

0-734648

На правах рукописи

ТАТАРИНОВ ЕВГЕНИЙ БОРИСОВИЧ

**АЭРОГИДРОДИНАМИКА И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ
В ВИХРЕВОМ АППАРАТЕ С ОРОСИТЕЛЕМ В ЗАКРУЧИВАЮЩЕМ
УСТРОЙСТВЕ.**

05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань - 2002

Работа выполнена на кафедре «Машины и аппараты химических производств»
Казанского государственного технологического университета.

- Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Поникаров Иван Ильич
- Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Махоткин Алексей Феофилактович
– кандидат технических наук
Реут Валерий Иванович
- Ведущая организация – Всероссийский научно-исследовательский
институт углеводородного сырья
(ВНИИУС), г.Казань

Защита диссертации состоится *27 декабря 2002 г. в 14⁰⁰ часов* на заседании диссертационного совета Д 212.080.06 в Казанском государственном технологическом университете по адресу: 420015, г Казань ул. К. Маркса, 68, зал заседаний Ученого совета (А- 330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Автореферат разослан *26 ноября 2002 г.*

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.080.06
д.т.н., профессор



СИ. Поникаров

Общая характеристика работы.

Актуальность работы.* В настоящее время из всего многообразия аппаратов использующих закрученное течение широкое распространение получили пылеуловители и сепараторы-каплеуловители. В первую очередь это связано с простой конструкции, возможностью изготовления их из различных материалов, относительно низкими энергозатратами, а также вследствие отсутствия движущихся частей.

В ряду аппаратов центробежной очистки газов от взвешенных частиц выделяются вихревые аппараты мокрой очистки (скрубберы). Отличительной особенностью таких аппаратов является взаимодействие жидкости и газа в поле центробежных сил, благодаря чему обеспечивается эффективная сепарация твердых и жидких частиц из газового потока. При этом обеспечивается высокая относительная скорость капель жидкости и газа, что приводит к повышению производительности аппарата.

Использование в таких аппаратах низконапорных объемных факелов орошения, обладающих незначительными энергозатратами при орошении, является предпочтительным при аппаратурном оформлении процессов очистки.

Низконапорные факелы орошения чаще всего располагаются на некотором расстоянии от закручивающего устройства, что приводит к пережигу газового потока и соответственно к увеличению гидравлического сопротивления аппарата. Однако замечено, что при подаче во внутреннюю полость закручивающего устройства небольшого количества жидкости приводит к снижению гидравлического сопротивления аппарата. Поэтому исследование влияния места ввода орошения на аэродинамику и гидравлическое сопротивление аппарата и разработка методики расчета усовершенствованных вихревых аппаратов является важной задачей в снижении металлоемкости аппаратов и энергозатрат на пылеочистку.

Цель работы. Основная цель работы заключается в определении влияния места ввода орошения на аэродинамику и гидравлическое сопротивление вихревого аппарата, разработка методов его расчета. Для достижения этой цели в работе решались следующие задачи:

- 1) обоснование конструкции вихревого аппарата с вертикально-дефлекторным оросителем расположенном в двухзаходном закручивающем устройстве для проведения процесса пылеочистки;
- 2) аэродинамические характеристики двухзаходного закручивающего устройства и зоны осесимметричного закрученного газового потока;
- 3) влияние места ввода орошения на гидравлическое сопротивление и аэродинамику вихревого аппарата;
- 4) дисперсный состав капель при орошении в закручивающем устройстве;
- 5) процесс пылеочистки в вихревом аппарате и получение зависимостей для

*) В руководстве работой принимал участие к.т.н., доцент Алексеев В.А.

его расчета.

Научная новизна. - Экспериментально найдены поля скоростей газового потока двухзаходного тангенциального закручивающего устройства.

- Исследовано влияние места ввода орошения на профили скоростей и гидравлическое сопротивление аппарата.

- Определен дисперсный состав капель в факеле орошения вихревого аппарата с вертикально-дефлекторным оросителем в закручивающем устройстве.

- Разработана методика расчета эффективности пылеулавливания для вихревого аппарата с оросителем в закручивающем устройстве.

Практическая ценность работы заключается в том, что предложена конструкция вихревого орошаемого аппарата позволяющая снизить гидравлическое сопротивление и металлоемкость такого аппарата, при этом, практически не снижая эффективности пылеулавливания.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на отчетных научно-технических конференциях КГТУ (г.Казань, 1998, 2000 г.г.), на Всероссийской научной конференции "Динамика процессов и аппаратов химической технологии" (г.Ярославль, 1994г.), на Девятой международной конференции молодых ученых "Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений" (г.Казань, 1998г.), на V-ой Международной научной конференции "Методы кибернетики химико-технологических процессов" КХТП-V-99 (г.Казань, 1999г.), на Всероссийской научной конференции посвященной 80-летию со дня рождения проф. А.Г.Усманова "Тепло- и массообмен в химической технологии" (г. Казань, 2000г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ.

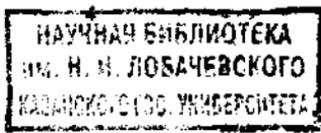
Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы, включающего 119 наименований и приложения. Основная часть работы изложена на 108 страницах. Работа содержит 33 рисунка и 10 таблиц приложения.

Краткое содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы и сформулированы цели и задачи работы.

В первой главе проведен обзор известных отечественных и зарубежных конструкций аппаратов центробежного разделения аэрозолей, приводятся технические характеристики этих аппаратов (гидравлическое сопротивление, среднерасходная скорость газового потока, степень очистки и др.). Описано влияние жидкой фазы на аэродинамику и гидравлическое сопротивление вихревого орошаемого аппарата. Проведено обоснование конструкции вихревого аппарата с вертикально-дефлекторным оросителем в закручивающем устройстве.

