

МЕХАНИКА MECHANICS

УДК 66.067.2

А. М. Волк, А. И. Вилькоцкий, С. В. Янович
Белорусский государственный технологический университет

ГАЗОЦЕНТРОБЕЖНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ КРУПНОДИСПЕРСНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Разработаны конструкции для газоцентрифужного разделения крупнодисперсных суспензий, которые позволяют в одном устройстве производить отделение жидкой фазы и сушку материала, обеспечить необходимую влажность твердого продукта крупнодисперсных суспензий, непрерывность процесса фильтрования мелкодисперсных суспензий, разделение кристаллизующихся суспензий. При этом достигается высокая производительность, экономичность в изготовлении, простота в эксплуатации.

Выполнены экспериментальные исследования основных стадий процесса разделения: проточно-пленочное сгущение суспензии и обезвоживание твердых частиц в потоке газа. Выявлена зависимость конечной влажности твердого продукта от геометрических параметров газоцентрифужных элементов, размеров частиц, нагрузок по фазам и их соотношения.

Выбор режима позволяет обеспечить необходимую конечную влажность твердого продукта крупнодисперсных суспензий, непрерывность процесса фильтрования мелкодисперсных суспензий, разделение кристаллизующихся суспензий.

Ключевые слова: разделение многофазных систем, суспензии, газоцентрифужные разделители, проточно-пленочное сгущение, геометрические параметры, нагрузки по фазам, влажность твердого продукта.

Для цитирования: Волк А. М., Вилькоцкий А. И., Янович С. В. Газоцентрифужное разделение крупнодисперсных суспензий // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2024. № 1 (278). С. 18–25.

DOI: 10.52065/2520-6141-2024-278-3.

A. M. Volk, A. I. Wilkocki, S. V. Yanovich
Belarusian State Technological University

GAS-CENTRIFUGAL SEPARATION OF LARGE-DISPERSE SUSPENSIONS

Designs for gas-centrifugal separation of large-dispersed suspensions are developed, which allow to separate liquid phase and drying of the material in one device, to provide necessary humidity of solid product of large-dispersed suspensions, continuity of filtering process of fine-dispersed suspensions, separation of crystallising suspensions. Thus high productivity, economy in manufacturing, simplicity in operation are reached.

Experimental studies of the main stages of the separation process: flow-film thickening of suspension and dewatering of solid particles in the gas flow have been carried out. The dependence of the final moisture content of the solid product on geometrical parameters of gas centrifugal elements, particle sizes, loads on phases and their ratio has been revealed.

The choice of the mode allows to provide the necessary final moisture content of the solid product of large-dispersed suspensions, continuity of the filtering process of fine-dispersed suspensions, separation of crystallising suspensions.

Keywords: separation of multiphase systems, suspensions, gas-centrifugal separators, flow-film thickening, geometrical parameters, phase loads, solid product humidity.

For citation: Volk A. M., Wilkotsky A. I. Yanovich S. V. Gas-centrifugal separation of large-disperse suspensions. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2024, no. 1 (278), pp. 18–25 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6141-2024-278-3.

Введение. Разделение многофазных систем является составной частью многих технологических процессов в химической, пищевой, нефтехимической, микробиологической, энергетической и других отраслях промышленности. Это отделение кристаллов солей от раствора, гранул полимеров от жидкой фазы, обезвоживание мелких фракций твердых материалов, улавливание жидких фракций в газожидкостных потоках, классификация материалов и т. д.

Важной технической задачей является разделение различного типа суспензий [1–5]. Разделяемые суспензии отличаются широким диапазоном концентрации твердой фазы, размером частиц (от 200 мкм до 5 мм), физическими свойствами.

Способ разделения фаз и оборудование для проведения процесса выбираются в зависимости от типа суспензии, условий, в которых данный процесс происходит, и требуемой степени разделения. Основными способами являются осаждение и фильтрование.

Гравитационное осаждение применяется для разделения фаз различной плотности, происходит в гравитационных отстойниках различных конструкций, при очистке сточных вод, при сгущении крупнодисперсных суспензий. При данном способе скорость процесса разделения определяется соотношением действующих на частицу дисперсной фазы сил тяжести, Архимеда и гидродинамического воздействия [1, 6, 7]. При высокой концентрации движение частиц имеет стесненный характер, и при их малых размерах или при небольшой разности плотностей жидкой и твердой фаз процесс разделения происходит медленно. Применяемое оборудование (резервуары, лотки, отстойники) отличается простотой, небольшими затратами на изготовление, но при больших объемах суспензии устройства занимают большие производственные площади. Кроме того, выгрузка осадка в аппаратах полунепрерывного действия представляет собой трудоемкую и довольно сложную задачу [8]. Поэтому гравитационное осаждение имеет ограниченное применение.

