

Литература

1. Федорец, А. А. Определение коэффициента гидравлического трения в трубопроводах при отсоединении расхода [Текст] / А. А. Федорец, З. Р. Маланчук // Гидравлика и гидротехника. - 1980. - Вып. 31. - С. 58–62.
2. Кравчук, А. М. Движение жидкости в трубопроводах с отсоединенным расходом вдоль пути [Текст] / А. М. Кравчук // Автореферат...кандид. техн. наук. К. - 1985.- 23 с.
3. Животовский, Б. А. К вопросу о расчете трубопроводов с непрерывно меняющимся расходом по длине [Текст] / Б.А. Животовский // Труды университета Дружбы народов им. П. Лумумбы. - 1973. - Вып. 65. - С. 132 – 137.
4. Мещерский И.В. Уравнение движения точки переменной массы в общем случае [Текст] / И.В. Мещерский // М.: Государственное издательство по строительству и архитектуре. - 1952.
5. Henruk Walden, Jezzy Stsiak. Mechenika ciecy i garow b inzynierii sanitarnej [Текст] / Arkdy, Warszawa. - 1971. - с. 554
6. Яхно О.М., Кривошеев В.С., Матиiega В.М. Гидродинамический начальный участок [Текст], Черновці, “Зелена Буковина”- 2004. - 200с.
7. Повх И.Л. Техническая гидромеханика [Текст], М.: Машиностроение, -1976. - 504 с.
8. Каминер А.А., Яхно О.М. Гидромеханика в инженерной практике [Текст], Техника. - 1987. - 175 с.
9. Яхно О.М., Дубовицкий В.Ф. Основы реологии полимеров [Текст] Издательское объединение «Вища школа» - 1976.- 188 с.
10. Торнер, Р.В. Основные процессы переработки полимеров (теория и методы расчета) [Текст] / Р.В. Торнер.- М.: Химия. - 1972.- 456 с.

Ми представляємо конструкцію багатофункціонального вихрового апарата із зустрічними закрученими потоками, яка може бути використана для проведення різних фізико-механічних процесів в умовах активних гідродинамічних режимів

Ключові слова: вихровий апарат із зустрічними закрученими потоками (ВАЗП), активний гідродинамічний режим, сепарація

Мы представляем конструкцию многофункционального вихревого аппарата со встречными закрученными потоками, которая может быть использована для проведения различных физико-механических процессов в условиях активных гидродинамических режимов

Ключевые слова: вихревой аппарат со встречными закрученными потоками (ВАЗП), активный гидродинамический режим, сепарація

УДК 621.928.37

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ МНОГО- ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВИХРЕВЫХ АППАРАТОВ

Р. В. Галич

Инженер по наладке и испытаниям технологий
Частное акционерное общество «Северодонецкий
ОРГХИМ»

Гвардейский пр-т, 32, г. Северодонецк, Украина,
93409

E-mail : galitch@bk.ru

1. Введение

Первые серьёзные публикации по вихревым аппаратам датированы 1963 годом, когда немецкие исследователи, проводившие опыты с тонкодисперсными пылями в закрученных (вихревых) потоках, отметили эффект осаждения частиц на стенки аппарата [1-3]. После патентования и последующих продолжительных теоретических, экспериментальных, промышленных исследований и системного анализа полученных результатов, появилась первая конструкция аппарата со вторичными струями, которая стала прототипом для современных конструкций вихревых аппаратов

со встречными закрученными потоками (ВАЗП), предназначенных для проведения процесса сепарации частиц (пылеулавливания). В последующем теоретическими исследованиями и промышленным внедрением пылеуловителей ВАВЗП занимались российский учёный д.т.н., проф. Гудим Л. И. [4-6] под руководством академика Сажина Б. С. (Московский государственный университет дизайна и технологий), а также украинский учёный д.т.н., проф. Якуба А. Р. [7] (Сумский национальный аграрный университет), результаты работ которых позволили в современной технике пылеулавливания иметь широкий типоразмерный ряд и общую инженерную методику выбора и

расчёта ВАВЗП для материалов разных отраслей промышленности.

В Украине в структуре многопрофильной промышленно-инжиниринговой компании «ЧАО «Северодонецкий ОРГХИМ» создана специализированная группа аспирации, пылеулавливания и кондиционирования, которая в настоящее время занимается проблемами очистки запылённого воздуха с использованием установок на базе ВАВЗП, причём не только в Украине, но и в Российской Федерации и Республике Казахстан.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В настоящее время известны два основных типа ВАВЗП(Ц,К): с цилиндрической (Ц – высокопроизводительная модель) и конической (К – высокоэффективная модель) сепарационной камерой. Для предварительной очистки запылённых потоков на практике применяют модель с цилиндрической сепарационной камерой, которая позволяет очищать потоки от взвешенных частиц с медианным размером $d_m = (10-5)$ мкм с эффективностью, достаточной для последующего выброса очищенного потока в атмосферу, либо в том случае, когда требуется снижение концентрации пыли перед последующей тонкой очисткой. Во втором случае целесообразно использование ВАВЗП с конической сепарационной камерой или соответствующие типы аппаратов более тонкой очистки. ВАВЗПК рекомендуется использовать также в случае, когда по технологии требуется высокая степень очистки (ценный продукт, высокие требования к чистоте выбросов), а гидравлические потери (энергозатраты) не регламентируются процессом очистки.

На рис. 1 показана типовая конструкция ВАВЗПЦ для предварительной очистки запылённых потоков [8].

