

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОДВИЖНОЙ НАСАДКИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ АБСОРБЕРАХ С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ БИЛЬЯРДОВ

Беккер В. Ф.

к. т. н., профессор кафедры автоматизации технологических процессов
Березниковского филиала Пермского национального
исследовательского политехнического университета,
bekker@bf.pstu.ru

Аннотация. Представлены математическая и численная модели и разработанный на их основе способ интенсификации процесса абсорбции, позволяющий улучшить перемешивание и эффективность теплообмена на примере мокрой очистки абгазов от пылевых фракций в производстве хлорида калия и промышленной очистки газов от диоксида серы в производстве бисульфитной небеленой целлюлозы, позволяющие существенно увеличить степень очистки газовых потоков

Ключевые слова: абсорбер, моделирование, степень очистки.

DYNAMIC INTERACTION OF INDUSTRIAL ABSORBER MOBILE NOZZLE BY BILLIARD THEORY

Bekker V. F.

Candidate of Technical Sciences, professor of chair of automation of technological processes
of the Berezniki branch of the Perm national research polytechnical university

Annotation. A mathematical and numerical models of absorption are presented. A method of intensification of absorption based on these models is designed to improve mixing and heat exchange efficiency. An example of wet scrubbing of exhaust gases in production of potassium chloride and industrial cleaning gases from sulfur dioxide in the production of unbleached pulp bisulfite is given to illustrate a significant grow of cleaning degree.

Keywords: absorption, modeling, cleaning degree.

В абсорберах с подвижной насадкой эффективность улавливания газообразных компонентов существенно зависит от степени развития поверхности контакта фаз. Решающую роль в создании развитой поверхности играют режимно-технологические факторы, а так же свойства насадочных тел и характер их движения в псевдооживленном слое [1]. Управление формой, массой, количеством насадочных тел позволяет обеспечивать режимы их движения и циркуляции в объеме абсорбера, отвечающие наиболее интенсивному диспергированию жидкой и газовой фаз и как следствие более интенсивному их взаимодействию [2]. Для изучения механизмов воздействия на элементы насадки с целью усиления их взаимодействия необходима разработка динамических моделей, позволяющих моделировать поведение насадки в широком диапазоне конструктивных и режимных параметров.

Одним из количественных и одновременно энергетических показателей интенсивности взаимодействия насадочных тел может служить число вероятных столкновений между ними. Использование некоторых положений теории бильярдov Синая позволило разработать динамическую модель, которая дает возможность оценивать количество столкновений между упругими сферическими насадочными телами при их движении в объеме аппарата [2]. Так для шаров, расположенных на прямой, число столкновений определилось как

$$N(m_1, m_2, \dots, m_n) \leq 2 \cdot \left(16 \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_i} \right) \cdot \sqrt{M_2 \cdot M - M_1^2} \right)^{n-1},$$

где $m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n$ – масса насадочных тел;

$M = \sum_{i=1}^n m_i$ – суммарная масса всех шаров;

$$M_1 = \sum_{i=1}^n i \cdot m_i \text{ и } M_2 = \sum_{i=1}^n i^2 \cdot m_i - \text{первый и второй}$$

моменты соответственно.

В одномерном «сосуде» столкновений между сферическими насадочными телами произойдет не более чем

$$N(t) \leq \left(\left[\frac{t}{\Delta t} \right] + 1 \right) \cdot N_{3n} \leq N_{3n} \cdot \sqrt{\frac{m_{\min}}{2 \cdot E}} + N_{3n} = c_1 \cdot t + c_2,$$

где m_{\min} – минимальная масса шара;

t – рассматриваемый промежуток времени;

E – кинетическая энергия всей системы насадочных тел;

N_{3n} – число столкновений за время Δt ;

c_1 и c_2 – константы, величина которых не зависит от начального положения и скорости насадочных тел, но зависит исключительно от массы шаров и полной энергии системы.

Полученная динамическая модель и выражения для определения числа столкновений насадочных

тел были использованы для проведения вычислительного эксперимента по исследованию динамики псевдооживленного слоя шаровой насадки с помощью MathCAD-программы. В частности, был рассмотрен случай распределения массы по элементам насадки для системы, общая масса всех элементов в которой составляла $M = 6$ кг в интервале количества насадочных тел $n = (100 \div 1700)$ шт., а скорости варьировались в диапазоне $v = 1 \div 6$ м/с. Закон распределения массы и скорости – линейный.