Проведенный обзор конструкций аппаратов показал, что: 1) центробежные пылеуловители, даже сухой очистки, обладают высокой степенью очистки и умеренным гидравлическим сопротивлением; 2) в аппаратах с тангенциальными закручивающими устройствами основная очистка от пыли происходит при полови-



не оборота газового потока; 3) наличие жидкой фазы в циклонных аппаратах позволяет увеличить среднюю скорость по аппарату и степень очистки; 4) для очистки от пыли, содержащей 30-40 % по весу фракций с размерами частиц меньше 10 мкм желательнее использовать аппараты с развитой поверхностью контакта фаз; 5) форма факела и место ввода орошения существенно влияют на аэродинамику закрученного потока; 6) наличие орошения в закручивающем устройстве аппарата приводит к снижению гидравлического сопротивления.

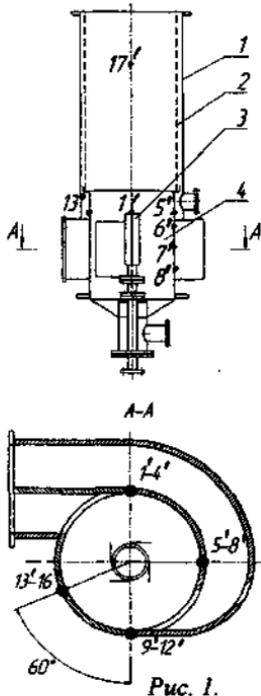


Рис. 1.

На основании литературного обзора разработана конструкция вихревого скруббера с вертикально-дефлекторным оросителем в закручивающем устройстве (рис. 1).

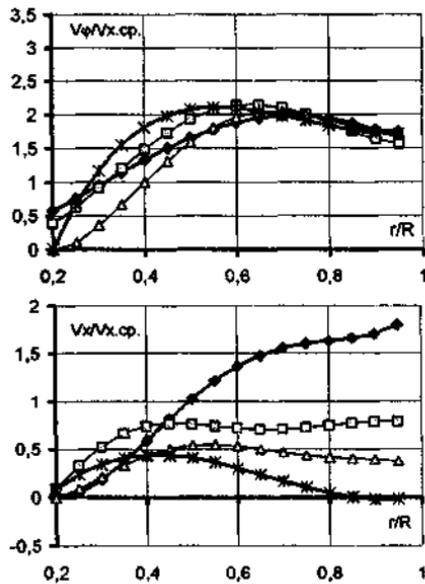
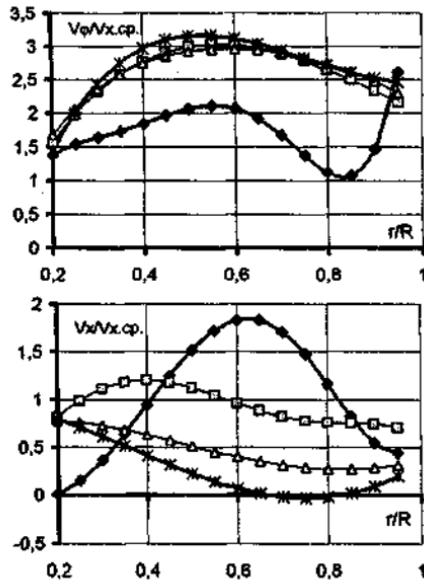
Аппарат состоит из цилиндрического корпуса 1, сепаратора 2, закручивающего устройства 4 и центрального оросителя 3. Аппарат работает по принципу перекрестного взаимодействия фаз в закрученном потоке. Жидкость с помощью оросителя 3 распыляется в закрученный газовый поток, формирующийся во входном закручивающем устройстве 4. Твердые частицы частично захватываются каплями жидкости, а частично оседают под действием центробежных сил вместе с каплями жидкости на стенки закручивающего устройства или сепаратора 2, проходят через отверстия в сепараторе и выводятся в виде суспензии из аппарата.

Во второй главе описана экспериментальная установка и изложена методика проведения эксперимента по исследованию аэродинамики и гидравлического сопротивления аппарата, а также представлены графики и зависимости, описывающие результаты экспериментов.

Места исследования локальных характеристик закрученного газового потока (точки Г, 2', 3', ..., 17') представлены на рис. 1.

Исследования полей скоростей и давлений потока проводились как в сухом, так и в орошаемом аппарате. Измерения локальных характеристик закрученного газового потока осуществлялись с помощью трехканального зонда. Размеры зонда (диаметр проточной части равен 5мм, диаметры приемных отверстий 0,6мм) были намного меньше свободного сечения аппарата (внутренний диаметр аппарата $D_{\text{вн}} = 150\text{мм}$) и не вносили существенных возмущений в поток. Измерения полного и статического давлений осуществлялись с помощью мановакуумметров ММП-4 с наименьшей ценой деления 2 Па. Углы закрутки потока определялись с точностью до $0,5^\circ$. Измерения локальных характеристик закрученного газового потока проводились через 5 мм по радиусу.

Средняя скорость газа по сечению аппарата $V_{\text{ср}}$ измерялась в диапазоне от



●—Точка 1' —□—Точка 2'
 ▲—Точка 3' —*—Точка 4'

●—Точка 5' —□—Точка 6'
 ▲—Точка 7' —*—Точка 8'

Рис. 2.

7м/с до 20м/с. Скорость истечения жидкости из отверстий $w_{ж}$ от 1 до 5 м/с, L/G (кг/кг) от 0 до 1,5.

Основные конструктивные размеры оросителя: угол встречи струи жидкости с дефлектором $40-45^\circ$, расстояние от кромки дефлектора до места удара струи 2-4мм, вылет дефлектора не превышал $1/3$ радиуса аппарата, количество дефлекторов $t=4$, расстояние между отверстиями определялось по формуле:

$$a_n = 1,003 \cdot 10^{-3} (29,461 - 20,003 \cdot 10^{-3} \cdot d_0 + 5,93 \cdot 10^6 \cdot d_0^2) \times (-0,476 + w_{ж} - 0,13w_{ж}^2) \quad (1)$$

Относительный периметр орошения

$$P_{op} = n \cdot a_n / D_{\text{Ап}} = 2,34 \quad (2).$$

Для придания закрутки газовому потоку использовалось двухзаходное тангенциальное закручивающее устройство с $M_{\text{вх}}=1,47, F_{\text{вх}}/F_{\text{Ап}}=0,676, a/b=1,44$, обеспечивающее среднюю степень закрутки.