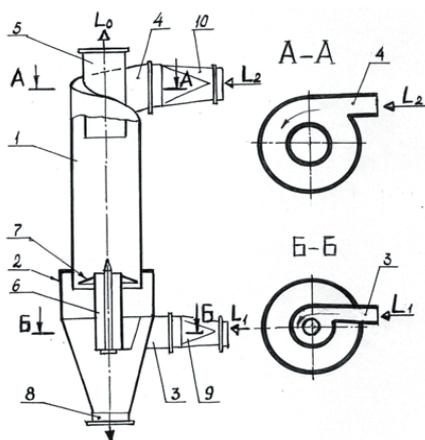


Рис. 1. Схема типовой модели ВАВЗПЦ: 1 - сепарационная камера; 2 - бункер-накопитель; 3, 4 - каналы подачи первичного (L_1) и вторичного (L_2) потоков; 5 - патрубок отвода очищенного потока (L_0); 6 - завихритель первичного потока; 7 - отбойная шайба; 8 - пылевыпускной штуцер; 9, 10 - переходы к первичному и вторичному входным каналам

Аппарат работает следующим образом.

Запылённый поток подаётся в сепарационную камеру 1 одновременно по входным каналам 3 и 4. Первичный поток (L_1) в завихрителе 6 приобретает вращательное движение и снизу поступает в сепарационную камеру 1, а вторичный поток (L_2) закручивается вокруг выходного патрубка 5 и, интенсивно вращаясь, движется навстречу первичному потоку в виде кольца, ограниченного стенкой камеры 1 и выходным патрубком 5. При взаимодействии двух закрученных в одну сторону и встречно направленных потоков образуется результирующий вихрь, из которого под действием центробежных сил и сил лобового сопротивления выделяются частицы пыли. При движении в радиальном направлении частицы крупной и средней фракций достигают стенки по всей высоте сепарационной камеры 1, доходят до уровня отбойной шайбы 7 и через кольцевой зазор попадают в бункер-накопитель 2, откуда через пылевыпускной штуцер 8 удаляются из аппарата, а очищенный поток (L_0), содержащий неотделённые в сепарационной камере мелкие фракции пыли, через выходной патрубок 5 направляется либо на окончательную (санитарную) очистку, либо выбрасывается непосредственно в атмосферу.

Эффективность пылеулавливания и уровень энергозатрат в типовой модели ВАВЗПЦ зависят прежде всего от характера организованного в сепарационной камере гидродинамического режима (общий расход по очищаемому воздуху, соотношение взаимодействующих потоков), характеристики улавливаемой пыли (концентрация, степень дисперсности, адгезионно-когезионные свойства, влажность и др.), а также внешних условий (температуры, относительной влажности воздуха или газа).

При проектировании аспирационных установок, с целью достижения проектных показателей общей и фракционной эффективности сепарации частиц и снижения гидравлического сопротивления, прибегают к адаптации режимно-конструктивных параметров типовой модели ВАВЗПЦ к реальным эксплуатационным условиям, для чего в соответствующие функциональные элементы аппарата вносятся определённые конструктивные изменения, обеспечивающие достижение поставленных целей.

На рис. 2 показана типовая модель ВАВЗПЦ, конструктивно адаптированная для улавливания пыли доломита (составляющая шихты стекольного производства).

Результат более эффективной работы такого пылеуловителя обусловлен тем, что при высокой концентрации частиц пыли в подаваемом воздухе, отсепарированные частицы, достигающие стенки по мере движения нисходящего спиралевидного потока вдоль образующей сепарационной камеры 2, через её межвитковые прорезы непрерывно удаляются в полость, образованную между корпусом 1 и витками камеры.

Для быстрого удаления пыли из рабочего пространства аппарата непосредственно перед разворотом вторичного потока, на уровне отбойной шайбы предусмотрен центральный жалюзийный разгрузитель 7, связанный с нижним витком сепарационной камеры 2 и разгрузителем 9 первичного потока. Кроме того, с помощью искусственно созданной низкочастотной вибрации, передаваемой на сепарационную камеру от

эксцентрично установленного вытеснителя первичного завихрителя, улучшаются условия отвода уловленных пылевых частиц через межвитковые зазоры жалюзийных разгрузителей 7, 8, 9.

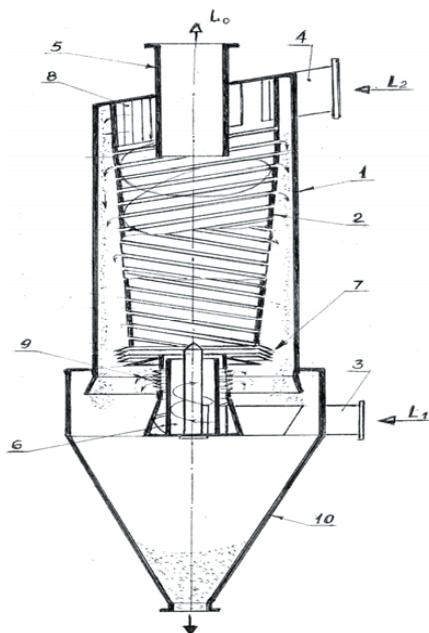


Рис. 2. ВАВЗПЦ с винтовой сепарационной камерой и предварительной выгрузкой пыли: 1 - корпус; 2 - сепарационная камера; 3, 4 - каналы подачи потоков; 5 - выходной патрубок; 6 - завихритель первичного потока; 7 - центральный жалюзийный разгрузитель пыли; 8, 9 - разгрузители пыли вторичного и первичного потоков соответственно; 10 - бункер-накопитель пыли

Таким образом, в сепарационной камере, практически по всей её высоте, удалению подвергаются частицы только тех фракций, которые требуют более продолжительного воздействия центробежных сил при многократном вращении нисходящего вторичного потока.

Как показали промышленные испытания, для эффективного улавливания пыли мела (составляющая шихты стекольного производства) рассмотренная выше конструкция аппарата не может быть рекомендована вследствие стабильного забивания пылью межвитковых зазоров сепарационной камеры, центрального разгрузителя и жалюзийных разгрузителей первичного и вторичного каналов, а также кольцевого выгрузочного канала на уровне отбойной шайбы. Установлено, что наибольшей эффективности при улавливании пыли мела, отводимой от измельчителей и сушильных барабанов, можно достигнуть в установках с групповой компоновкой, причём, все элементы ВАВЗПЦ, устанавливаемые на общий бункер-накопитель с разделяющими перегородками, должны монтироваться без своей бункерной части.