Эксперимент позволил установить зависимости: числа столкновений элементов насадки, общего импульса системы, суммарной кинетической энергии, максимального импульса от количества элементов насадки в объеме абсорбера.

Представленная на рис. 1 зависимость числа столкновений элементов насадки от ее количества демонстрирует экспоненциальный рост числа столкновений между шарами с увеличением числа элемен-

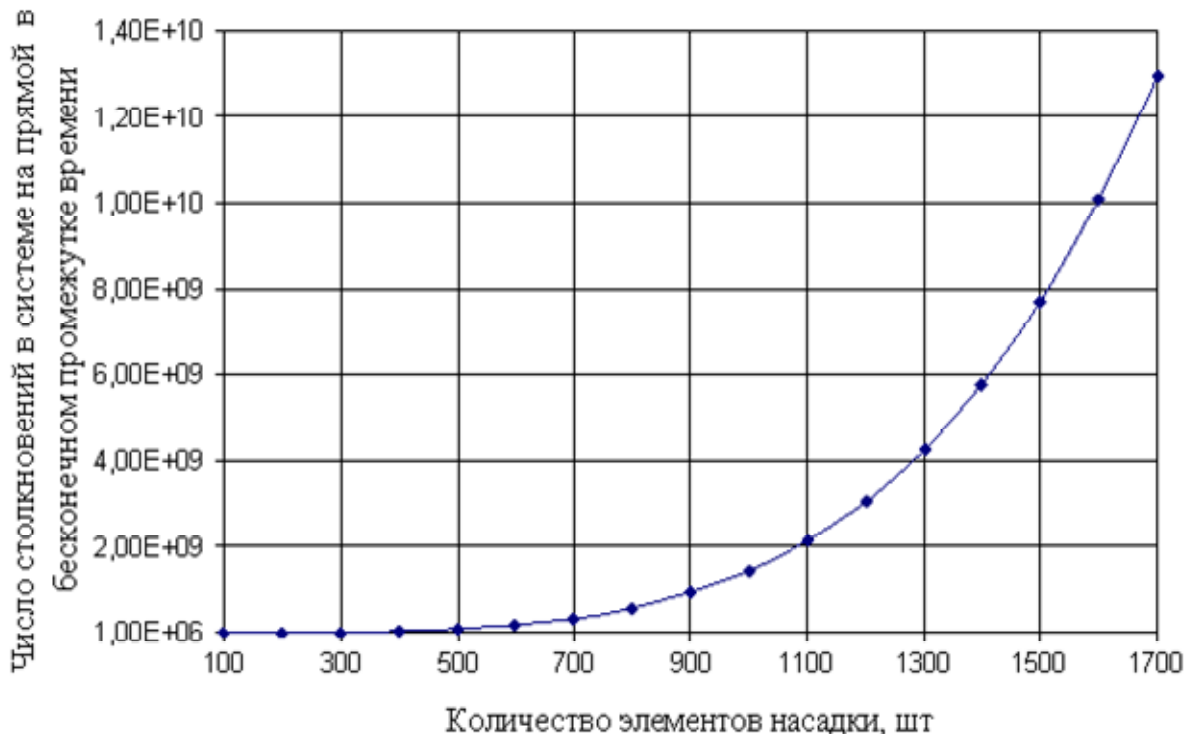


Рис. 1. Зависимость числа столкновений элементов сферической насадки от количества ее элементов

тов системы. Распределение кинетической энергии системы насадочных тел от их количества представлена на рис. 2.

Для условий первого счетного эксперимента было исследовано влияние способа распределения

шению условий диспергирования взаимодействующих фаз. В совокупности это обеспечивает усиление перемешивающего эффекта движения насадки на взаимодействие фаз, а, следовательно, ведет к интенсификации процессов тепломассообмена.