В ходе экспериментов обнаружилась автомодельность профилей скоростей от расхода газа. Поэтому при дальнейшей обработке данных были использованы безразмерные параметры

$$\bar{V} = V/V_{x,cp} \quad (3),$$

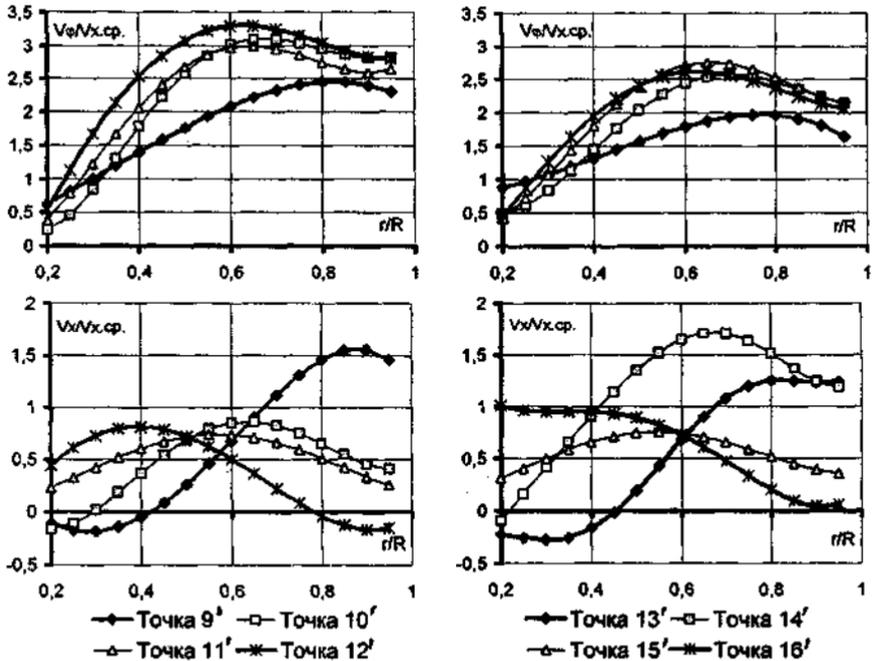


Рис. 3.

$$\bar{r} = r/R \quad (4)$$

$$\bar{M} = 2 \int_{\bar{r}_1}^{\bar{r}_2} \bar{V}_x \cdot \bar{V}_\phi \cdot \bar{r} \cdot d\bar{r} \quad (5)$$

Профили тангенциальных и осевых скоростей в закручивающем устройстве представлены на рис.2-3.

Величина осевой скорости в закручивающем устройстве постепенно возрастает по высоте завихрителя, что связано с увеличением расхода газа, протекающего в поперечном сечении закручивающего устройства.

Ассиметрию скоростей относительно оси можно объяснить влиянием поворота в длинном тангенциальном патрубке (под действием центробежных сил максимум скорости в длинном тангенциальном патрубке смещается к наружной стенке), а также меньшим расходом газа в длинном патрубке из-за потерь по длине и наличия поворота на 180°

Результаты экспериментов обрабатывались в Excel. Профили скоростей описывались с помощью полиномов:

$$\bar{V}_\phi = A_6 \cdot \bar{r}^{-6} + A_5 \cdot \bar{r}^{-5} + A_4 \cdot \bar{r}^{-4} + A_3 \cdot \bar{r}^{-3} + A_2 \cdot \bar{r}^{-2} + A_1 \cdot \bar{r} + A_0; \quad (6)$$

$$\bar{V}_x = A_6 \cdot r^{-6} + A_5 \cdot r^{-5} + A_4 \cdot r^{-4} + A_3 \cdot r^{-3} + A_2 \cdot r^{-2} + A_1 \cdot r^{-1} + A_0. \quad (7).$$

Значения коэффициентов $A_0 \div A_6$ представлялись в виде таблиц. Коэффициенты для первых четырех точек представлены в таблице 1.

Таблица 1.
Коэффициенты $A_6, A_5, A_4, A_3, A_2, A_1, A_0$.

Точка 1'	A_6	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1	A_0
$V_{\varphi}/V_{x,ср.}$	0	307,68	-743,33	666,83	-281,24	58,252	-3,26
$V_x/V_{x,ср.}$	0	105,03	-230,32	155,98	-33,081	3,297	-0,244
Точка 2'							
$V_{\varphi}/V_{x,ср.}$	0	0	-1,229	9,83	-22,681	17,082	-1,029
$V_x/V_{x,ср.}$	0	-42,285	106,85	-92,399	25,832	1,558	0,05
Точка 3'							
$V_{\varphi}/V_{x,ср.}$	0	0	-10,830	30,238	-36,150	19,905	-1,091
$V_x/V_{x,ср.}$	0	0	-2,37	8,763	-9,263	2,675	0,542
Точка 4'							
$V_{\varphi}/V_{x,ср.}$	0	0	-3,6	24,36	-42,857	26,967	-2,43
$V_x/V_{x,ср.}$	0	0	0	4,297	-4,625	-0,345	1,017

Наблюдения за работой аппарата показали, что на расстоянии от среза закручивающего устройства равном $h/D_{\text{АП}}=1,5 \div 2$ вся жидкость выводится из аппарата. Поэтому исследования характеристик закрученного газового потока над закручивающим устройством сухого и орошаемого аппарата проводились на расстоянии от среза закручивающего устройства равном $h/D_{\text{АП}}=2$, где имеет место осесимметричный закрученный поток.

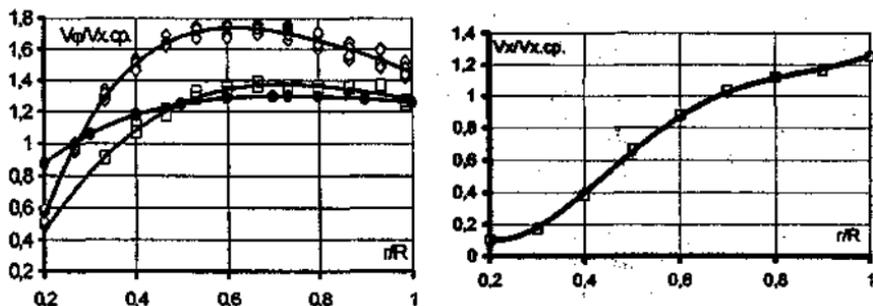


Рис. 4. Тангенциальная и осевая скорости в точке П'. • - без орошения ($w=0\text{ м/с}$), - орошение в ЗУ ($w=2\text{ м/с}$), • - орошение над ЗУ ($w=2\text{ м/с}$).