Более интенсивно процесс разделения фаз происходит в поле центробежных сил. Данный способ для осаждения из основного потока более тяжелых частиц реализуется в гидроциклонах [9–11]. Конструкции циклонов отличаются организацией ввода, размерами цилиндрической части и конической циклонной камеры, диаметром выхлопной трубы и выходного патрубка. Циклоны характеризуются высокой производительностью, простотой и легкостью обслуживания, относительно небольшими затратами на изготовление и эксплуатацию, отсутствием движущихся частей. Но они имеют большое гидравлическое сопротивление и чувствительны к изменению

скоростей потока [12]. Высокая влажность продукта на выходе и недостаточная степень разделения характеризуют работу гидроциклонов, поэтому они и применяются в основном для предварительного сгущения суспензий и их классификации.

Более высокая степень разделения фаз суспензии достигается с помощью центрифуг, благодаря центробежным силам которых значительно увеличивается движущая сила процесса и тем самым повышается скорость разделения неоднородных систем [5, 13].

Важной характеристикой центрифуг является фактор разделения, позволяющий сделать сравнение ускорений, действующих на частицу в центробежном и гравитационных полях:

$$K_p = V_\phi^2 / (rg),$$

где V_ϕ^2 / r – центробежное ускорение; g – ускорение силы тяжести.

Для разделения суспензий применяют нормальные центрифуги с фактором разделения $K_p < 3000$. Сверхцентрифуги с фактором разделения больше 3000 позволяют производить разделение на молекулярном уровне. Грубодисперсные суспензии разделяют в осадительных центрифугах. Твердый осадок после разделения в таких центрифугах имеет низкую влажность – в пределах 0,5–5,0% [13]. При небольших габаритах центрифуги обеспечивают высокую производительность. Недостатком осадительных и фильтрующих центрифуг является сложность выгрузки осадка. В устройствах периодического действия процесс центрифугирования прерывается при выгрузке осадка. Центрифуги с непрерывным удалением осадка инерционным способом, пульсирующим поршнем или шнеком сложны в устройстве, требуют более высоких энергетических затрат [13].

Широкое применение в промышленности имеет способ разделения суспензий с помощью фильтровальных проницаемых перегородок, которые являются важной частью фильтра любой конструкции – барабанного, ленточного, патронного и др. [14]. Твердые частицы, задерживаясь на перегородке, образуют влажный осадок. Эффективность процесса фильтрования определяется свойствами перегородки и образовавшегося осадка.

Повышение производительности требует увеличения перепада давления, что возможно только при достаточной механической прочности перегородки. Образование осадка и закупоривание ведет к повышению сопротивления, требует удаления осадка и регенерации проницаемой поверхности. Повышение производительности фильтров ведет к увеличению их

размеров, что усложняет изготовление и эксплуатацию фильтровального оборудования. Применяемые в промышленности фильтры громоздки по размерам, сложны в эксплуатации и характеризуются большими затратами энергии.

Основная часть. В области разделения суспензий актуальной задачей является повышение производительности, качества, надежности и долговечности применяемого оборудования.

Аппараты для разделения многокомпонентных систем. Избавиться от ряда недостатков серийного оборудования позволяют разработанные сотрудниками кафедр «Машины и аппараты химических и силикатных производств» и «Процессы и аппараты химических производств» Белорусского государственного технологического университета конструкции и способ разделения суспензий, классификации твердых материалов, сушки высоколажжных материалов, сепарации жидкости, массообмена и др. [15]. Газоцентрические разделители суспензии и центробежные сепараторы достаточно близки как по конструкции, так и по своему техническому назначению. Эффективное отделение жидкой фазы является основной задачей данных конструкций. Реализуемый в этих конструкциях способ позволяет использовать положительные эффекты проточного фильтрования и избавиться от отмеченных выше недостатков изменяемого оборудования.

Основной частью созданных конструкций является фильтровальный элемент, внутрь которого подаются закрученный газовый поток и разделяемая суспензия (рис. 1). Возникающие при этом центробежные силы способствуют процессу разделения. Фильтровальная перегородка задерживает твердые частицы, пропуская жидкость и газ. Особенностью процесса является то, что твердые частицы находятся в непрерывном движении относительно фильтровального элемента, а это препятствует отложению осадка или полностью предотвращает его. При этом имеется возможность изменять режим работы устройств с целью выбора оптимальных технологических параметров процесса разделения фаз.

