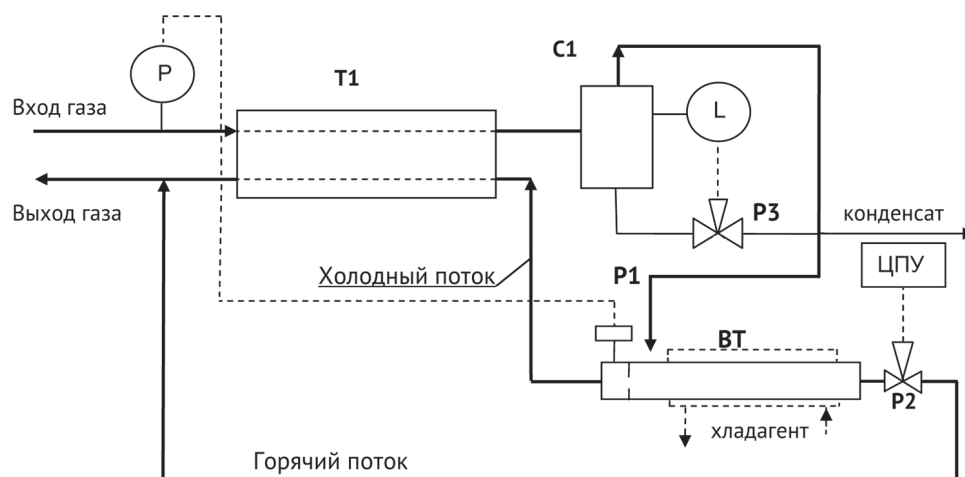


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема вихревой установки для выделения конденсирующихся компонентов из сбросных газов: ВТ – вихревая труба (пунктир – неадиабатный вариант); Т1 – теплообменник; С1 – сепаратор; P1 – регулятор производительности ВТ; P2 – регулятор соотношения потоков; P3 – дроссель регулирования уровня жидкости.

### 3. Расчет конденсации паров винилхлорида в рекуперативной схеме с вихревой трубой

В основу расчета процесса по схеме на рис. 2 положены следующие исходные данные:

Количество газа, $\text{м}^3/\text{ч}$	400
Давление, $\text{кПа}^1$ :	
на входе в ВУ	700
холодного потока	50
Температура на входе в ВУ, $^{\circ}\text{C}$	(-20,0)
Доля холодного потока $\mu$ , б/р	0,7
Недорекуперация, $^{\circ}\text{C}$	15,0
Состав исходной газовой смеси, % об.:	
водород	20,0
азот	36,0
кислород	0,5
диоксид углерода	15,0
оксид углерода	6,0
метан	1,5
ацетилен	11,0
винилхлорид	0,0

Расчеты рекуперативной схемы вели методом последовательного приближения так, чтобы тепловая нагрузка теплообменника соответствовала холодопроизводительности ВТ с учетом затрат теплоты на конденсацию паров винилхлорида и недорекуперацию холода. Ниже приведен результат расчета в соответствии с исходными данными:

Температура, $^{\circ}\text{C}$ :	
на входе в ВТ (после теплообменника)	(-47,1)
на холодном потоке	(-69,5)
понижение температуры на холодном потоке	$\Delta T_x = 22,4$
удельная холодопроизводительность	$q = 15,7$
Количество сконденсированного винилхлорида, $\text{кг}/\text{ч}$	64,0

<sup>1</sup> Здесь и в дальнейшем дается избыточное давление.

Как трактовать полученные цифры? С экологической точки зрения сокращение количества сжигаемого винилхлорида более чем на 1,5 т в сутки — результат вполне ощутимый. В процессе оценки экономического аспекта предлагаемого мероприятия оказалось, что при имеющихся ценах на ВХ создание вихревой установки при расходе сбросного газа  $200 \text{ м}^3/\text{ч}$  окупится менее чем за пять месяцев. В расчете не учитывалось уменьшение платежей из-за снижения выброса вредных примесей в результате сокращения количества сжигаемого ВХ.