3. Расширение функциональных возможностей вихревых аппаратов

Расширение функциональных технологических возможностей ВАВЗПЦ относится к актуальным за-

дачам и возможно только при условии системного изучения и анализа особенностей их гидродинамики.

Целью создания в любом технологическом аппарате активного гидродинамического режима (АГР) может быть повышение качества продукта, уменьшение времени рабочего цикла процесса, увеличение единичной производительности, экономия сырьевых и энергетических ресурсов, совмещение различных технологических процессов в одном аппарате, уменьшение габаритных размеров, металлоемкости, а также расширение его функциональных возможностей. К технологической аппаратуре с АГР относятся и многофункциональные ВАВЗПЦ, в которых, как показали исследования, кроме процесса сепарации твёрдых (жидких) частиц можно с высокой эффективностью проводить механические, физико-механические, тепловые и массообменные процессы [9, 10].

Техническая возможность применения вихревых аппаратов с АГР определяется прежде всего высокой активностью и особенностями их гидродинамики. Устойчивость гидродинамики в широком диапазоне скоростей, легко изменяемая пространственная картина взаимодействия встречных закрученных потоков способствуют появлению возможности организации такого гидродинамического режима, который в наибольшей степени отвечал бы условиям организуемого в аппарате технологического процесса.

Исследования типовой модели ВАВЗПЦ в качестве центробежного сепаратора частиц позволили выделить три чётко выраженных гидродинамического режима – улавливания, кольца и уноса. Первый режим работы аппарата – в качестве пылеуловителя – характеризуется высокой степенью сепарации взвешенных частиц из результирующего интенсивно вращающегося вихревого потока. Для типовой модели эффективность пылеотделения зависит прежде всего от общего расхода и кратности подаваемых по входным каналам аппарата потоков. Режим, при котором достигается максимальная возможная для данного типоразмера аппарата эффективность пылеулавливания, может быть организован в ВАВЗПЦ при максимальном уровне гидравлического сопротивления, что на практике не всегда целесообразно, так как при этом резко возрастают энергетические затраты на проведение процесса очистки, что влечёт за собой необходимость применения более мощного тягодутьевого устройства (вентилятора).

Следует отметить, что в отличие от однопоточных аппаратов центробежного действия (циклонов), в которых номинальная условная плановая скорость потока ω_a (отнесённая к поперечному сечению сепарационной камеры) является строго фиксированной и имеет относительно малые отклонения от номинальной $\omega_{ном}$ (в пределах $\pm(5-7)\%$), пылеуловители ВАВЗПЦ устойчиво и без заметного снижения эффективности работают в широком диапазоне условных скоростей ($\omega_a = (3,5-9,85)м/с$) при отклонениях от номинальных значений в пределах $\pm(15-25)\%$.

Экспериментально установлено, что с уменьшением кратности потоков, подаваемых по каналам, режим «пылеулавливания» может быть плавным переведен в режим «кольца», характерной особенностью которого является то, что в сепарационной камере образуется взвешенное интенсивно вращающееся коль-

цо дисперсной фазы, при этом количество твёрдых дисперсных частиц в таком кольце, выделенное из закрученных потоков, определяется удерживающей способностью аппарата, зависящей прежде всего от общего расхода аэрозоля, кратности потоков и диаметра сепарационной камеры. Данный режим характерен также тем, что вращающееся кольцо твёрдого материала может удерживаться во взвешенном состоянии сколь угодно долго и менять своё положение по высоте сепарационной камеры от уровня отбойной шайбы внизу до уровня выходного патрубка вверх. В гидродинамическом режиме «кольца» появляется возможность проведения процессов классификации (фракционирования) полидисперсных сыпучих материалов, измельчения, смешения, коагуляции, гранулирования, увлажнения и температурной обработки (обезвоживания и сушки). При этом конструктивное оформление ВАВЗПЦ (геометрия и структура функциональных элементов) и его режимные характеристики являются функцией параметров организуемого технологического процесса.

Так, при организации процесса тепловой обработки влажных материалов, требующих длительного пребывания в зоне сушки, газообразный теплоноситель (воздух или инертный газ) может подаваться в ВАВЗПЦ как по одному из входных каналов, так и по обоим каналам одновременно. Для этого типовая модель ВАВЗПЦ дополнительно оборудуется специальным устройством (регулятором), обеспечивающим требуемую временную задержку материала в зоне сушки. Таким образом, ВАВЗП-сушилка в режиме «кольца» может обеспечивать высокоэффективную тепловую обработку с одновременным улавливанием высушенного продукта, а при необходимости, одновременно с классификацией и гранулированием сухого материала.

Следует заметить, что пространственная ориентация ВАВЗПЦ существенным образом не сказывается на эффективности его работы в качестве пылеуловителя, при этом однако возможны некоторые затруднения с эвакуацией дисперсного материала. Однако в ряде случаев всё же возникает необходимость в том или ином его пространственном расположении – горизонтальном, наклонном или вертикальном. Так, например, при горизонтальном положении сепарационной камеры ВАВЗПЦ и соответствующем его конструктивном оформлении, в нём можно проводить процесс получения твердой фазы из растворов и суспензий с использованием инертных тел, при этом выгрузка тонкодисперсного продукта из аппарата может проводиться непрерывно и без затруднений.

Экспериментальные исследования позволили установить, что в рассматриваемых режимах в ВАВЗПЦ возможна также реализация теплообменных и массообменных процессов в двух и трёхфазных системах [11]. Например, для поглощения газа жидкостью в качестве дисперсной фазы используется поглощаемый газ, а дисперсионной среды – жидкость. При этом конструктивное оформление вихревого аппарата может быть аналогично устройству классификатора, изготовленного на базе типовой модели ВАВЗПЦ.