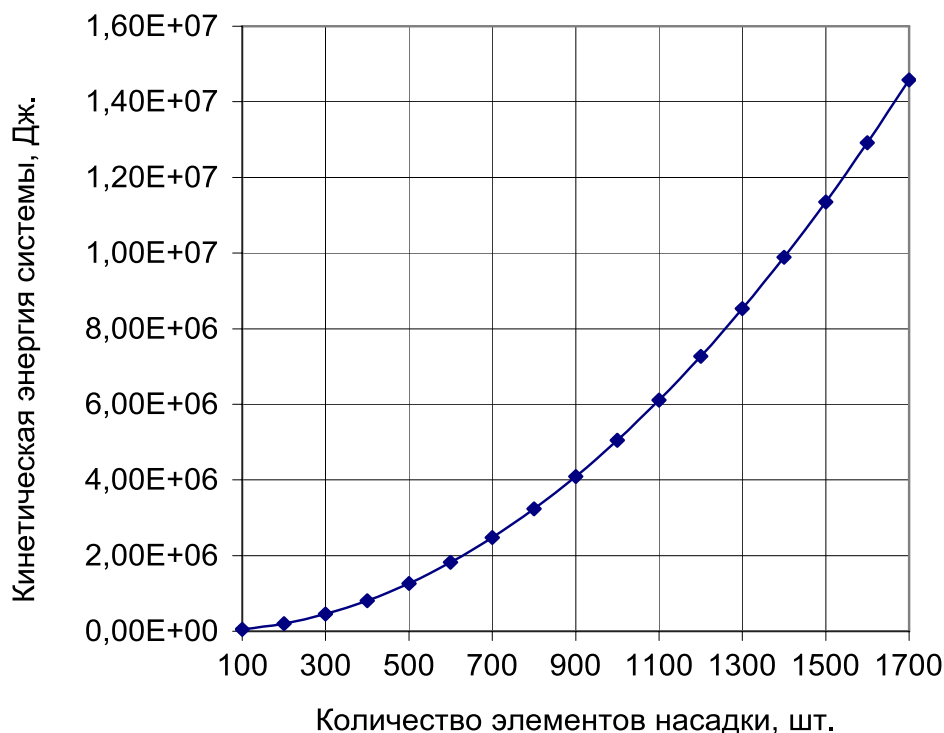


Рис. 2. Зависимость кинетической энергии системы от количества элементов насадки

массы по элементам насадки. Полученные результаты демонстрируют преимущества квадратичного распределения массы. В сравнении с линейным распределением массы насадочных тел, при квадратичном распределении более чем в два раза увеличилось количество столкновений между элементами насадки, более чем в два раза выросла кинетическая энергия системы, максимальный импульс системы увеличился в 1,5 раз (рис. 3).

Проведенные исследования показали, что с помощью инструмента выбора массы и количества насадочных элементов можно повысить активность элементов насадки в псевдооживленном слое за счет роста числа столкновений между ними. Более активное ударное взаимодействие насадочных тел, циркулирующих в объеме абсорбера, способствует улуч-

Рассмотрим промышленные приложения, в которых интенсификация массообмена достигается простой заменой элементов подвижной насадки не предлагаемые – более активные.

Итак, отмывка абгазов сушки хлорида калия в абсорберах с вращающейся подвижной насадкой. Актуальность проблемы определяется возрастающими объемами производства калийных удобрений, которое в Верхнекамье достигло 11,6 млн. т. Такой объем выпуска влечет за собой увеличение нагрузки на окружающую среду. Особенно чувствительны к загрязнению воздуха хвойные деревья, которые полностью исчезли в промышленной зоне вокруг калийных предприятий.

Основными промышленными выбросами в атмосферу являются отработанные в отделении сушки