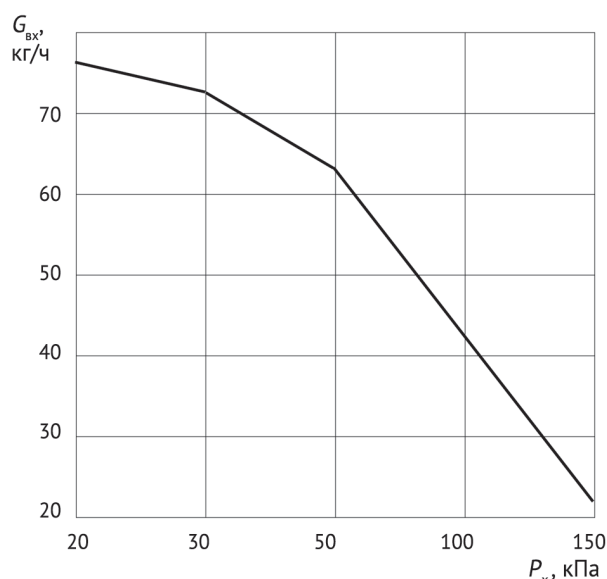


Рис. 3. Расчетная зависимость количества сконденсированного винилхлорида ( $G_{\text{вх}}$ ) от давления на холодном потоке  $P_x$

Одним из ключевых параметров, определяющих вихревой эффект, является отношение абсолютных давлений  $\pi$ . При постоянном давлении газа на входе в ВТ ( $P_B$ ) параметр  $\pi$  тем выше, чем меньше давление на холодном потоке  $P_x$ . При расчетной проработке процесса конденсации паров ВХ с применением ВТ была построена зависимость количества сжиженного продукта от давления газа на холодном потоке. Она представлена на рис. 3, из которого видно, что при  $P_x = 50$  кПа в теплообменнике конденсируются упомянутые выше 64 кг/ч паров винилхлорида, а при  $P_x = 150$  кПа этот показатель снижается до  $G_{ВХ} = 22$  кг/ч. Это существенное уменьшение.

Значительную роль в рассматриваемой схеме играет величина недорекуперации температуры на теплом конце теплообменника. Так, при снижении ее до  $10^\circ\text{C}$  можно получить 83 кг/ч целевого продукта. При этом остаточное содержание ВХ в газовой фазе составит 2,26% об. При недорекуперации  $7^\circ\text{C}$  (что вполне достижимо при использовании пластинчатого теплообменника) количество конденсата возрастет до 91 кг/ч.

#### 4. Стендовые испытания вихревой трубы

В технической литературе отсутствуют термодинамические показатели работы ВТ на сбросных газах производства винилхлорида. Поэтому для сопоставления расчетных показателей работы ВТ с непосредственным экспериментом был создан специальный стенд для натурных испытаний. Схема привязки ВТ к действующему производству ВХ с необходимыми контрольно-измерительными приборами представлена на рис. 1. При этом был применен регулируемый вихревой аппарат с пневмоприводом, по аналогии с ВТ на продувочных газах производства метанола (автоматическое поддержание заданного давления до ВТ).

Основные геометрические характеристики стендовой ВТ, мм:

- внутренний диаметр вихревой камеры — 32,0;
- диаметр диафрагмы холодного потока — 15,0;
- длина вихревой камеры — 1260 мм (39 калибров);
- диапазон регулируемой производительности: от 100 до 400  $\text{нм}^3/\text{ч}$ ;
- рабочее давление — 1000 кПа;
- основной материал деталей: ст. 12Х18Н10Т, ст. 95Х18.

До испытания ВТ на сбросных газах производства ВХ была проведена серия экспериментов на техническом азоте при входном давлении  $P_B = 500\text{--}600$  кПа. Соответствующие результаты представлены в табл. 1 (частично) и на рис. 4 в традиционных для ВТ координатах ( $\Delta T_x$  и  $\Delta T_2$  в функции от  $\mu$  при фиксированном значении параметра  $\pi$ ). Как видно из графика, при  $\mu = 0,7$  величина  $\Delta T_x \approx 20^\circ\text{C}$  ( $q = 14,0^\circ\text{C}$ ). Это несколько ниже, чем принято в расчетах ( $\Delta T_x = 22,4^\circ\text{C}$  при