Данный способ может использоваться для разделения суспензий и газожидкостных потоков, классификации твердых материалов в газовом или жидкостном потоке, сухой очистки газов от частиц пыли. Фильтровальная поверхность может быть различной формы: цилиндрической, конической, спиралеобразной. Сужение проницаемых элементов позволяет сохранять интенсивность движущегося потока.

Рассмотрим способ разделения суспензий в цилиндрическом газоцентрическом фильтре. Устройство для осуществления данного способа (рис. 1) состоит из цилиндрического элемента 1,

помещенного в корпус 2. Сверху корпус закрыт съемной крышкой 3. В крышке находится конический карман 4 с патрубком подачи воздуха 5 и штуцером подачи суспензии 6. Нижняя крышка 7 имеет патрубок 8 для отвода жидкой фазы в разгрузочное отверстие 9. Газовый поток закручивается с помощью лопаточного завихрителя 10.

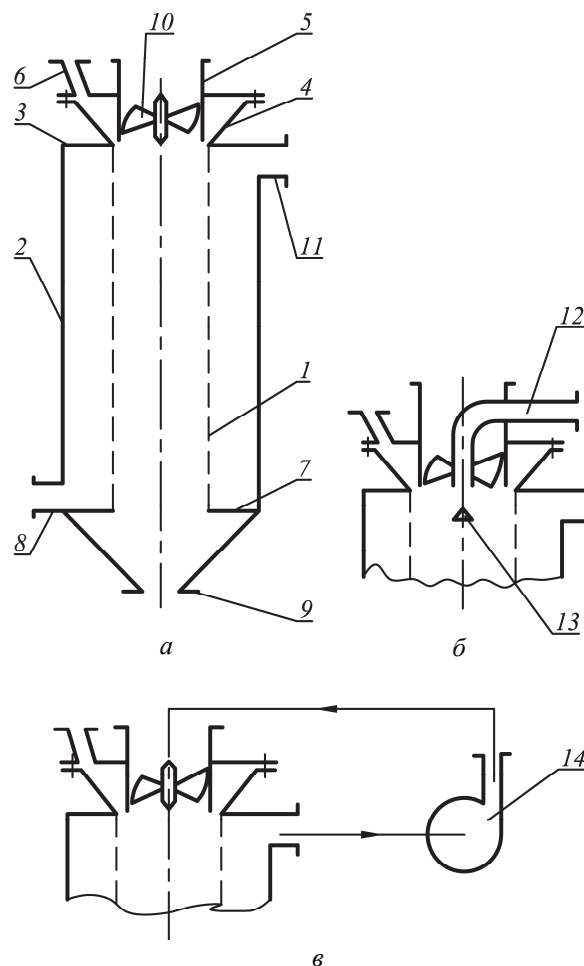


Рис. 1. Газоцентрические фильтры: а – с пленочным вводом суспензии; б – с центробежным вводом суспензии; в – с замкнутым циклом по воздуху; 1 – проницаемый элемент; 2 – корпус; 3 – верхняя крышка; 4 – конический карман; 5 – патрубок подачи воздуха; 6 – штуцер подачи суспензии; 7 – нижняя крышка; 8 – патрубок отвода жидкой фазы; 9 – разгрузочное отверстие; 10 – лопаточный завихритель; 11 – патрубок отвода воздуха; 12 – питательная труба; 13 – конический отбойник; 14 – вентилятор

Суспензия через кольцевой зазор между карманом и газоподводящим патрубком подается пленкой на цилиндрический проницаемый элемент и под воздействием газового потока движется по спиральным траекториям (рис. 1, а). Избыточное давление на стенке, создаваемое центробежными силами в пленке и газовым потоком, вызывает принудительное движение

жидкой фазы через отверстия фильтровальной поверхности. Жидкость и воздух из корпуса аппарата отводятся через патрубки 8 и 11 соответственно.

После отвода основной массы жидкости влажные частицы движутся вдоль фильтровальной поверхности под воздействием газового потока по спиральным траекториям, достигают нижней части элемента и удаляются из аппарата. При контакте частиц с проницаемым элементом и взаимодействии с газом происходит удаление влаги с их поверхности.

Важное значение для эффективной работы аппарата имеет движение суспензии на начальном участке, где происходит закрутка пленки. Одной из основных характеристик, определяющих данный процесс, является начальная толщина пленки, которая зависит от зазора между корпусом и питательным карманом. При достаточно малой величине зазора жидкая фаза равномерно распределяется по периметру цилиндрического элемента.