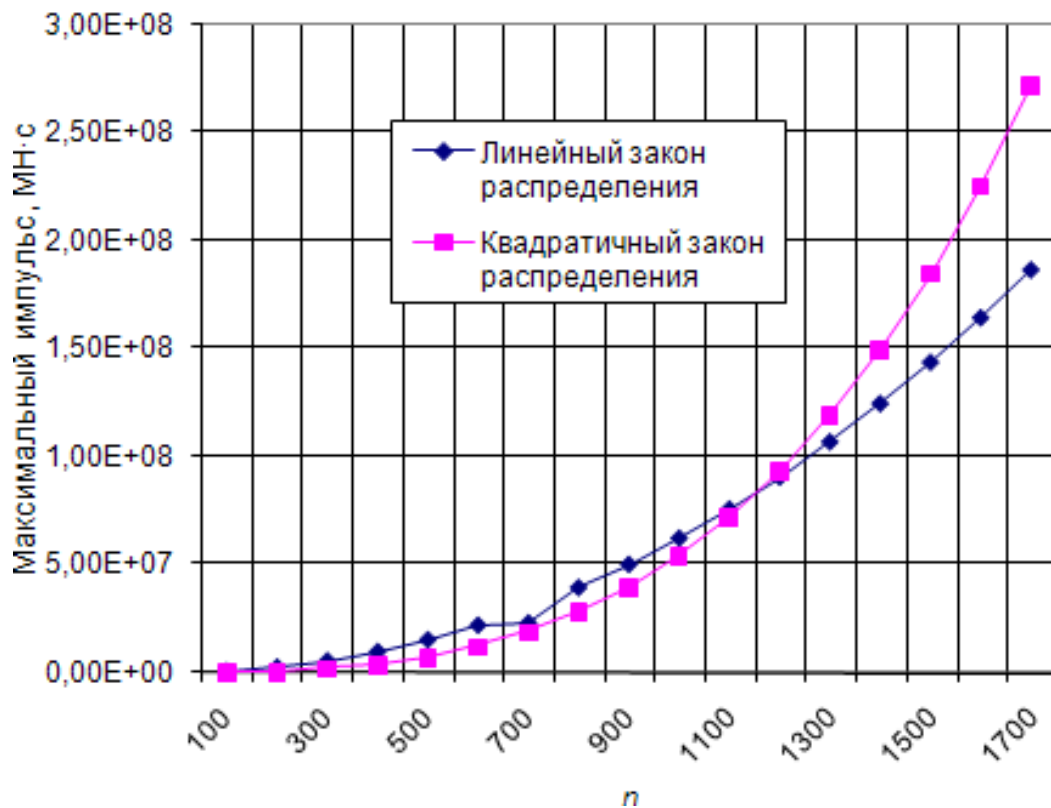


Рис. 3. Зависимость максимального импульса в системе (МН·с) от количества элементов насадки

горячие газы, содержащие пылевидные частицы хлорида калия.

Заключительным этапом в производстве калийных удобрений является обработка хлорида калия (KCl) перед отправкой его к потребителю, сушка концентрата, прошедшего центрифугирование и имеющего высокую влажность. Сушка необходима для того, чтобы транспортируемый продукт не содержал влаги, не слеживался и не образовывал монолитных кристаллов.

Сушку проводят в «кипящем слое», максимизирующем активную поверхность соприкосновения высушиваемого материала с тепловым агентом. Горячие топочные газы вентилятором 4 продуваются снизу вверх через влажный зернистый материал влажностью 7%, непрерывно загружаемый в печь кипящего слоя 5 (см. рис. 4). Под действием перепада давления и температуры слой материала псевдооживается, обеспечивая интенсивное перемешивание частиц и

увеличение коэффициента теплопередачи. При этом влажность хлорида калия снижается до 0,2%. Затем высушенный хлорид калия поступает в аэроохладитель 6 для охлаждения, далее – в шнековый смеситель 7 для последующей обработки реагентами.

В процессе сушки происходит активный унос материала отходящими газами. Поэтому дымовые газы, уходящие из печи кипящего слоя и аэроохладителя, содержат до 1÷1,5% твердой фазы (от производительности печи). При производительности печи по хлориду калия 120 т/ч объем отходящих газов составляет около 60÷65 тыс. м³/ч, средняя запыленность отходящих газов – 19,3 г/м³. Конечная запыленность газов, выбрасываемых в атмосферу через дымовую трубу, не должна превышать 70 мг/м³. Температура газов: после печи 120±100°С; после аэроохладителя – 70÷80°С.