Проведенные исследования показали, что орошение существенно влияет на структуру газового потока, вызывая более быструю раскрутку потока и значительно трансформирует профили скоростей, особенно тангенциальной.

Проверка правильности замеров проводилась сравнением расхода на диафрагме с расходом рассчитанным путем интегрирования экспериментально полученных профилей осевой скорости V_x

$$G_v = 2\pi \int_{r_1}^R V_x \cdot r \cdot dr \quad (8).$$

Связь между моментом количества движения на срезе закручивающего устройства и моментом на входе в закручивающее устройство описывалась формулой

$$M_0 = \kappa_m \cdot M_{вх} \quad (9),$$

где κ_m - коэффициент, зависящий от типа закручивающего устройства, для исследуемого аппарата он составил $\kappa_m = 1,11$.

Момент количества движения газового потока сухого аппарата на участке $h/D_{АП}=0,2$ рассчитывался

$$\bar{M} = M_0 / (1 + k \cdot M_0 \cdot \bar{h}) \quad (10),$$

где k - коэффициент, $k=0,0204$, что соответствует данным большинства исследователей.

В орошаемом аппарате изменение момента количества движения газового потока на высоте $h/D_{АП}=2$ зависит от скорости истечения жидкости $w_{ж}$ и описывается

$$\bar{M} = 1,357 \cdot e^{-0,049 \cdot w_{ж}} \quad (11).$$

Максимальное значение тангенциальной скорости характеризуется интегральным параметром закрутки

$$\bar{V}_{\phi m} = 1,535 \cdot \Phi_x \quad (12).$$

Интегральный параметр закрутки определялся из формулы

$$\Phi_x = 0,76 \bar{M} \quad (13).$$

Как показали исследования увеличение скорости истечения жидкости приводит к падению значений тангенциальных скоростей, то есть приводит к раскрутке потока и падению момента количества движения.

Изменение радиуса максимума тангенциальной скорости для сухого аппарата согласуется с данными большинства исследователей и равен

$$r_{\phi m c} = r_H \cdot \exp(-0,04 \cdot (h/D_{АП})) \quad (14),$$

где для исследуемого аппарата $r_H = 0,72$.

В орошаемом аппарате по сравнению с сухим аппаратом наблюдается увеличение $r_{\phi m}$ то есть $V_{\phi m}$ смещается к стенке аппарата (рис 4).

Для этого случая изменение $r_{\phi m}$ хорошо описывается зависимостью

$$r_{\phi m o} = 0,69 \cdot \exp(k_2 \cdot (h/D_{АП})) \quad (15),$$

где $k_2 = 0,00718 \cdot m^{0,64} \cdot w_{ж}^{0,83} \cdot P_{op}^{0,1}$.

При $h/D_{\text{АП}}=2$, $P_{\text{оп}}=2,34$, $m=4$ формула (15) принимает вид

$$r_{\text{фм}0} = 0,69 \cdot \exp(0,03797 \cdot w_{\text{ж}}^{0,83}) \quad (16).$$

Как показали исследования в зонах $h/D_{\text{АП}} > 2$ радиус максимума тангенциальной скорости можно рассчитать по формуле (14), где $r_{\text{н}} = r_{\text{фм}0}$.

Для описания профиля тангенциальной скорости была получена формула

$$\bar{V}_{\varphi} = \bar{V}_{\text{фм}} \left(\frac{2 \cdot \lambda}{1 + \lambda^2} \right)^{1,4} \quad (17).$$

$$\lambda = \bar{r} / \bar{r}_{\text{фм}}$$

С помощью зависимостей, предложенных предшествующими исследователями были рассчитаны параметры аппарата с оросителем над закручивающим устройством, при этом $F_{\text{АП}}$, $F_{\text{вх}}$, $M_{\text{вх}}$, $P_{\text{оп}}$ приняты как для исследуемого аппарата.

Расчетный профиль скорости в аппарате с оросителем над закручивающим устройством и экспериментально найденные значения скорости в аппарате с оросителем в закручивающем устройстве представлены на рис.4. Из рисунка видно, что положение максимума тангенциальной скорости не зависит от места ввода орошения, при этом величина максимума тангенциальной скорости при орошении над закручивающим устройством меньше, чем при орошении в закручивающем устройстве.

Профиль осевой скорости мало зависит от орошения и близок к профилю скорости сухого аппарата и описывается следующей найденной зависимостью

$$V_x = -3,195 r^{-5} + 23 r^{-4} - 45,896 r^{-3} + 36,539 r^{-2} - 10,198 r + 1,014 \quad (18).$$

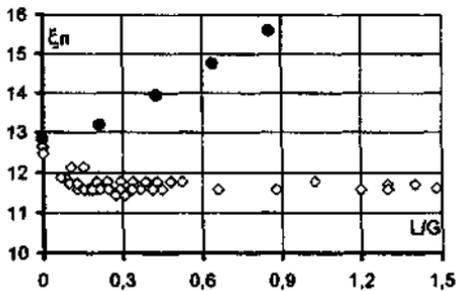


Рис. 5. • - орошение в ЗУ,
○ - орошение над ЗУ

Исследования гидравлического сопротивления аппарата показали, что в исследуемом диапазоне скоростей сопротивление аппарата зависит от расхода газа и расхода жидкости.

В аппарате с орошением в закручивающем устройстве основным фактором влияющим на гидравлическое сопротивление является соотношение массовых расходов L/G , при $L/G < 0,2$ гидравлическое сопротивление падает и при $L/G = 0,2 \div 1,5$ принимает постоянное значение равное $0,9 P_{\text{п.сух}}$.