При наличии крупных частиц целесообразно изменить способ подачи суспензии. Устройство с осевой подачей суспензии и диспергированием жидкой фазы имеет конструктивные отличия лишь в верхней части (рис. 1, б). Суспензия подается через питательную трубу 12 в область за завихрителем на конический отбойник 13. Отбойник способствует дроблению жидкой фазы и препятствует попаданию жидкости в область пониженного давления вблизи оси цилиндра. Жидкая фаза сепаруется под воздействием центробежных сил на фильтровальную поверхность, где формируется вращательно-поступательное пленочное течение и происходит фильтрование жидкости.

В устройстве, представленном на рис. 1, в, воздух вентилятором 14 отводится из аппарата и подается снова на завихритель. В результате создается дополнительная движущая сила процесса разделения.

Анализ литературных источников теоретических исследований выявил сложность процесса разделения суспензий, происходящего с помощью закрученного газового потока. Для дополнения и проверки созданных моделей были выполнены экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования процесса проточного разделения суспензий в перфорированном элементе. Основной целью является минимизация влажности продукта при устойчивом протекании процесса разделения. При этом должна быть обеспечена достаточно высокая производительность.

Выявление и исследование основных факторов на экспериментальной установке (рис. 2) позволяет выбрать оптимальные конструктивные параметры аппарата и режимы его работы.

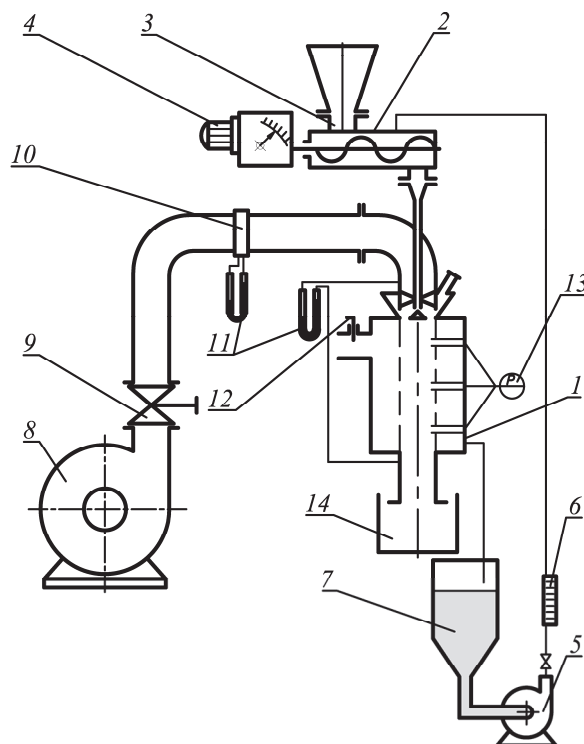


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования газоцентрифужного разделения суспензии:

- 1 – опытный фильтр; 2 – шнековый питатель;
- 3 – бункер; 4 – вариатор; 5 – насос; 6 – ротаметр;
- 7 – емкость для фильтрата; 8 – вентилятор;
- 9 – вентиль; 10 – диафрагма; 11 – дифманометр;
- 12 – заслонка; 13 – датчики давления;
- 14 – емкость для осадка

Основной частью опытной установки является газоцентрифужный разделитель с фильтровальной цилиндрическим элементом и лопастным завихрителем. Твердая и жидкая фазы подавались раздельным способом в шнековый питатель 2, приводимый в движение электрическим мотором. Твердые частицы засыпались в бункер 3, и их расход регулировался вариатором 4. Вода подавалась насосом 5, ее количество замерялось ротаметром 6. В установке подача воды организована по замкнутому циклу. Для сбора фильтрата предусмотрена емкость 7. Подача суспензии была организована различными способами: в поток перед завихрителем, в область после завихрителя и кольцевой пленкой. Раздельная подача фаз позволяет регулировать их соотношение: Ж : Т. Расход газа, подаваемого вентилятором 8, регулировался вентилем 9 и измерялся с помощью диафрагмы 10 и дифманометра 11.

Подача воздуха через проницаемый элемент регулировалась заслонкой 12. Датчики давления 13 предусмотрены для измерения профиля скорости газа и перепада давления на стенке проницаемого

элемента. Емкость 14 служит для сбора обезвоженного продукта.

Первоочередной задачей проводимого эксперимента были исследование и подбор проницаемых элементов, определение допустимых нагрузок по разделяемым фазам, выявление доминирующих факторов, влияющих на конечную влажность твердого продукта.