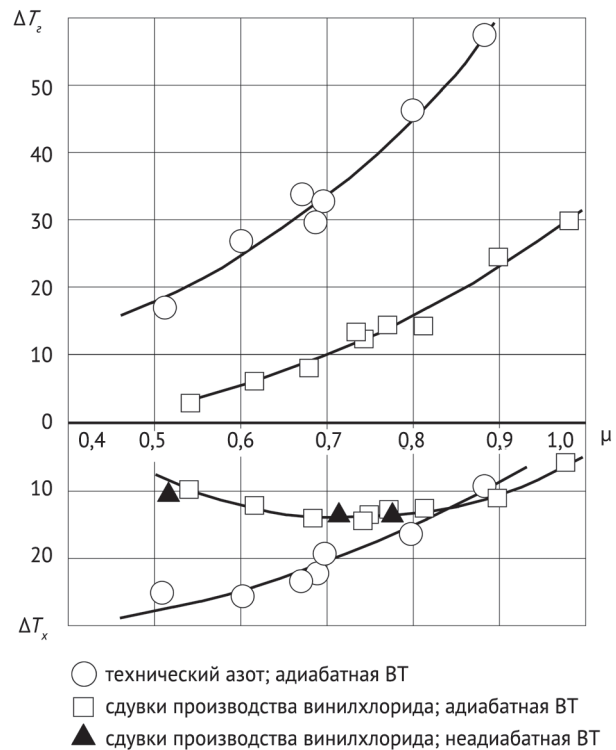


Рис. 4. Зависимость температурной эффективности ВТ по холодному ( $\Delta T_x$ ) и горячему ( $\Delta T_2$ ) потокам от доли холодного потока  $\mu$ .

$\pi = 5,3$ ;  $q = 15,7^\circ\text{C}$ ). Основная причина некоторого ухудшения вихревого эффекта на техническом азоте от эффекта на продувочном газе производства метанола [6] (именно по нему выполнялась аппроксимация при оценке  $\Delta T_x$  для ВХ) объясняется, по-видимому, большим эффектом дросселирования (примерно на  $4^\circ\text{C}$ ) на продувочных газах производства метанола.

При рассмотрении полученных результатов нас несколько озадачили данные по температурной эффективности адиабатной ВТ на сбросных газах (см. рис. 4). Они оказались несколько ниже в рабочем диапазоне  $\mu = 0,6\text{--}0,8$ , чем при работе на техническом азоте. Проведенный анализ показал, что такое снижение эффективности связано с конденсацией паров ВХ непосредственно в ВТ, когда выделяющаяся при конденсации теплота снижает температурную эффективность процесса температурной стратификации (разделения). Этот факт не является чем-то новым в вихревой технологии, так как подобное наблюдается и при работе ВТ на влажном воздухе [1]. Отсюда следует вывод, что процесс конденсации паров ВХ должен максимально протекать в рекуперативном теплообменнике, чтобы получить необходимую холодопроизводительность ВТ (на сухом газе). Или целесообразно

Показатели работы ВТ при стендовых испытаниях Таблица 1

$P_e$ , кПа	$\pi$	Температура, °С			$V_g$ , нм <sup>3</sup> /ч	$\mu$	$\Delta T_x$ , °С	$q$ , °С
		$T_e$	$T_x$	$T_z$				
Технический азот, адиабатная вихревая труба								
580	6,2	11,2	-12,9	39,5	265	0,60	24,1	14,46
500	6,0	4,1	-17,1	35,9	310	0,68	21,2	14,42
610	6,5	11,4	-10,6	45,1	265	0,67	22,0	14,40
Сбросной газ, адиабатная вихревая труба								
630	6,3	5,6	-8,0	20,0	205	0,76	13,6	10,34
760	6,1	11,5	-0,8	23,3	170	0,74	12,3	9,10
740	6,0	11,4	-1,2	19,3	165	0,68	12,6	8,57
Сбросной газ, неадиабатная вихревая труба								
730	5,6	5,1	-7,4	-8,8	219	0,77	12,5	9,63
730	5,5	1,6	-11,0	-8,7	219	0,71	12,6	8,95
730	6,4	-0,4	-10,8	-10,7	196	0,51	10,4	5,31

применять трехпоточную модификацию ВТ, когда сконденсированные в ВТ компоненты отделяются в самом аппарате [8].