Для удаления пылевой фракции хлорида калия из отработанных газов в отделении сушки хлорида

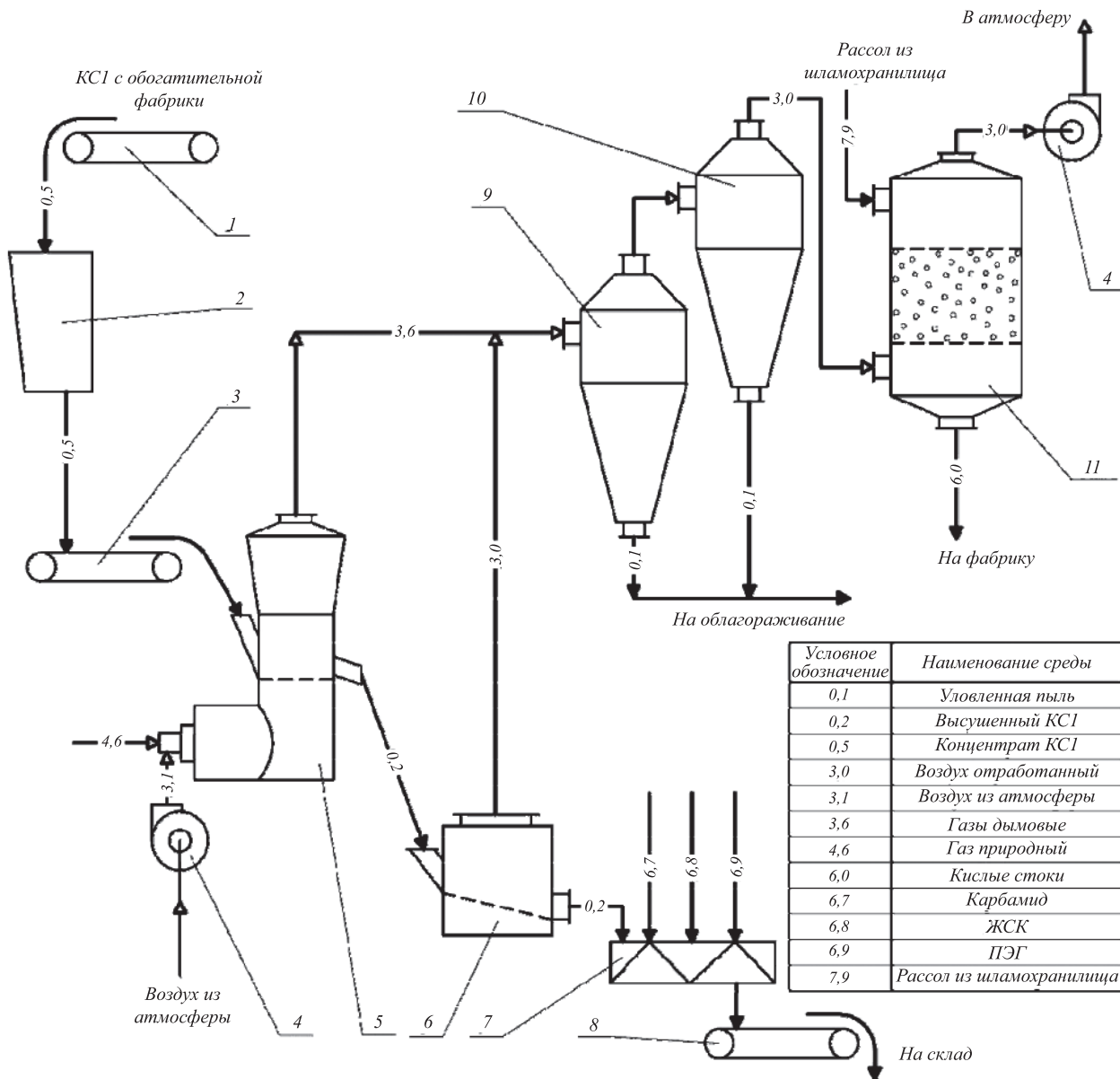


Рис. 4. Технологическая схема сушки хлорида калия на БРУ-2 ОАО «Уралкалий»: 1, 3, 8 – конвейер ленточный; 2 – бункер влажной соли; 4 – вентилятор (2); 5 – печь кипящего слоя; 6 – аэроохладитель; 7 – смеситель шнековый; 9 – продуктоотделитель; 10 – циклон; 11 – абсорбер с подвижной насадкой

калия ОАО «Уралкалий» предусмотрены три стадии очистки. Две первые – стадии сухой очистки (продуктоотделитель 9 и циклон 10) предназначены для улавливания крупнодисперсных фракций (> 10 мкм) и возврата их в производственный процесс. Заключительная стадия очистки – мокрая очистка организована в соответствии с [1] в скруббере с под-

вижной насадкой (АНП) 11 и обеспечивает удаление тонкодисперсной калийной пыли (< 10 мкм) с образованием соляного шлама.