Третьим характерным для модели ВАВЗПЦ гидродинамическим режимом является режим «уноса», для организации которого необходимо увеличить долю

первичного потока до кратности $K=0,65$. Тогда первичный закрученный поток при выходе из завихрителя и входе в свободное пространство сепарационной камеры расширяется в виде конуса вращения, который своим большим основанием практически полностью перекрывает путь для движения твёрдой фазы до уровня отбойной шайбы и далее в направлении бункера-накопителя, вследствие чего продукт, поступающий с входными потоками, лишь на незначительное время задерживается в рабочей зоне и покидает её с отходящим потоком через выходной патрубок аппарата. Такой режим работы может быть использован, например, для тепловой обработки материалов, время пребывания которых в зоне сушки составляет доли секунды. При этом высушенный в условиях активного гидродинамического режима (при высоких скоростях движения взаимодействующих фаз) продукт будет полностью выноситься из рабочей зоны вихревого аппарата. Данный режим приближается к режиму идеального вытеснения и может быть эффективным для проведения первого периода сушки трудносохнущего и термолабильного высоковлажного материала в условиях максимальной температуры теплоносителя, которая может значительно превышать температуру деструкции объекта сушки. При таком режиме обработки достигается максимальный тепловой к.п.д. процесса сушки высоковлажных материалов.

Следует отметить, что переходные границы между смежными гидродинамическими режимами могут быть расширены или сужены, либо устранены известными приёмами.

Таким образом, рассмотренные особенности гидродинамики ВАВЗПЦ позволяют значительно расширить область их применения при условии внесения соответствующих конструктивных изменений в типовую модель. Для этого необходимы определённые данные, в той или иной степени отражающие реальную картину процессов, протекающих в рабочей зоне ВАВЗПЦ, что, как известно, можно достичь с помощью математического моделирования.

4. Теоретические исследования

С помощью математического моделирования рассмотрим процесс сепарации твёрдых частиц под действием центробежных сил, характер и распределение полей скоростей, а также особенности поведения твёрдых частиц в системе закрученных потоков.

Для расчётов эффективности очистки и величины гидравлического сопротивления ВАВЗПЦ необходимо знание поля скоростей в рабочей камере пылеуловителей [12].

Определяющими факторами структуры потока являются технологические параметры (расходы потоков, входные скорости, физические свойства среды), а также геометрические размеры сепарационной камеры и входных закручивающих устройств (завихрителей) вихревого аппарата.

Для решения задачи расчёта составляющих скорости ранее предлагались различные математические модели. Так, в работе [7] использована модель потенциального течения. В целом она имеет достаточную точность расчёта. Однако зависимости весьма гро-

моздки для инженерных расчётов и не полностью отвечают реальной физической сути явления.

Так, многочисленными исследованиями установлено, что в приосевой зоне тангенциальные скорости распределены по закону вращения твёрдого тела [7, 13]. В работе [1] была принята модель такого движения, однако допущение о равномерном распределении радиальной скорости по высоте сепарационной камеры в большинстве случаев не соответствует действительной картине течения.

В данной статье использована модель обобщённого распределения радиальной скорости, принятая в работе [14]. Однако, принятая модель расчёта тангенциальных скоростей в ней, основанная на эмпирических данных, причём с единым подходом для внутренних и внешних слоёв, заменена на теоретический подход, основанный на законе сохранения момента количества движения потока.

На рис. 3 представлена расчётно-аналитическая схема ВАВЗПЦ.

Вторичный поток L_2 подаётся в верхнюю часть сепарационной камеры 1 через завихритель вторичного потока 2, закручивается и в виде нисходящей спирали опускается вниз до уровня отбойной шайбы 3, пройдя путь по сей высоте (H) рабочей зоны. Первичный поток L_1 подаётся в нижнюю часть сепарационной камеры через осевой завихритель 4, закручивается и в виде восходящей спирали поднимается вверх, постепенно сливаясь со вторичным потоком. Суммарный поток отводится из аппарата через выходной патрубок 5.

Принятые основные обозначения:

L_1, L_2, L_3 – расход первичного, вторичного и общего потока соответственно, $м^3/с$;

r_0, r_1, r_2, r_3, r_4 – радиус сепарационной камеры, обтекателя, завихрителя первичного потока, завихрителя вторичного потока, зоны смешения встречных закрученных потоков, выходного патрубка соответственно, $м$;

a, b – ширина и высота входного канала соответственно, $м$.

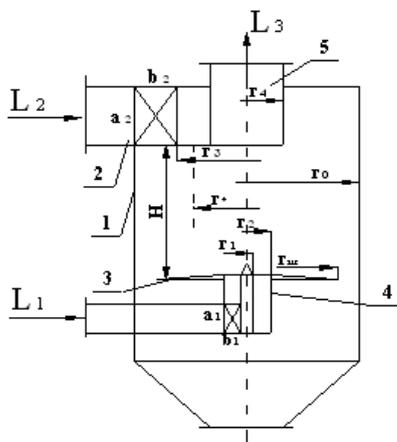


Рис. 3. Расчётно-аналитическая схема ВАВЗПЦ :
1- сепарационная камера (рабочая зона); 2 - завихритель вторичного потока; 3 - шайба отбойная; 4 - осевой завихритель первичного потока; 5 - выходной патрубок

В соответствии с [14], изменение интенсивности смешения вторичного потока (внешнего) с первичным

(внутренним) по высоте сепарационной камеры (H), в виде обобщённой зависимости изменения радиальной скорости, имеет следующий вид:

$$V_r(r_*, z) = -A(H-z)^k, \tag{1}$$

где z - вертикальная координата, отсчитываемая от верхнего уровня отбойной шайбы;

H - высота сепарационной камеры (рабочей зоны);
 A, k - эмпирические коэффициенты.

Из модели (1) вытекает, что при $k=0$ радиальная скорость распределяется равномерно, как принято в [4]. При $k \geq 0$ радиальная скорость V_r возрастает книзу, а при $k \leq 0$ скорость книзу снижается.