Уменьшение гидравлического сопротивления орошаемого аппарата по сравнению с сухим, можно объяснить уменьшением трения о стенки аппарата, а так же гашением турбулентных пульсаций газового потока каплями жидкости.

Коэффициент гидравлического сопротивления исследуемого аппарата можно представить как

$$\xi_{\Pi} = \xi_{\text{ВХ}} + \xi_{\text{ОР}} \quad (19).$$

Для расчета $\xi_{\text{ВХ}}$ использована зависимость, предложенная Нурсте

$$\begin{aligned} \xi_{\text{ВХ}} &= \epsilon \cdot \mu^{-2} \\ \mu &= \left[(2 - \psi) / \psi^3 \right]^{0,5} \\ M_{\text{ВХ}} &= (1 - \psi) / \sqrt{\psi^3 / 2} \end{aligned} \quad (20).$$

Расчет по уравнениям (20) ведется нахождением коэффициента ψ методом последовательных приближений, после чего определяется коэффициент μ , а с учетом ϵ находится $\xi_{\text{ВХ}}$.

Коэффициент аэродинамического сопротивления, связанный с орошением определен экспериментально и описывается найденными зависимостями:

$$\text{для } L/G=0 \div 0,2 \quad \xi_{\text{ОР}} = -6,32 \cdot L/G \quad (21);$$

$$\text{для } L/G=0,2 \div 1,5 \quad \xi_{\text{ОР}} = -0,1 \cdot \xi_{\text{ВХ}} \quad (22).$$

Полное гидравлическое сопротивление аппарата рассчитывалось по формуле

$$P_{\Pi} = \xi_{\Pi} \cdot \rho \cdot V_{\text{Х.СР}} / 2 \quad (23).$$

Погрешность между расчетным значением гидравлического сопротивления и экспериментальным не превышала $\pm 5\%$.

Сравнение значений коэффициентов гидравлического сопротивления для аппарата с орошением в закручивающем устройстве и над ним при одинаковых условиях работы представлено на рис. 5.

Из графика видно, что гидравлическое сопротивление в аппарате с орошением в закручивающем устройстве практически не меняется с увеличением орошения, а в аппарате с орошением над закручивающим устройством возрастает.

В третьей главе описана экспериментальная установка и изложена методика

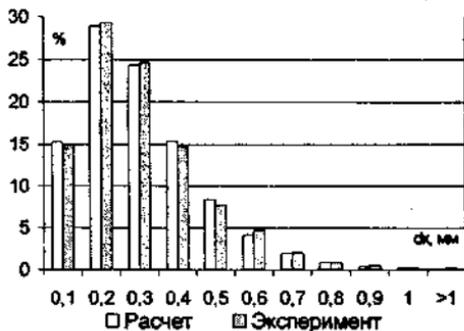


Рис. 6. Точка $V_{\text{Х.СР.}} = 15 \text{ м/с}$, $W_{\text{ж}} = 4,25 \text{ м/с}$

проведения эксперимента по исследованию дисперсного состава факела орошения.

Основными методами исследования являлись визуальное наблюдение и фотографирование факела орошения. Съемку факела орошения производили фотоаппаратом Зенит-ЕТ на пленку "Тип-17Л" (250 ед.). При фотографировании освещение осуществлялось с помощью импульсной лампы

строботахметра СТ-32. При исследовании осуществлялось послойное фотографирование капельной зоны. Глубина съемки составляла 3 см.

Размеры образующихся капель замерялись по 20-кратному увеличенному изображению. Для капель неправильной формы измерялись наибольший и наименьший диаметры, которые затем усреднялись.

Из-за того, что профиль скорости меняется как по высоте, так и по окружности аппарата определялся дисперсный состав капель для каждой пленки жидкости сходящей с оросителя.

Проведенные исследования и обработка результатов показали, что для каждой пленки оросителя дисперсный состав капель можно описать зависимостями, предложенными для аппарата с орошением над закручивающим устройством:

$$p(d_k) = \frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} \cdot d_k^{\eta-1} \cdot \exp(-\lambda \cdot d_k) \quad (24),$$

$$\eta = 1,747 \cdot d_0^{0,11} \cdot w_{ж}^{-0,18} \cdot v_{п}^{0,17} \quad (25),$$

$$\lambda = 0,748 \cdot d_0^{0,6} \cdot w_{ж}^{0,34} \cdot v_{п}^{0,64} \quad (26).$$

Оценка близости фактического распределения к теоретическому проводилась с помощью критерия согласия Романовского.

В четвертой главе описана экспериментальная установка и методика по исследованию эффективности пылеулавливания в вихревом аппарате с вертикально-дефлекторным оросителем в закручивающем устройстве, представлена методика расчета эффективности пылеулавливания.

Расчетная эффективность пылеулавливания аппарата проверялась на порошке талька. Контроль запыленности воздуха на входе и на выходе из аппарата производился методом внешней фильтрации проб, при условии изокинетичного отбора проб.

Основными механизмами, отделяющими твердую фазу от газа в орошаемых вихревых аппаратах являются: центробежное осаждение твердых частиц в закрученном газовом потоке и осаждение взвешенных частиц на поверхности капель жидкости.

Обзор методик расчета эффективности пылеулавливания вихревых скрубберов, показал, что авторы рассчитывают как бы два аппарата, в одном определяют эффективность от центробежного осаждения ($\eta_{ц}$), а во втором определяют эффективность от осаждения на каплях (η_k). Полную эффективность от действия двух механизмов определяют по формуле

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{ц})(1 - \eta_k) \quad (27).$$

Чтобы исключить двойной расчет, было учтено, что частицы пыли находящиеся на радиусе от $r_{кр}$ до R уловятся за счет центробежной силы и их из расчета можно исключить (рис. 7), а частицы пыли находящиеся на радиусе от $r_{бч}$ до $r_{кр}$ могут уловиться только за счет осаждения на каплях. То есть расчет сводится к

определению $r_{\text{бн}}$, $r_{\text{кр}}$, и количества пыли неуловившейся в аппарате за счет осаждения на каплях на радиусе от $r_{\text{бн}}$ до $r_{\text{кр}}$.