АНП выполнен в виде колонны с противоточным движением фаз [7], на распределительных решетках которого расположена насадка диаметром 120 мм, выполненная из термостойкого полимерного

материала с плотностью 440 кг/м³. Диаметр аппарата – 2,4 м, высота статического слоя насадки – 400 мм, доля свободного сечения опорно-распределительной решетки колосникового типа – 0,45. Орошение насадки рассолом, подаваемым из шламохранилища, идет через радиальную систему брызгал; объемный расход жидкости выбран по рекомендации [4, 5] в пределах 40÷60 м³/ч.

Степень очистки газов от пылевой фракции в трех ступенях составляет 97,5% при гидравлическом сопротивлении системы 2,7 кПа.

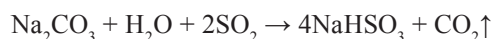
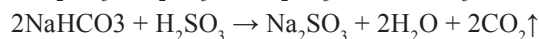
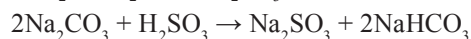
Рассмотрим другой пример – очистка газовых выбросов при абсорбции диоксида серы в производстве бисульфита натрия (NaHSO₃), который необходим для получения бисульфитной небеленой целлюлозы – являющейся основным компонентом при производстве газетной бумаги. На ОАО «Соликамскбумпром» его получают абсорбцией диоксида серы (SO₂) раствором карбоната натрия (Na₂CO₃) в противоточных насадочных абсорбционных колоннах (рис. 5).

Охлажденный газ с содержанием диоксида серы 13÷17% поступает в абсорбер 8, орошаемый центробежным насосом 9 раствором бисульфита натрия с содержанием SO₂ 2÷2,5% и pH > 5,0. Полученный в результате абсорбции раствор бисульфита натрия подается в колонки Стеббинса 2, заполненные керамической насадкой, а затем перетекает в баки 1 и уходит на следующие стадии технологического процесса. Готовый раствор бисульфита должен иметь кислотность в интервале pH = 2,3 ÷ 4,5%. Не поглощенный на первой стадии абсорбции газ SO₂ улавливается в абсорбере 7 раствором кальцинированной соды с концентрацией 5÷6%, который подается насосами 10 из смесительного бака 11. В результате абсорбции во второй стадии концентрация SO₂ снижается до 4,5%.

Газовая смесь после второй стадии абсорбции поступает на санитарную очистку в абсорбер с подвижной насадкой (АПН) 6, орошаемый содовым раствором с концентрацией Na₂CO₃ 8÷10%, где содержание SO₂ снижается до ПДК, и газ выбрасывается в атмосферу элгаустерами 5. В свою очередь очистка газов от диоксида серы, отходящих из колонок Стеббинса и поступающей парогазовой смеси, про-

исходит в АПН 4, которые орошаются содовым раствором из бака 13. Пополнение содового раствора в системе происходит из циркуляционного бака 14.

Процесс поглощения SO₂ протекает следующим образом:



Особенностью применяемых АПН является присутствие в рабочей зоне абсорбера хаотически движущихся элементов подвижной насадки, вызывающих турбулизацию и дробление жидкости.

Насадка [6], способная к вращению, включает полый элемент, в центральной части которого заполнением внутреннего объема пористым материалом закреплен дополнительный элемент, выполненный в виде шара, плотность которого больше средней плотности насадки, а радиус определяется по формуле

$$2\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1\right)\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^5 + 5\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 - 3 = 0,$$

где ρ_2 – плотность материала шара;

ρ_1 – плотность наполнителя (пористого материала);

R_2 – радиус шара;

R_1 – радиус насадки.