Коэффициент A в выражении (1) может быть определён из балансного условия:

$$\int V_r(r_*, z) \cdot 2\pi \cdot r_* \cdot dr = L_2. \tag{2}$$

Из выражений (1, 2) следует:

$$A = \frac{L_2(k+1)}{2\pi \cdot r_* \cdot H^{k+1}}. \tag{3}$$

Изменение расхода вторичного потока по высоте соответствует изменению расхода первичного потока, причём расход вторичного потока уменьшается при слиянии его с первичным потоком, а расход последнего увеличивается:

$$dL_2(z) = dL_1(z) = -V_r(r_*) \cdot 2\pi \cdot r_* \cdot dz. \tag{4}$$

Для решения дифференциального уравнения (4) подставим V_{r*} из (1) и A из (2). Решение относительно $L_1(z)$, при начальном условии $z=0, L_1(z)=L_1$ приводит к выражению:

$$L_1(z) = L_1 + L_2 \left[1 - \left(1 - \frac{z}{H} \right)^{k+1} \right].$$

Заменим $L_2 = \epsilon \cdot L_1$, получим уравнение в ином виде (здесь ϵ - соотношение вторичного и первичного потоков L_2/L_1):

$$L_1(z) = L_1 \left[1 + \epsilon \left(1 - \left(1 - \frac{z}{H} \right)^{k+1} \right) \right] = L_1 \left[(1 + \epsilon) - \epsilon \left(1 - \frac{z}{H} \right)^{k+1} \right]. \tag{5}$$

Аналогично, при начальном условии $z=H, L_2(z)=L_2$, получено уравнение для расчёта расхода вторичного потока $L_2(z)$:

$$L_2(z) = L_2 \left[1 - \left(1 - \frac{z}{H} \right)^{k+1} \right]. \tag{6}$$

Среднее по сечению (S) сепарационной камеры значение осевой скорости V_z вычислим из выражений (5) и (6):

$$V_{z1} = \frac{L}{S_1} \left[(1 + \epsilon) - \epsilon \left(1 - \frac{z}{H} \right)^{k+1} \right]. \tag{7}$$

$$V_{z_2} = \frac{L}{S_2} \left[1 - \left(1 - \frac{z}{H} \right)^{k+1} \right]. \quad (8)$$

Радиальные составляющие скорости были определены из уравнения неразрывности:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot V_r) + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

Подстановкой значений осевой скорости отдельно для внутреннего и внешнего слоя, с учётом граничных условий, получены выражения для расчёта радиальной скорости.

Первичный (внутренний) поток, $r = 0$; $V_r = 0$:

$$V_r = -\frac{L_2(k+1)}{2S_1 \cdot H} \left(1 - \frac{z}{H} \right)^k \cdot r. \quad (10)$$

Вторичный (внешний) поток, $r = 0$; $V_r = 0$:

$$V_r = \frac{L_2 \cdot (k+1)}{2S_2 \cdot H} \cdot \frac{r_0^2 - r^2}{r} \left(1 - \frac{z}{H} \right)^k. \quad (11)$$

В работе [14] уравнения для расчёта тангенциальной скорости (V_ϕ) получены в виде зависимости с использованием экспериментальных данных, однако эмпирический подход вряд ли оправдан на данном этапе исследований. Теоретический метод, основанный на законе сохранения момента количества движения, даёт возможность получить обобщённую зависимость тангенциальных составляющих ВАВЗП во внутреннем и внешнем потоках:

$$\vartheta_{\phi_1} = \omega_1(z) \cdot r. \quad (12)$$

$$\vartheta_{\phi_2} = \omega_1(z) \cdot \frac{r_*^2}{r}, \quad (13)$$

где $\omega_1(z)$ - угловая скорость вращения внутреннего слоя на высоте (z) от верхнего уровня осевого завихрителя.

Уравнение (12) соответствует закону вращения твёрдого тела, а уравнение (13) - закону потенциального вращения.

Для выполнения расчётов необходимо знание угловой скорости вращения потока $\omega_1(z)$. Составим уравнение момента количества движения газа, проходящего через произвольное сечение сепарационной камеры на высоте (z) во внутреннем потоке:

$$M_1(z) = \int_0^{r_*} \rho V_{z_1} \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr \cdot \omega_1(z) \cdot r^2. \quad (14)$$

Радиус поверхности разделения потоков (r_*) примерно равен радиусу выходного патрубка $r_* = r_4$. Интегрирование уравнения (14) в пределах $0 - r_*$ приводит к выражению:

$$M_1(z) = 2\pi \cdot \rho V_{z_1} \cdot \frac{r_*^4}{H}. \quad (15)$$

При $z = H$; $\omega_1(z) = C_0$ - угловая скорость вращения потока в выходном патрубке аппарата.

Подстановка значений V_{z_1} , $S_1 = \pi \cdot r_*^2$, $r = r_4$ приводит к уравнению

$$M_1(z = H) = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{L_1(1+\varepsilon)}{r_*^2} \cdot \omega_1(z) \cdot r_4^2 = M_{\text{вх}}. \quad (16)$$

Решив (16) относительно $\omega_1(H) = C_0$, получим

$$C_0 = \frac{2M_{\text{вх}} \cdot r_*^2}{\rho \cdot L_1(1+\varepsilon) \cdot r_4^4}. \quad (17)$$

Если принять, $r^* = r_4$, то

$$C_0 = \frac{2M_{\text{вх}}}{\rho \cdot L_1(1+\varepsilon) \cdot r_4^2}. \quad (18)$$

Установим значение текущего $\omega_1 = \omega(z)$, используя уравнение моментов количества движения в приращениях

$$\frac{\Delta M_1}{\Delta z} = \frac{dM_1}{dz},$$

где $M_1(z)$ - приведено выше.

$$M_z = \rho \cdot |V_r| \cdot 2\pi \cdot r \cdot \Delta z \cdot V_r \cdot r, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{dM_1(z)}{dz} &= \frac{d}{dz} \left[2\pi \cdot \rho V_{z_1} \cdot \omega_1(z) \frac{r_*^4}{H} \right] = \\ &= \frac{\Delta M_z}{\Delta z} = \rho \cdot |V_r| \cdot 2\pi \cdot r_*^2 \cdot \vartheta_\phi. \end{aligned} \quad (20)$$