Испытания проводились с гранулами полистирола размером 2–4 мм, плотностью 1000–1050 кг/м³, полиэтилена плотностью 930–970 кг/м³, размером 1,5–3,0 мм, фракцией песка размером 2–3 мм, плотностью 1500 кг/м³. Жидкой фазой служила вода плотностью 1000 кг/м³. Гранулы полиэтилена имели цилиндрическую форму одинакового диаметра высотой 2–4 мм. Форма частиц полистирола – сферическая.

Измерения проводились в соответствии с методикой и рекомендациями работы [16].

На экспериментальной установке исследовались цилиндрические проницаемые элементы диаметром 0,15 м и длиной 1 м:

- а) металлокерамика пористостью 27%, толщиной 1 мм;
- б) стальной перфорированный лист с размерами отверстий 0,75 мм, площадью отверстий 8%.
- в) фильтровальные сетки с относительной площадью косых, невидимых на свету отверстий 16 и 21%;
- г) сетки для классификации сыпучих материалов с площадью отверстий 36 и 48%.

Нагрузка суспензии на фильтровальный элемент изменялась в пределах 0,5–4,0 м³/ч. Отношение фаз Ж : Т было различным, от 5 : 1 до 1 : 1.

В исследуемом проницаемом элементе могут быть выделены два основных этапа:

- 1) пленочное течение жидкости и ее фильтрование через проницаемую перегородку;
- 2) удаление влаги с поверхности частицы после отвода основной массы жидкости.

Первый этап позволяет увеличить давление или брать элемент с высокой проницаемостью.

Эффективность удаления поверхностной влаги зависит от времени и интенсивности взаимодействия частицы с газовым потоком.

Испытания выбранных проницаемых элементов показали, что отвод жидкой фазы в довольно широком диапазоне нагрузок происходит на небольшом участке длиной порядка в один диаметр.

Конечная влажность твердой фазы зависела от количества газа, прошедшего через проницаемый элемент.

В сетках с большой площадью отверстий на небольших участках наблюдался отвод основной массы газа. Вследствие недостаточности времени взаимодействия твердой и газовой фаз

на выходе получали продукт высокой влажности.

В этой связи сетки с площадью отверстий 36 и 48% оказались непригодными. Испытания перфорированного листа с площадью отверстий 8% показали, что элементы малой проницаемости не обеспечивают достаточно эффективного разделения вследствие того, что через них проходит относительно малая часть газового потока.

Требуемым условиям удовлетворяют металлокерамика с площадью отверстий 27% и фильтровальные сетки с площадью отверстий 16 и 21%.

Предъявляемым требованиям соответствует фильтровальная сетка проницаемостью 16%. К тому же ее стоимость более низкая по сравнению с другими проницаемыми материалами.

Дальнейшие испытания проводились с целью выбора оптимальных геометрических параметров конструкции. Нагрузка по суспензии составляла 1000 кг/ч при соотношении фаз Т : Ж = 1 : 2

Давление в аппарате, соотношение касательной и осевой составляющих скорости, крутка газового потока зависят от параметров завихрителя. В исследуемой установке завихрение потока происходило лопаточными завихрителями. Плоские лопатки имели сужающую к центру форму и были наклонены под одинаковым углом к плоскости перпендикулярного оси сечения. Исследование зависимости влажности при разных соотношениях подаваемых фаз показали, что оптимальный угол находится в пределах 30–40° (рис. 3). Повышение влажности при уменьшении угла может быть объяснено увеличением размера зоны обратных токов, увеличением уноса жидкости с газовым потоком и коагуляцией жидкости на поверхности частиц твердой фазы. При угле наклона, превышающем 40°, степень закрутки потока уменьшается и сокращается время интенсивного взаимодействия частиц с газовым потоком, что ведет к увеличению влажности.

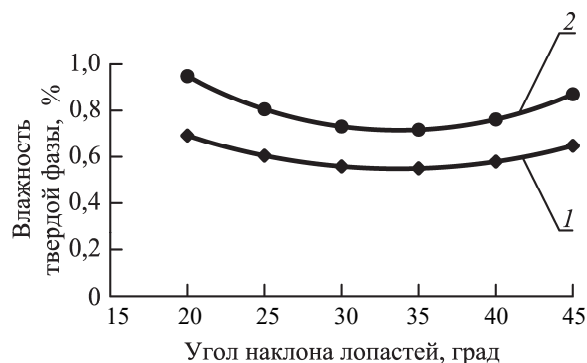


Рис. 3. Зависимость влажности твердой фазы от угла наклона лопастей завихрителя:
Суспензия: 1 – полистирол – вода;
2 – полиэтилен – вода

В дальнейшем угол наклона лопастей завихрителя составлял 35°.