При расчете принимаем, что началом отсчета движения твердых частиц являются плоскости 1-1 и 3-3 (рис. 7), так же считаем что частицы пыли по сечению этих плоскостей распределены равномерно.

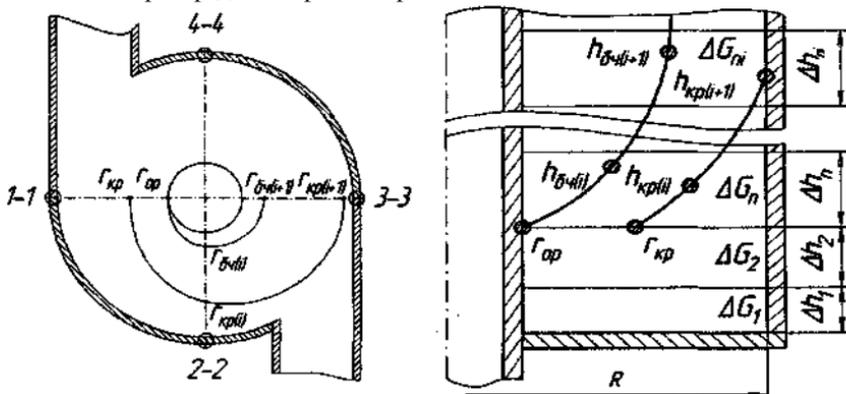


Рис. 7.

Поскольку пыль поступает в аппарат по всей высоте закручивающего устройства, разделим плоскости 1-1 и 3-3 на участки высотой $h_1, h_2, h_n, \dots, h_{n_i}$, таким образом, чтобы разница в расходах газа верха и низа участка h_{n_i} не превышала 10%.

Количество пыли, поступившее на участке h_{n_i}

$$m_{\text{вх}} = z_{\text{вх}}/2 \quad G_{n_i} \quad (28).$$

Количество пыли находящееся на радиусе от $r_{\text{оп}}$ до $r_{\text{кр}}$

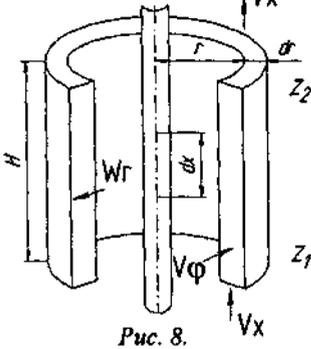
$$m_{\text{вх}i} = m_{\text{вх}} \cdot G_{\text{кан}}/G_{\text{п}} \quad (29).$$

Для определения количества пыли (поступившей на участке h_{n_i}) неуловившейся на каплях, необходимо установить, как изменяется количество пыли по ходу движения частиц.

Для чего разделим закручивающее устройство вертикальными плоскостями 1-1-4-4. В каждой зоне ограниченной вертикальными плоскостями и траекториями частиц предполагаем, что профиль скорости не меняется по высоте и окружности (рис. 7).

При расчете пылеулавливания на каплях жидкости предполагаем, что осаждение происходит за счет трех механизмов: инерционное соударение, перехват и диффузия, которые учитываются параметром $\eta_{\text{ос}}$.

Для определения эффективности улова твердых частиц определенного диаметра каплями жидкости, находящихся в зоне орошения выделим на оросителе участок высотой dx (рис. 8) и элементарный объем в виде кольца радиусом r , толщиной dr и высотой H ($H \gg dx$). Концентрация пыли на входе в элементарный объем z_1 , а на выходе z_2



Расход газа в элементарном объеме

$$dG = 2\pi \cdot V_x \cdot r \cdot dr \quad (30).$$

Расход жидкости

$$dL = L \cdot dx / h_{op} \quad (31).$$

Средний объем капель с учетом распределения капель по размерам

$$V_{к.ср.} = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} d_k^3 P(d_k) dd_k \quad (32).$$

Лобовая поверхность капель диаметра d_k , находящихся в элементарном объеме

$$S = \frac{\pi \cdot L \cdot P(d_k) \cdot d_k^2 \cdot dx \cdot dr \cdot dd_k}{4 \cdot h_{op} \cdot V_{к.ср.} \cdot W_r} \quad (33).$$

Количество пыли, оседающей на каплях жидкости диаметром d_k в единицу времени

$$m_k = z \cdot \eta_{oc} \cdot S \cdot V_{oc} \quad (34),$$

где скорость осаждения частиц пыли на каплях жидкости диаметром d_k

$$V_{oc} = \sqrt{(U_r - W_r)^2 + (U_{\phi} - W_{\phi})^2 + (U_x - W_x)^2} \quad (35).$$

Общее количество пыли, оседающее на каплях всех диаметров, находящихся в элементарном объеме

$$m = \int_0^{\infty} z \cdot \eta_{oc} \cdot V_{oc} \frac{\pi \cdot L \cdot P(d) \cdot d_k^2 \cdot dx \cdot dr \cdot dd_k}{4 \cdot h_{op} \cdot V_{к.ср.} \cdot W_r} \quad (36).$$

Уравнение материального баланса по пыли для рассматриваемого элементарного объема

$$m = 2\pi \cdot r \cdot z \cdot V_x \cdot dr - 2\pi \cdot r \cdot (z - dz) \cdot V_x \cdot dr = 2\pi \cdot r \cdot dz \cdot V_x \cdot dr \quad (37).$$

Приравнявая правые части двух последних уравнений и интегрируя, получаем:

$$z_2 = z_1 \cdot \exp \left(\frac{1}{8h_{op} \cdot r} \int_{x_1}^{x_2} \frac{L}{V_{к.ср.} \cdot V_x} \left[\int_0^{\infty} \frac{V_{oc} \cdot \eta_{oc} \cdot d_k^2 \cdot P(d) \cdot dd_k}{W_r} \right] dx \right) \quad (38).$$

Пределы интегрирования

$$x_1 = \frac{h_{\delta q(i)} + h_{kp(i)}}{2}; \quad x_2 = \frac{h_{\delta q(i+1)} + h_{kp(i+1)}}{2}$$

Конечная концентрация пыли

$$z_{ki} = \frac{2\pi}{G_{КАП}} \int_{r_1}^{r_2} z_2 \cdot V_x \cdot r \cdot dr \quad (39).$$

Пределы интегрирования

$$r_1 = \frac{r_{\delta q(i)} + r_{\delta q(i+1)}}{2} \quad r_2 = \frac{r_{kp(i)} + r_{kp(i+1)}}{2}$$

Начальные условия при решении уравнения (39):

при $t=0$: $x=h_H$; $r=r_H$; $d_k=0,05$ мм.