Преобразуем к виду

$$\frac{H \cdot V_r}{r_*^2} \cdot \vartheta_\phi = \omega_1(z) \frac{dV_{z_1}}{dz} + V_{z_1} \frac{d\omega_1(z)}{dz}. \quad (21)$$

Подстановка значений V_{z_1} и V_r приводит последнее уравнение к виду:

$$\frac{d\omega_1(z)}{\omega_1(z)} = \frac{(k+1) \left(1 - \frac{z}{H} \right)^k \cdot dz}{H \left[(1+\varepsilon) - \varepsilon \left(1 - \frac{z}{H} \right)^{k+1} \right]}.$$

Интегрирование с преобразованием даёт текущее значение $\omega_1(z)$:

$$\omega_1(z) = \left| \left[\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \left(1 - \frac{z}{H} \right)^{k+1} - 1 \right]^{\frac{1}{\varepsilon}} \right|. \quad (22)$$

Используя приведенные уравнения, можно получить расчётные значения составляющих скорости потоков в любой точке рабочего (сепарационного) пространства ВАВЗПЦ.

Усовершенствованная модель расчёта структуры потоков в ВАВЗПЦ, базирующаяся на законе сохранения момента количества движения, изложена в работе [15], из которой следует, что наиболее объективной характерной скоростью потока в ВАВЗПЦ является скорость движения потока в проходной части выходного патрубка C_0 . Многочисленными опытами установлена неизменность скорости по сечению, то есть

$C_0 = \text{const}$, $\vartheta_\phi = C_0 r$. Тогда момент количества движения во внешнем потоке:

$$M_1(z) = \int_0^{r_*} \vartheta_{z1} 2\pi \cdot r dr \cdot \omega_1(z) r \cdot r = \\ = 2\pi r \vartheta_{z1} \omega_1(z) \int_0^{r_*} r^3 dr = 2\pi r \vartheta_{z1} \omega_1(z) \frac{r_*^4}{4}.$$

$$\text{При } z = H; \omega_1(z) = C_0; V_{z1} = \frac{L_1 + L_2}{\pi r_*^2} \frac{z}{H};$$

$$z = H; M_1(z) = M_{\text{вх}} = M_{\text{вых}}.$$

$$M_1(z = H) = \frac{\rho}{2} \frac{L_1 + L_2}{r_*^2} C_0 \frac{r_*^4}{4}; C_0 = \frac{M_{\text{вх}} \cdot r_*^2}{\rho(L_1 + L_2) \cdot r_*^4}. \quad (23)$$

Установленные зависимости для расчёта полей скоростей в ВАВЗПЦ сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными в [4]. Сравнение показало вполне допустимую точность осевой ($V_z=40\%$) и тангенциальной ($V_\phi=20\%$) составляющих скорости. Для радиальной составляющей точность мала ($V_r=65\%$), однако ввиду относительно малых абсолютных значений V_r , полученные уравнения могут быть использованы в инженерной практике при расчёте фракционной эффективности сепарации с определением эмпирических коэффициентов, а также при оценочном прогнозировании эффективности сепарации твёрдых частиц при разработке новых конструкций аппаратов, предназначенных для работы в качестве центробежных пылеуловителей.

5. Экспериментальные исследования

Следует отметить, что при конструктивной модернизации существующих моделей и, тем более, при разработке новых концептуальных решений ВАВЗПЦ, одного математического моделирования, как правило, недостаточно. Экспериментальная проверка инновационных технических решений позволяет не только осуществить комплексную проверку математической модели или выполнить её уточнение, но и получить такие данные, которые в принципе невозможно получить аналитическими методами исследований.

В результате экспериментальных исследований, проведенных как в лабораторных, так и в промышленных условиях, было установлено, что параметры и специфические характеристики технологического процесса, который предполагается проводить с помощью ВАВЗПЦ, играют решающую роль и, собственно, и определяют характер гидродинамики и концепцию конструктивного оформления технического устройства.

Так, например, при разработке пылеулавливающей системы для очистки запылённого воздуха от взвешенных частиц доломита, конструкция типовой модели пылеуловителя ВАВЗПЦ была трансформирована в пылеуловитель, представленный на рис. 2 - аппарат с винтовой сепарационной камерой и предварительной выгрузкой уловленной пыли. Такое конструктивное устройство обусловлено прежде всего тем, что в основу определяющих параметров, влияющих на выбор конструкции, были положены характеристики и свойства пыли, подлежащей осаждению. Эффективность

улавливания пылевого доломита в реальных производственных условиях была определена с помощью специальной малогабаритной мобильной установки ВАВЗПЦ-200 (с диаметром сепарационной камеры 200 мм). На стекольном производстве образующаяся в технологии пыль доломита отсасывалась одновременно из нескольких источников её образования, при этом потоки аэрозоля отличались как количеством, концентрацией в них частиц, дисперсным составом пыли, температурой, влажностью, так и уровнем пульсаций расходов запылённых потоков. Действующая установка обеспыливания состояла из нескольких типовых циклонов, установленных параллельно, которые не могли обеспечить требуемую эффективность очистки. Данные, полученные способом подключения мобильной установки к действующей системе аспирации, позволили экспериментальным путём отразить те реальные факторы процесса обеспыливания, которые невозможно учесть в аналитических формулах инженерной методики расчёта. Обработанные результаты позволили в виде корреляционных коэффициентов внести соответствующие изменения в расчётные формулы и разработать конструкцию пылеуловителя, обеспечивающую требуемые выходные параметры по эффективности сепарации и предельной концентрации выбросов за пределами пылеулавливающей установки. Для рассматриваемого примера предварительная разгрузка пыли в завихрителях и винтовая сепарационная камера с непрерывной выгрузкой уловленных частиц обеспечивали максимальное снижение концентрации пыли в рабочей зоне, что, как было установлено позже, и являлось основной причиной неудовлетворительной работы циклонов. Второй причиной низкой эффективности работы существующей пылеулавливающей установки явились значительные пульсации общего расхода запылённого потока, на которые не рассчитаны типовые циклоны. В результате применения ВАВЗПЦ в виде двухступенчатой установки (ВЗПЦ-400+ВЗПЦ150x6 по схеме последовательного соединения) проблема очистки потоков на линии подготовки доломита была решена.