Были проведены исследования с элементами различной длины при среднерасходной скорости газового потока 20 м/с и соотношении фаз Ж : Т = 2 : 1. В пределах до $L/D = 6$ наблюдалось быстрое уменьшение влажности при увеличении длины (рис. 4). Изменение длины в пределах $L/D = 6-10$ уменьшает влажность, но незначительно. Дальнейшее увеличение длины не оказывает существенного влияния на влажность.

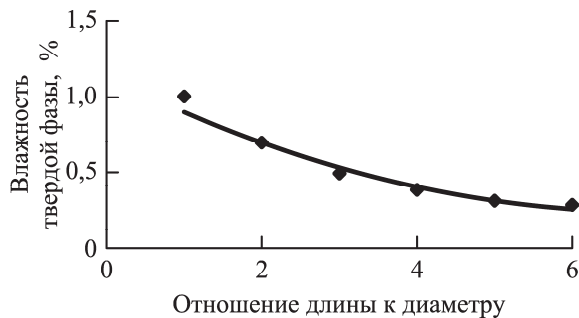


Рис. 4. Зависимость влажности твердой фазы от длины проникаемого элемента: суспензия: полиэтилен – вода

Впоследствии исследование проводилось с проникаемыми элементами диаметром 0,15 м, длиной 1 м при нагрузке по суспензии 1000 кг/ч.

Изменение соотношения фаз не оказывает существенного влияния на конечную влажность твердого продукта (рис. 5).

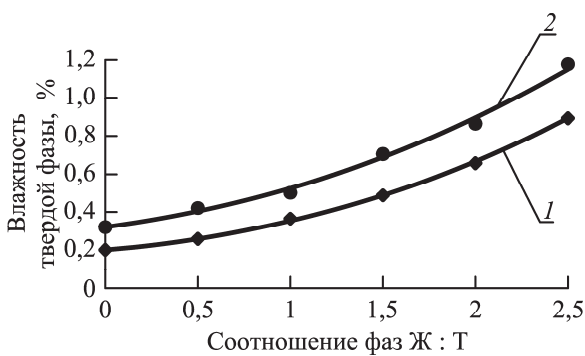


Рис. 5. Зависимость влажности твердой фазы от соотношения фаз: Суспензия: 1 – полистирол – вода; 2 – полиэтилен – вода

Гидродинамика процесса разделения в значительной степени зависит от конструкции завихрителя и скорости газового потока.

Исследование зависимости влажности твердого продукта от среднерасходной скорости газового потока при начальном соотношении фаз Ж : Т = 2 : 1 показало, что оптимальной является скорость 18–20 м/с (рис. 6).

Данная закономерность верна для различных суспензий, отличающихся как физическими свойствами, так и размерами частиц твердой фазы.

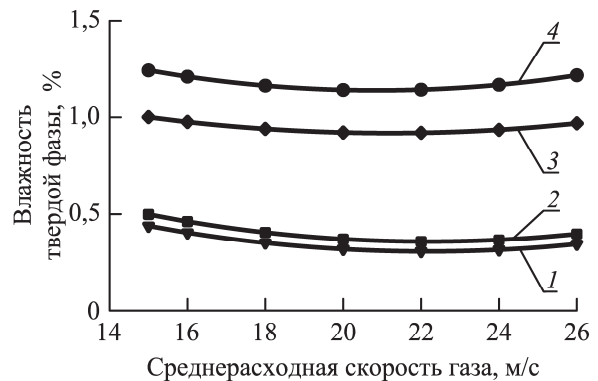


Рис. 6. Влияние скорости газа на влажность твердой фазы: Суспензия: 1 – полистирол (1,53 мм) – вода; 2 – полиэтилен (2–4 мм) – вода; 3 – сульфат аммония (0,5–5,0 мм) – вода; 4 – песок (2–4 мм) – вода

Размеры частиц твердой фазы в значительной степени определяют конечную влажность. При гидродинамических способах удаления поверхностной влаги (ударе о сетку, продувке воздухом) на поверхности частиц всегда остается некоторое количество жидкости, зависящее от свойств смачиваемости твердого материала. Для исследуемых суспензий наблюдалось увеличение влажности с уменьшением размера частиц (рис. 7). Данная закономерность может быть объяснена только увеличением общей площади поверхности совокупности твердых частиц.