Расчет заканчивался при соблюдении условий:

$x=h_0$; $r=R$; $d_k=2$ мм.

Уравнение (39) решается численным методом совместно с уравнениями движения частиц и капель, используя экспериментально полученные зависимости по

V_φ, V_x, V_r

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU_r}{d\tau} &= \frac{U_\varphi^2}{r} + \frac{3\rho_r U_{отн}}{4\rho_q d_q} (V_r - U_r) \xi_q, & \frac{dr}{d\tau} &= U_r, \\ \frac{dU_\varphi}{d\tau} &= -\frac{U_\varphi U_r}{r} + \frac{3\rho_r U_{отн}}{4\rho_q d_q} (V_\varphi - U_\varphi) \xi_q, & \frac{d\varphi}{d\tau} &= \frac{U_\varphi}{r}, \\ \frac{dU_x}{d\tau} &= g + \frac{3\rho_r U_{отн}}{4\rho_q d_q} (V_x - U_x) \xi_q, & \frac{dx}{d\tau} &= U_x. \end{aligned} \right\} \quad (40),$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dW_r}{d\tau} &= \frac{W_\varphi^2}{r} + \frac{3\rho_r W_{отн}}{4\rho_{ж} d_k} (V_r - W_r) \xi_k, & \frac{dr}{d\tau} &= W_r, \\ \frac{dW_\varphi}{d\tau} &= -\frac{W_\varphi W_r}{r} + \frac{3\rho_r W_{отн}}{4\rho_{ж} d_k} (V_\varphi - W_\varphi) \xi_k, & \frac{d\varphi}{d\tau} &= \frac{W_\varphi}{r}, \\ \frac{dW_x}{d\tau} &= g + \frac{3\rho_r W_{отн}}{4\rho_{ж} d_k} (V_x - W_x) \xi_k, & \frac{dx}{d\tau} &= W_x. \end{aligned} \right\} \quad (41).$$

Начальные условия при решении уравнений (40,41):

при $\tau=0$: $U_\varphi = V_\varphi$; $U_x = V_x$; $U_r = 0$; $r = r_H$; $x = h_H$.

$$W_{r0} = W_{ж} \cos \beta; \quad W_{\varphi 0} = W_{ж} \sin \beta; \quad W_{x0} = 0.$$

Радиальную составляющую полной скорости газового потока определяем из

уравнения неразрывности

$$\frac{drV_r}{dr} + \frac{drV_x}{dh} + \frac{dV_\varphi}{d\varphi} = 0 \quad (42).$$

При решении (40, 41) предполагаем, что: капли и частицы, имеют сферическую форму; на каплю и частицу действуют сила сопротивления среды, центробежная сила и сила тяжести.

Количество пыли, поступившее на участке h_{ni} и неуловившееся в факеле орошения

$$m_{\text{вых}i} = z_{ki} \cdot \Delta G_{ni} \cdot \frac{G_{\text{КАП}}}{G_{\Pi}} \quad (43).$$

Полное количество неуловившейся пыли

$$m_{\text{вых}} = \sum m_{\text{вых}i} \quad (44).$$

Эффективность пылеулавливания

$$\eta = 1 - \frac{m_{\text{вых}}}{m_{\text{вх.п}}} \quad (45).$$

Достоверность полученных зависимостей и предложенной методики расчета проверялась на аппарате с орошением в закручивающем устройстве, на очистке воздушного потока от порошка талька. Результаты сравнения расчета и эксперимента показаны на рис. 9. Из которого видно достаточно хорошую сходимость расчета и эксперимента и, что эффективность пылеулавливания исследуемого аппарата, обладающего более низкими энергозатратами и металлоемкостью, на уровне аппарата с орошением над закручивающим устройством.

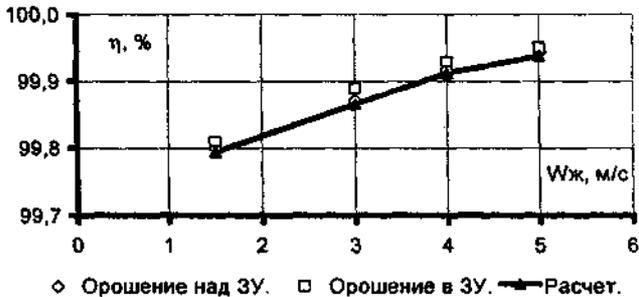


Рис. 9. Эффективность пылеулавливания при $V_{х.ср.} = 16$ м/с

Исследуемый аппарат промышленного образца спроектирован и изготовлен для очистки вентиляционных газовых выбросов в производстве тиоколов на ОАО «Казанский завод СК» (очистка от порошка доломита, сажи, мела). В настоящее время промышленный аппарат находится на стадии монтажа.

Выводы.

1. Исследованием доказано, что при организации ввода орошения в закру-

чивающем устройстве аппарата, значительно уменьшаются гидравлические потери и металлоемкость без ухудшения процесса пылеулавливания. На основании чего была разработана и исследована конструкция вихревого скруббера с вертикально-дефлекторным оросителем в двухзаходном тангенциальном закручивающем устройстве.

2. Исследованы поля скоростей однофазного газового потока в закручивающем устройстве, а также показано, что раскрутка газового потока меньше при орошении в закручивающем устройстве, по сравнению с орошением над закручивающим устройством.

3. Исследованием гидравлического сопротивления аппарата показано, что с ростом плотности орошения (при L/G от 0,2 до 1,5 кг/кг) гидравлическое сопротивление аппарата с орошением в закручивающем устройстве не меняется, а аппарата с орошением над закручивающим устройством растет.

4. Фотографированием факела орошения и определением дисперсного состава капель жидкости показано, что независимо от места ввода орошения дисперсный состав факела орошения подчиняется одному закону гамма-распределения.