При работе аппарата в режиме развитого псевдооживления в виде произвольных колебаний и перемещений. Элементы насадки соударяются друг с другом. Эти удары, как правило, являются косыми центральными и вызывают, наряду с резким изменением вектора скорости движения, появление вращающего момента.

Малый осевой момент инерции элементов насадки способствует постоянному вращению, которое обеспечивает дополнительное капельное и струйное разбрызгивание жидкости поверхностью вращающейся насадки, создавая высокую интенсивность перемешивания взаимодействующих фаз.

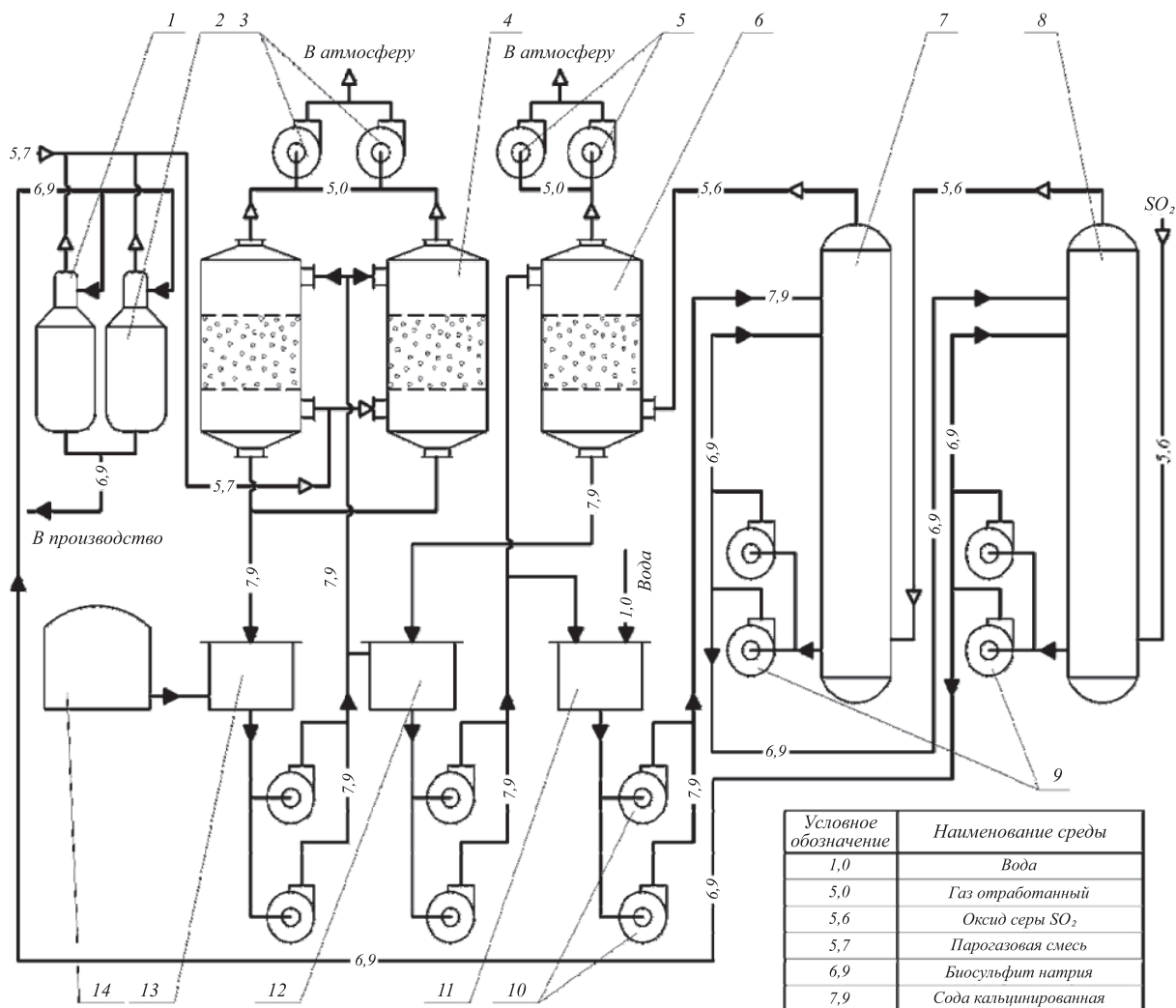


Рис. 5. Технологическая схема абсорбции диоксида серы в производстве бисульфита натрия на ОАО «Соликамскбумпром»: 1 – бак бисульфита (2); 2 – колонка Стеббинса (2); 3 – эггаустер (2); 4 – абсорбер с вращающейся подвижной насадкой (2); 5 – эггаустер (2); 6 – абсорбер с вращающейся подвижной насадкой; 7, 8 – абсорбер; 9 – насос (4); 10 – насос (6); 11 – бак смешительный; 12, 13 – бак содового раствора; 14 – бак хранения содового раствора

После двух стадий абсорбции диоксида серы в насадочных абсорберах концентрация его в отходящих газах не превышает 0,15%, что составляет 4,4 г/м³. Конечная же концентрация не должна превышать 15 мг/м³. Столь существенное снижение концентрации SO₂ до предельно-допустимого выброса (ПДВ) можно обеспечить только за счет использования высокоэффективного и надежного газоочистного оборудования.

В соответствии с рекомендациями [1], в рассматриваемом технологическом процессе для очистки газа от диоксида серы применяется абсорбер с вращающейся подвижной насадкой. Рассчитанный по методике [2], абсорбер с вращающейся подвижной насадкой [6] представляет собой односекционный колонный противоточный аппарат [7] диаметром 1,2 м, снабженный шаровой насадкой из полиэтилена с размерами