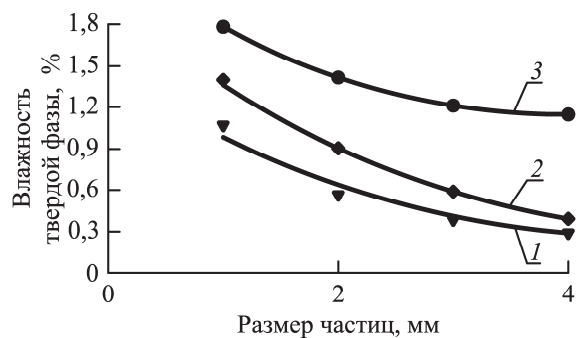


Рис. 7. Зависимость влажности твердой фазы от размера частиц: Суспензия: 1 – полистирол – вода; 2 – полиэтилен – вода; 3 – песок – вода

Заключение. Применение разработанных газодобрососредняющих конструкций позволяет достичь высокой эффективности процесса разделения крупнодисперсных суспензий и получить на выходе твердый продукт более низкой влажности, чем при использовании известных в промышленности конструкций фильтров и центрифуг.

Высокая производительность достигается при равномерном распределении пленки по фильтровальной поверхности. После удаления основной массы жидкой фазы твердые частицы совершают сложное движение по спиральным траекториям, вращаются с высокой скоростью вокруг своей оси, периодически контактируют с фильтровальной поверхностью.

Выполненные исследования позволили определить оптимальные конструктивные характеристики: угол 35° для наклона лопастей завихрителя, площадь отверстий сетки 15–27%, длина проницаемого элемента $L/D = 6-7$.

Способ подачи суспензии в аппарат не влияет на конечную влажность. Лишь подача суспензии в область перед завихрителем незначительно, на 0,04%, уменьшает влажность, но при этом намного увеличивается гидравлическое сопротивление аппарата. Подача суспензии в центр несколько увеличивает влажность по сравнению с подачей пленкой. Но данный способ позволяет более равномерно орошать поверхность на начальном участке и получить более высокую производительность.

Гидродинамика процесса разделения в значительной степени зависит от конструкции завихрителя и скорости газового потока.

Исследование зависимости влажности твердого продукта от среднерасходной скорости газа

показало, что оптимальной является скорость 18–20 м/с.

Размеры частиц твердой фазы в значительной степени определяют конечную влажность. При гидродинамических способах удаления поверхностной влаги (ударе о сетку, продувке воздухом) на поверхности частиц всегда остается некоторое количество жидкости, зависящее от свойств смачиваемости твердого материала.

Удаление влаги с поверхности твердых частиц на заключительном этапе процесса разделения суспензии в газоцентрибежных элементах происходит при воздействии многих факторов: обдува частиц потоком газа, центробежных сил, возникающих при вращении частицы, контакте частицы с поверхностью. Данные факторы взаимно связаны между собой и позволяют достичь глубокого обезвоживания твердой фазы.

Исследования выявили, что глубокое обезвоживание твердого продукта достигается при фильтровании жидкости на небольшом начальном участке фильтра, при эффективном осаждении жидких частиц на стенку элемента, при активном взаимодействии газового потока и движущихся твердых частиц. Основное влияние при этом оказывает расход суспензии. Для увеличения производительности твердой фазы необходимо предварительное сгущение суспензии.

Список литературы

1. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: в 2 кн. М.: Химия, 1981. Кн. 1. 384 с. (Серия «Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии»).
2. Фортъе А. Механика суспензий. М.: Мир, 1971. 264 с.
3. Переработка природных солей и рассолов: справочник / И. Д. Соколов [и др.]. Л.: Химия, 1985. 208 с.
4. Кутепов А. М., Полянин А. Д. Химическая гидродинамика. М.: Квантум, 1996. 336 с.
5. Соколов В. И. Центрифугирование. М.: Химия, 1976. 407 с.
6. Медников Е. М. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1981. 176 с.
7. Шрайбер А. А., Милютин В. Н., Яценко В. П. Гидродинамика двухкомпонентных потоков с твердым полидисперсным веществом. Киев: Наук. думка, 1980. 249 с.
8. Бемфорд А. В. Промышленная кристаллизация. М.: Химия, 1968. 326 с.
9. Найденко В. В. Применение математических методов и ЭВМ для оптимизации и управления процессами разделения суспензий в гидроциклонах. Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1976. 287 с.
10. Гупта А. Закрученные потоки. М.: Мир, 1988. 588 с.
11. Поваров А. И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М.: Недра, 1978. 266 с.
12. Троянкин Ю. В., Балувев Е. Д. Аэродинамическое сопротивление и совершенство циклонной камеры // Теплоэнергетика. 1969. № 6. С. 29–32.
13. Шкоропад Д. Е., Новиков О. П. Центрифуги и сепараторы для химических производств. М.: Химия, 1987. 256 с.
14. Жужиков В. А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. М.: Химия, 1980. 400 с.
15. Левданский Э. И., Левданский А. Э. Высокоэффективные проточные процессы и аппараты. Минск: БГТУ, 2001. 234 с.
16. Левданский Э. И., Волк А. М. Сгущение крупнодисперсных суспензий газовым потоком в перфорированном канале. М., 1987. 15 с. Деп. в ЦИНТИхимнефтемаш, № 1702.