5. Предложена методика расчета эффективности пылеулавливания аппарата, основанная на двух механизмах осаждения твердых частиц: центробежного и инерционного на каплях распыленной жидкости. Достоверность результатов расчета подтверждена экспериментальным исследованием эффективности очистки воздушного потока от порошка талька.

6. На основе полученных экспериментальных данных был рассчитан и сконструирован вихревой скруббер с орошением в закручивающем устройстве для очистки вентиляционных газовых выбросов в производстве тиоколов на ОАО «Казанский завод СК» (очистка от порошка доломита, сажи, мела). В настоящее время промышленный аппарат изготовлен и находится в процессе монтажа.

Условные обозначения.

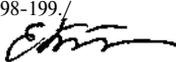
C_k - поправка Каннинггема, $D_{\text{Ап}}$ - внутренний диаметр аппарата, $F_{\text{Ап}}$ - площадь поперечного сечения аппарата, $F_{\text{Вх}}$ - площадь поперечного сечения тангенциальных патрубков, $G_{\text{п}}$ - полный расход газа на рассматриваемом участке, $G_{\text{кап}}$ - расход газа на участке ограниченном радиусами $r_{\text{кр}}$ и $r_{\text{оп}}$ ($R_{\text{бч}}$). $G_{\text{ни}}$ - разница в расходах газа верха и низа рассматриваемого участка, L - расход жидкости, M - осевая составляющая потока момента количества движения, $M_{\text{вх}}$ - входной момент количества движения, $M_{\text{о}}$ - момент количества движения на срезе закручивающего устройства, $P_{\text{ор}}$ - относительный периметр орошения, $R_{\text{п}}$ - гидравлическое сопротивление орошаемого и сухого аппарата, R - внутренний радиус аппарата, U_{ϕ} , U_x , U_r - тангенциальная, осевая, радиальная скорости твердых частиц, $U_{\text{отн}}$ - относительная скорость, V_x , V_{ϕ} , V_r - осевая, тангенциальная и радиальная составляющие полной скорости газового потока, $V_{x, \text{ср}}$ - среднерасходная скорость газового потока, $V_{\text{п}}$ - полная скорость газового потока, $V_{\phi \text{ м}}$ - максимум

тангенциальной скорости газового потока, W_{ϕ} , W_x , W_r - тангенциальная, осевая, радиальная скорости капле, $\Gamma(\eta)$ - гамма функция, a - ширина тангенциальных патрубков, a_n - ширина пленки образующаяся от одной струи, b - высота тангенциального патрубка, d_o - диаметр отверстия в оросителе, d_k - диаметр капли, d_c - диаметр частицы пыли, h , g , θ - цилиндрические координаты, h_{op} - высота зоны орошения, m - количество дефлекторов, p - число отверстий в оросителе, $Швхп$ - полное количество пыли поступившее в аппарат, $m_{вх}$ - полное количество пыли на выходе из зоны орошения, r_{oc} - радиус на котором находится частица начавшая движение от оросителя, r_{op} - радиус оросителя, $r_{\phi m}$ - радиус максимума тангенциальной скорости, w_x - скорость истечения жидкости, $Z_{вх}$ - концентрация пыли на входе в аппарат, ϵ - коэффициент, учитывающий тип закручивающего устройства, η - эффективность пылеулавливания, η_{oc} - суммарная эффективность осаждения от трех механизмов, ϕ - угол отклонения потока газа от оси аппарата, ρ_r - плотность газа, ρ_c - плотность частицы пыли, ξ_x - коэффициент лобового сопротивления капли, $\xi_{вх}$ - коэффициент аэродинамического сопротивления закручивающего устройства, ξ_{of} - коэффициент аэродинамического сопротивления, учитывающий влияние орошения, ξ_p - коэффициент аэродинамического сопротивления аппарата, ξ_c - коэффициент лобового сопротивления частицы пыли, τ - время.

Основные положения диссертации отражены в публикациях.

1. Поникаров И.И., Алексеев В.А., Татаринов Е.Б. Аэродинамика вихревого скруббера с вертикально-дефлекторным оросителем в закручивающем устройстве. Деп. в ВИНТИ № 2471-В2001.-Казань, 2001.-25С.
2. Поникаров И.И., Алексеев В.А., Татаринов Е.Б. Расчет эффективности пылеулавливания вихревого скруббера с орошением в закручивающем устройстве. - Казань, 2002. 14с. (Препринт/Изд-во Казан, гос. техн. ун-та, 02П2).
3. Татаринов Е.Б., Поникаров И.И., Алексеев В.А. Исследование аэродинамики вихревого скруббера с вертикально-дефлекторным оросителем в закручивающем устройстве // Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений: Тез. докл. IX Межд. конф. мол. ученых - Казань: Изд-во Казан, гос. технол. ун-та, 1998. - С.236-237.
4. Татаринов Е.Б., Поникаров И.И., Алексеев В.А. Гидравлическое сопротивление вихревого скруббера с вертикально-дефлекторным оросителем в двухзаходном тангенциальном закручивающем устройстве // Методы кибернетики химико-технологических процессов: Тез. докл. V Межа, научн. конф. - Казань: Изд-во Казан, гос. технол. ун-та, 1999. - С. 144-145.
5. Татаринов Е.Б., Поникаров И.И., Алексеев В.А. Исследование гидродинамики вихревого скруббера с вертикально-дефлекторным оросителем в закручивающем устройстве // Тепло- и массообмен в химической технологии: Тез. докл. Всеросс. научн. конф. посвящ. 80-летию со дня рожд. проф. АХ.Усманова - Казань: Изд-во Казан, гос. технол. ун-та, 2000. - С.175-176.
6. Татаринов Е.Б., Поникаров И.И., Алексеев В.А. Аэродинамика двухзаходного тангенциального закручивающего устройства // Тепло- и массообмен в химической технологии: Тез. докл. Всеросс. научн. конф. посвящ. 80-летию со дня рожд. проф. А.Г.Усманова - Казань: Изд-во Казан, гос. технол. ун-та. 2000. - С.198-199.

Соискатель



Е.Б. Татаринов