Следует отметить, что использование мобильной установки, монтируемой непосредственно на месте реконструируемой или вновь проектируемой системы пылеулавливания, позволяет не только получать релевантные данные о технологическом процессе, сократить время, но и значительно снизить стоимость проектирования и изготовления аспирационных систем.

6. Конструктивное оформление многофункциональных ВАВЗПЦ

Как показала практика, при разработке конструкций ВАВЗПЦ для проведения с их помощью отличных от пылеулавливания процессов, основная нагрузка приходится на организацию и проведение экспериментальных исследований. При этом в первую очередь следует прибегать к ранжированию определяющих факторов и учитывать особенности того процесса, который предполагается реализовать с помощью ВАВЗПЦ.

В качестве примера рассмотрим вариант конструктивного оформления ВАВЗПЦ для работы в качестве

оборудования для получения твёрдой фазы из насыщенных растворов.

На рис. 4 показан вариант концепции сушилки на инертных телах.

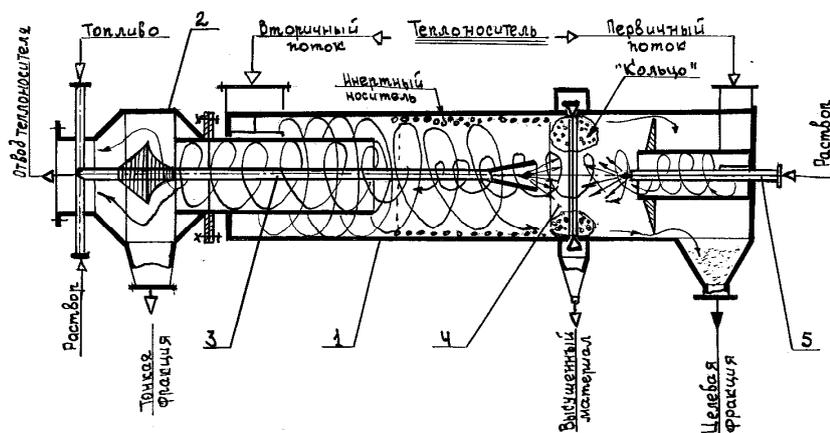


Рис. 4. Схема вихревой сушилки на инертных телах : 1 — рабочая камера; 2 — камера выгрузки тонкой фракции; 3, 5 — каналы подачи раствора; 4 — «кольцо» сухого материала

Пространственная ориентация – горизонтальное положение.

Гидродинамический режим работы – регулируемый режим «кольца».

Предварительно нагретый теплоноситель поступает в аппарат одновременно по первичному и вторичному каналам, при этом соотношение подаваемых потоков устанавливается с таким расчётом, чтобы в режиме «кольца» высушенный материал находился в месте, где предусмотрена кольцевая выгрузочная щель.

Исходный раствор подаётся в рабочую зону одновременно по каналам 3,5 на слой инертных тел. При взаимодействии встречно направленных и закрученных в одну сторону потоков теплоносителя образуется результирующий вихрь, который способствует формированию увлажнённого исходным раствором равномерно распределённого слоя инертных тел, вращающихся по кольцевым траекториям рабочей камеры.

При взаимодействии с теплоносителем происходит испарение влаги, высушивание продукта на поверхности инертных тел и сбрасывание сухого материала в виде чешуек или порошка в зону действия пристенного вторичного потока, который транспортирует его в направлении вращающегося «кольца», где он накапливается и через кольцевой зазор непрерывно сбрасывается в бункер. Отработанный теплоноситель с остатками тонкодисперсных частиц отводится через выходной патрубок, при этом часть пыли может осаждаться в камере 2 и в качестве тонкой фракции удаляться из аппарата.

При необходимости получения целевой фракции сухого продукта, с помощью изменения доли вторичного потока можно добиться сепарации таких частиц из «кольца» и выгрузки её за пределами отбойной шайбы.

Таким образом, рассмотренная конструкция аппарата для тепловой обработки растворов позволяет организовать процесс сушки с одновременной классификацией сухого продукта.

Следует отметить, что размеры рабочей зоны сушилки по длине могут при необходимости изменяться, регулируя таким образом как производительность аппарата, так и время пребывания материала в зоне тепловой обработки.

Температурный режим в разных зонах рабочего пространства также может быть управляемым, что достигается подачей исходного теплоносителя по входным каналам с различной температурой.

Конструктивное оформление ВАВЗПЦ, предназначенного для процесса получения многокомпонентных смесей из сыпучих материалов, особенно когда соотношение отдельных компонентов имеет значительную разницу, определяется лишь длиной входных каналов подачи первичного и вторичного потоков, а также порядком расположения мест подачи компонентов. При этом, место подачи того или иного компонента во входные каналы ВАВЗПЦ (в первичный или вторичный), а также

расстояние от завихрителя потока, рассчитываются исходя из степени дисперсности материала и его относительной доли в готовой смеси.

При правильном расчёте, в типовом ВАВЗПЦ, оборудованном системой загрузки исходных компонентов, возможно непрерывное получение высококачественных многокомпонентных смесей, которые невозможно получить иными известными способами, например в объёмных смесителях.

Типовая модель ВАВЗПЦ, при её соответствующей конструктивной адаптации, может быть использована для высокоэффективного разделения многокомпонентных смесей сыпучих материалов на фракции, при этом процесс получения фракций может быть организован как по периодической, так и по непрерывной схеме, а количество фракций и диапазон разброса частиц в каждой фракции практически не ограничивается. Сравнение качественных показателей с характеристиками пневматических классификаторов известной фирмы «Lagox» показали преимущества модели, разработанной на базе типовой модели ВАВЗПЦ.