Последняя триада экспериментальных точек представлена в табл. 1 (они также нанесены на рис. 4) и получена на неадиабатной ВТ при работе на сбросном газе, когда вихревую камеру охлаждал хладагент, подаваемый во внешнюю рубашку. Здесь следует отметить два момента.

*Первый:* неадиабатная ВТ показала лишь небольшое увеличение холодопроизводительности (работала при меньшем  $\pi$  и при более низкой температуре на входе — снижающие холодопроизводительность факторы) по сравнению с адиабатной ВТ.

*Второй:* на исследуемых режимах температура холодного и горячего потоков практически одинаковая, причем горячий поток также выходит с отрицательной температурой, как и холодный.

Создается впечатление, что весьма низкая температура внешнего вихря (где формируется горячий поток) не оказывает должного влияния на температуру внутреннего (холодного) вихря, хотя в соответствии с существующими теоретическими представлениями так не должно быть. Налицо явное противоречие с широко распространенной теорией турбулентных микрохолодильных циклов А.П. Меркулова [1]. Такое противоречие легко объясняется с позиций ударно-волнового механизма эффекта Ранка—Хилша, которую мы последовательно развиваем. В соответствии с ней основной теплоперенос в ВТ обеспечивается не за счет хаотичной турбулентности, усредняющей все параметры движущегося потока, а за счет упорядоченного волнового процесса [8]. В нашем случае весьма сильное понижение температуры внешнего вихря закрученного потока не принесло ожидаемого результата, так как в части процесса генерации волн

обе модификации ВТ (адиабатная и неадиабатная) практически равнозначны.

## 5. Выводы

1. Расчетная проработка вихревой очистки сбросных газов производства винилхлорида в схеме с рекуперативным теплообменником показала перспективность данного направления. Выявлено, что степень выделения конденсируемых компонентов повышается с увеличением отношения давления на ВТ и при уменьшении потерь холода на недорекуперацию в теплообменнике.
2. Выполнены стендовые испытания адиабатной и неадиабатной вихревых труб при работе на техническом азоте и реальном сбросном газе производства винилхлорида. Получены соответствующие термодинамические характеристики. Установлено, что при отсутствии рекуперативного теплообменника конденсация паров ВХ протекает в самой ВТ. Рекомендовано в случае необходимости применять трехпоточную ВТ.
3. При исследовании неадиабатной ВТ, охлаждаемой хладагентом, установлено расхождение эксперимента с теорией микрохолодильных циклов. Предложено объяснить возникшее противоречие с позиций ударно-волнового механизма эффекта Ранка—Хилша.