References

1. Gel'perin N. I. *Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii: v 2 knigakh* [The main processes and apparatuses of chemical technology: in 2 books]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. Book 1. 384 p. (Series "Processes and Apparatuses of Chemical and Petrochemical Technology") (In Russian).
2. Fortier A. *Mekhanika suspenziy* [Mechanics of Suspensions]. Moscow, Mir Publ., 1971. 264 p. (In Russian).
3. Sokolov I. D., Muravyev A. V., Safirygin Yu. S., Seballo V. A. *Pererabotka prirodnykh soley i rassolov: spravochnik* [Processing of natural salts and brines: Reference book]. Leningrad, Khimiya Publ., 1985. 208 p. (In Russian).
4. Kutepov A. M., Polyenin A. D. *Khimicheskaya gidrodinamika* [Chemical hydrodynamics]. Moscow, Quantum Publ., 1996. 336 p. (In Russian).
5. Sokolov V. I. *Tsentrifugirovaniye* [Centrifugation]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 407 p. (In Russian).
6. Mednikov E. M. *Turbulentnyy perenos i osazhdeniye aerorozley* [Turbulent transport and deposition of aerosols]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 176 p. (In Russian).
7. Shrayber A. A., Milyutin V. N., Yatsenko V. P. *Gidrodinamika dvukhkomponentnykh potokov s tverdym polidispersnym veshchestvom* [Hydrodynamics of two-component flows with solid polydisperse matter]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1980. 249 p. (In Russian).
8. Bamford A. W. *Promyshlennaya kristallizatsiya* [Industrial crystallization]. Moscow, Khimiya Publ., 1968. 326 p. (In Russian).
9. Naidenko V. V. *Primeneniye matematicheskikh metodov i EVM dlya optimizatsii i upravleniya protsessami razdeleniya suspenziy v gidrotsiklonah* [Application of mathematical methods and computers for optimisation and control of suspension separation processes in hydrocyclones]. Gorky, Volgo-Vyatskoye knizhnoye izdatel'stvo Publ., 1976. 287 p. (In Russian).
10. Gupta A., Lilly D., Sayred N. *Zakruchennyye potoki* [Swirling Flows]. Moscow, Mir Publ., 1988. 588 p. (In Russian).
11. Povarov A. I. *Gidrotsiklony na obogatitel'nykh fabrikakh* [Hydrocyclones at enrichment plants]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 266 p. (In Russian).
12. Troyankin Yu. V., Baluev E. D. Aerodynamic resistance and perfection of a cyclone chamber. *Teploenergetika* [Teploenergetika], 1969, no. 6, pp. 29–32. (In Russian).
13. Shkoropad D. E., Novikov O. P. *Tsentrifugi i separatory dlya khimicheskikh proizvodstv* [Centrifuges and separators for chemical production]. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 256 p. (In Russian).
14. Zhuzhikov V. A. *Fil'trovaniye. Teoriya i praktika razdeleniya suspenziy* [Filtration. Theory and practice of suspension separation]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 400 p. (In Russian).
15. Levdansky E. I., Levdansky A. E. *Vysokoeffektivnyye protochnyye protsessy i apparaty* [Highly efficient flow processes and apparatuses]. Minsk, BGTU Publ., 2001. 234 p. (In Russian).
16. Levdansky E. I., Volk A. M. Thickening of large-dispersed suspensions by gas flow in a perforated channel. Moscow, 1987. 15 p. *Dep. v TsINTIkhimneftemash* [Deposited in Central Institute of Scientific and Technical Information and Technical and Economic Research on Chemical and Petroleum Engineering], no. 1702.

Информация об авторах

Волк Анатолий Матвеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: volk@belstu.by

Вилькоцкий Андрей Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: andrzej.wilkocki@belstu.by

Янович Сергей Владимирович – старший преподаватель кафедры высшей математики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: yanovichs@belstu.by

Information about the authors

Volk Anatoliy Matveevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Higher Mathematics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volk@belstu.by

Wilkocki Andrzej Ivanovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andrzej.wilkocki@belstu.by

Yanovich Siarhei Vladimirovich – Senior Lecturer, the Department of Higher Mathematics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yanovichs@belstu.by

Поступила после доработки 16.02.2024