Суть конструктивной адаптации типовой модели ВАВЗПЦ, предназначенной для работы в качестве классификатора, сводится к укомплектовке рабочей камеры аппарата специальной перфорированной вставкой, обеспечивающей равномерную и регулируемую подачу воздушного потока в зону образования вращающегося «кольца» смеси.

Поток воздуха сквозь перфорацию движется в радиальном направлении от стенки рабочей камеры к её оси и «вымывает» из взвешенного вращающегося слоя полидисперсной смеси только те частицы, для которых выполняется условие $F_c > F_{ц0}$, то есть, когда сила лобового сопротивления превышает центробежную силу, действующую на частицу во вращающемся потоке.

Изменяя расход радиального потока воздуха, регулируют скорость его входа в «кольцо» материала

и, следовательно, силу воздействия на удаляемую из смеси частицу.

Разделение на фракции в данном случае начинают с самых мелких частиц, постепенно увеличивая их медианный размер до максимального. Отсепарированная фракция удаляется с отходящим воздухом через выходной патрубок на любой разгрузитель, например рукавный фильтр, где полностью осаждаются, а обеднённая целевым компонентом смесь накапливается в бункере, откуда вновь может быть подана в аппарат для выделения следующей фракции.

В промышленной практике, в отличие от уже широко распространённых пылеуловителей, в единичных экземплярах, созданных на базе типовой модели ВАВЗПЦ, нашли применение сушилки, кондиционеры (увлажнители), смесители, грануляторы, классификаторы, абсорберы.

7. Выводы

В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований установлены основные режимы работы вихревых аппаратов со встречными закрученными потоками (с цилиндрической рабочей камерой), что позволяет значительно расширить сферу их функционального использования в технологии для проведения отличных от пылеулавливания физико-механических, тепловых, массообменных, а также совмещённых процессов. При этом выделены основные конструктивные элементы типовой модели ВАВЗПЦ, при целенаправленном изменении которых инновационная модель аппарата адаптируется к технологическим процессам, подлежащим реализации в условиях активной гидродинамики. Рассмотрены примеры концепций ВАВЗПЦ для ряда технологических процессов.

Литература

1. Ciliberti, D. F. Fine dust selection in a rotary blou cyclone [Текст] / D. F. Ciliberti, B. W. Lankaster // Chem. Eng. Sei. – 1976. – V.6. – P. 31.
2. Schaufler, E. Der Drehstromungsentstauber [Текст] / E.Schaufler, K.-H. Ochlich, K.-R. Schmidt // Staub. – 1963. – V. 23. – №4. – s. 228 – 230.
3. Klein, H. Entwicklung und Leistungsgrenzen der Drehstromungsentstaubers [Текст] / H. Klein // Staub Reinhaltung der Luft. – 1963. – V. 23. – №11. – s. 491-501.
4. Гудим, Л. И. Разработка, исследование и внедрение в промышленность первичной переработки текстильного сырья высокоэффективных систем очистки воздуха вихревыми пылеуловителями [Текст] : дис. ... докт. техн. наук / Л. И. Гудим. – М., 1992. – 403 с.
5. Гудим, Л. И. Очистка промышленных газов и воздуха от пыли [Текст] / М. : МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2010. – 116 с.
6. Сажин, Б. С. Вихревые пылеуловители [Текст] / Б. С. Сажин, Л. И. Гудим. – М. : МТИ, 1995. – 244 с.
7. Якуба, А. Р. Гидродинамика и эффективность пылеуловителей с закрученными потоками в процессах химической технологии красителей, пигментов и вспомогательных веществ [Текст] : дис. ... докт. техн. наук / А. Р. Якуба. – Сумы, 1996. – 378 с.
8. Галич, В. Н. Повышение эффективности центробежных пылеуловителей за счёт применения встречных закрученных потоков [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / В. Н. Галич. – М., 1984. – 165 с.
9. Кошовец, Н. В. Особенности гидродинамики вихревых аппаратов [Текст] / Н. В. Кошовец, Н. И. Азаров, А. Р. Якуба и др. : Комплексне використання сировини, енерго- та ресурсозберігаючі технології у виробництві неорганічних речовин. Збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси, 2004. – С. 88 – 89.
10. Галич, В. Н. Многофункциональные вихревые аппараты с активным гидродинамическим режимом [Текст] / В. Н. Галич, В. Е. Секачев. – М. : МИПК, 1991. – 44 с.
11. Галич, Р. В. Многофункциональные вихревые аппараты / Р. В. Галич, А. Р. Якуба : збірник тез доповідей науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених [“Технологія – 2004”],– (Северодонецьк, 15 – 16 квітня 2004 р.) / Северодонецьк : СТИ, 2004.– Частина 3. – С. 20 – 21.
12. Галич, Р. В. Поле швидкостей в апаратах із зустрічними закрученими потоками [Текст] / Р. В. Галич, О. Р. Якуба, В. М. Галич // Вісник Сумського національного аграрного університету. Науково-методичний журнал. Механізація та автоматизація виробничих процесів. Вип. 12. Суми: СНАУ. – 2004. – С. 16 – 20.
13. Пирумов, А. И. Обеспыливание воздуха [Текст] / А. И. Пирумов. М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
14. Сажин, Б. С. Моделирование гидродинамики аппарата со встречными закрученными потоками [Текст] / Б. С. Сажин, Б. П. Лукачевский, З. И. Джохадзе, В. Н. Галич / Водоснабжение и теплоснабжение. Сб. науч. трудов Грузинского политехнического института. Тбилиси. – 1984 – С. 132 – 137.
15. Якуба, О. Р. Удосконалення моделей розрахунку структури потоків апаратів із зустрічними закрученими потоками [Текст] / О. Р. Якуба, Р. В. Галич, О. М. Калашніков // Вісник Сумського національного аграрного університету. Науково-методичний журнал. Механізація та автоматизація виробничих процесів. Вип. 9 (15). Суми: СНАУ. – 2006. – С. 48 – 55.