## Аббревиатуры

АСУ ТП — автоматическая система управления технологическим процессом

ВТ — вихревая труба

ВУ — вихревая установка

ВХ — винилхлорид

ЦПУ — центральный пульт управления

## Обозначения

Расход газа, нм<sup>3</sup>/ч —  $V$

Температура, °С —  $T$

Эффект охлаждения газа, °С —  $\Delta T_x = T_e - T_x$

Эффект нагрева газа, °С —  $\Delta T_z = T_z - T_e$

Доля холодного потока, б/р —  $\mu = V_x / V_g$

Давление, кПа (изб.) —  $P$

Отношение абсолютных давлений, б/р —  $\pi = P_e / P_x$

Удельная холодопроизводительность, °С —  $q = \Delta T_x \mu$

Уровень конденсата —  $L$

Количество жидкости, кг/ч —  $G$

## Индексы

$v$  — вход в вихревую трубу

$vx$  — винилхлорид

$г$  — горячий поток

$р$  — регулирование

$x$  — холодный поток

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев Н. Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза: — М.: Химия, 1988.
2. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. — М: Машиностроение, 1969.
3. Азаров А.И. Вихревые трубы в промышленности. — СПб.: ЛЕМА, 2010.
4. Бродянский В.М., Лейтес И.Л., Мартынов А.В., Семенов В.П., Эстрин С.М. Использование вихревого эффекта в химической технологии // Химическая промышленность. 1963. № 4. — С. 32–36.
5. Комарова Г.А., Лейтес И.Л., Житкова Т.В., Червякова Л.С., Лифшиц С.М. Способ выделения аммиака из продувочных газов синтеза // Химическая промышленность. 1975. № 4. — С. 37–40.
6. Жидков М.А., Комарова Г.А., Воробьев В.С., Курилов А.В., Селезнёв С.В., Лукьянов Е.Н. Опыт эксплуатации промышленной установки выделения метанола из продувочных газов синтеза с применением вихревой трубы // Химическая промышленность. 2000. № 5. — С. 3–6.
7. Жидков М.А., Комарова Г.А. Вихревой аппарат. Патент РФ № 2035990, 1993.
8. Жидков М.А., Девисилов В.А., Жидков Д.А., Гусев А.П., Рябов А.П. Трехпоточные вихревые трубы — экологическая значимая альтернатива сжиганию попутного нефтяного газа на факелах // Безопасность в техносфере. 2013. № 3. — С. 19–27.

## Application of Vortex Technology for Purification of Vinyl Chloride Production Waste Gases

V.A. Devisilov, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University

D.A. Zhidkov, Graduate Student, Bauman Moscow State Technical University

*The settlement assessment of Ranque–Hilsch vortex pipes application for low-temperature purification of vinyl chloride production waste gases has been presented. It is shown that implementation of the recuperative scheme with vortex pipes will allow to improve ecological and economic indicators of the main chemical technology. Bench tests of vortex generators of cold as a part of the industrial unit gave the chance to receive their thermodynamic characteristics on real waste gas and technical nitrogen. It is established that in lack of the recuperative heat exchanger a condensation of vinyl chloride vapors proceeds in vortex pipe itself. Application of a three-line vortex pipe is recommended in case of need. At research of not adiabatic vortex pipe cooled by a coolant, it has been established an experiment divergence with the theory of micro refrigerating cycles. It is offered to explain the arisen contradiction from a position of shock and wave mechanism of Ranque–Hilsch effect developed by authors.*

**Keywords:** vinyl chloride, waste gas, ecology, vortex effect, vortex pipe, not adiabatic vortex pipe, technological scheme, condensation, temperature, pressure, refrigerating capacity, temperature efficiency, bench tests.

### Подведены итоги работы Совета по науке

В Министерстве образования и науки Российской Федерации 25.12.2013 г. состоялось итоговое заседание Совета по науке Минобрнауки России и Общественного совета при Минобрнауки России.

На заседании были подведены итоги года, в обсуждении которых участвовал Совет по науке:

- принято положение о том, чтобы научные конкурсы, в том числе в рамках ФЦП Минобрнауки России проводить по механизму грантов, а не «лотов»;
- реализовано предложение о нецелесообразности требовать внебюджетного софинансирования в рамках конкурсов на фундаментальные и поисковые исследования;
- конкурсы на гранты будут проводиться по широким приоритетным направлениям науки («зонтичные конкурсы»), чтобы исключить ситуацию предопределенного победителя;
- срок давности по плагиату в диссертациях увеличен до 10 лет;

- закупки научного оборудования в рамках грантов, госконтрактов и хоздоговоров для бюджетных научных и образовательных организаций будут реализовываться в рамках ФЗ 223, а не ФЗ 44;
- принято положение о вневедомственном характере мониторинга и оценки научных организаций;
- принято предложение о введении в научных организациях и ВУЗах бессрочных высокооплачиваемых позиций для наиболее результативных ученых, которые должны подтверждаться аттестацией каждые пять лет («федеральный профессор», «федеральный исследователь»);
- Минобрнауки России поддержано положение о том, что при проведении научной экспертизы необходимо использовать наукометрические подходы при решающей роли экспертной оценки;
- Минобрнауки России сформированы списки экспертов по представлению Совета по науке.

Источник : <http://минобрнауки.рф/новости/3854>