$d_{ш} = 80$ мм. Высота статического слоя насадки составляет 400 мм. Температура газа, подаваемого в АПН – $15 \div 20^{\circ}\text{C}$, расход газа порядка $9000 \text{ м}^3/\text{ч}$, расход поглотителя – $35 \div 55 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Таким образом, используя инструмент выбора массы и количества насадочных элементов, можно повысить активность элементов насадки в псевдооживленном слое за счет увеличения числа столкновений между ними. Другой ресурс актив-

визации элемента подвижной насадки – конструктивное решение, обеспечивающее организацию вращения такого подвижного элемента. Более активное ударное взаимодействие вращающихся насадочных тел, циркулирующих в объеме абсорбера, способствует улучшению условий диспергирования взаимодействующих фаз и обеспечивает усиление перемешивающего эффекта движения насадки.

Список литературы

1. Беккер, В.Ф., Киссельман И.Ф. Очистка промышленных газов в абсорберах с псевдооживленной насадкой // Экология и промышленность России, 2010. №1. С. 18-21.
2. Беккер, В.Ф. Управление структурой потоков в аппаратах химической
3. технологии: учеб. пособие. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2010. – 208 с.
4. Беккер, В.Ф. Оценка числа столкновений элементов подвижной насадки в рабочем объеме абсорбера // «Наука в решении проблем Верхнекамского промышленного региона». Сб. науч. трудов. Вып. 5. Березники: БФ ПГТУ, 2006. – С. 256-264.
5. Киссельман, И.Ф. Оптимизация конструкционных параметров абсорбера с вращающейся псевдооживленной насадкой / И.Ф. Киссельман // Математические методы в технике и технологиях: Сб. трудов XXI Междунар. науч. конф. Т. 11. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2008. – С. 31-32.
6. Киссельман, И.Ф. Выбор режимно-технологических параметров абсорбера с вращающейся псевдооживленной насадкой / И.Ф. Киссельман, В.Ф. Беккер // Математические методы в технике и технологиях: Сб. трудов XXII Междунар. науч. конф. Т. 10.– Псков: ПГПИ, 2009. – С. 59-60.
7. А.с. №1271549, МКИ В 01D 53/20. Насадка для массообменных процессов / В.Ф. Беккер. – Оpubл. 23.11.1986 в Бюл. №43, 1986
8. Патент РФ на изобретение №2125479, МКИ 6 В 01 D 47/14, F 28 C 3/08. Абсорбер с псевдооживленной насадкой / В.Ф. Беккер. – Оpubл. в Б.И., 1999, №3.