

Повышение эффективности процесса сатурации на основе использования эжекторных систем^S

С.М. ПЕТРОВ, д-р техн. наук, профессор (e-mail: petrovsm@mail.ru)

Н.М. ПОДГОРНОВА, д-р техн. наук, профессор

А.В. ШАХОВСКОЙ, канд. техн. наук, доцент

Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ)

Введение

Типовым оборудованием для проведения первой сатурации являются модернизированные барботёрные аппараты Ш1-ПАС-3,0 (3 тыс. т свёклы в сутки) и Ш1-ПАС-6,0 (6 тыс. т свёклы в сутки), в которых процесс сатурации сопровождается выбросами в атмосферу отработавшего газа, содержащего диоксид углерода, оксид углерода, диоксид серы, оксиды азота, аммиак. Как известно, диоксид углерода относится к парниковым газам и должен быть сокращён в промышленных выбросах в углеродно-нейтральных энергетических системах.

Для решения данной проблемы предложены следующие конструктивные решения сатураторов.

Аппараты с рециркуляцией. В сатураторе такого типа используется циркуляционный насос для обеспечения принудительной рециркуляции через промежуточный сборник со средним временем пребывания в нём сока 5 мин, в котором частицы суспензии $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из сока основной дефекации растворяются. Рекомендуются шести- или семикратная степень рециркуляции сока в сатураторе. Такой способ имеет преимущество по сравнению с аппаратами с естественной внутренней рециркуляцией при движении газа, поскольку циркулирующий сок можно подать на форсунки над поверхностью жидкой фазы внутри сатуратора и за счёт этого предупредить пенообразование в случае, когда щёлочность становится слишком высокой. Обычно сатураторы с рециркуляцией позволяют получать крупный сатурационный осадок с хорошими седиментационными и фильтрационными свойствами [1].

Аппараты без рециркуляции. В отдельных случаях используются сатураторы, в которых специально предотвращают рециркуляцию с целью получения режима прямо- или противотока. Типовым решением является цилиндрическая ёмкость, снабжённая распределителем газа в нижней части, который зани-

мает большую часть площади днища ёмкости. Однако это не обеспечивает режим идеального прямо- или противотока, поскольку некоторое перемешивание создаётся при движении газовых пузырей.

Системы для распределения газа. Существует два типа систем для распределения сатурационного газа:

– трубы барботёрного типа с прорезями и механическими скребками, которые очищают прорези при медленных колебательных движениях (трубки Рихтера). Этот тип распределителей газа достаточно эффективен и позволяет нормально работать в течение всего производственного сезона без дополнительной очистки [10];

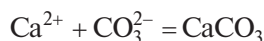
– распределители газа без механических устройств для очистки. В этом устройстве барботёр представляет собой конический колокол с зубчатым гибким кольцом из тонкого металлического листа для предотвращения отложения осадков; газ проходит под зубчатым кольцом [8].

В качестве основного метода для уменьшения выбросов CO_2 и CO предложено ведение процесса, обеспечивающего интенсивное диспергирование газа в соке за счёт создания условий многократной циркуляции сока и принудительного барботирования газа [3].

Целью работы являлся поиск решений аппаратурно оформленного процесса сатурации, перспективных с позиций энергоэффективности, ресурсосбережения, экологической и экономической целесообразности.

Условия и методы исследования

Сатуратор рассматривается как массообменный аппарат, в котором химической реакции взаимодействия в жидкой среде ионов кальция Ca^{2+} с угольной кислотой и образования карбоната кальция



предшествует массоперенос CO_2 из газовой фазы в реакционную систему, который подчиняется законам массопередачи при абсорбции.

Скорость образования CaCO_3 , т. е. процесса сатурации, обусловлена реакцией, протекающей с минимальной скоростью. Как показано, скорость физической абсорбции (растворения) углекислого газа в соке с последующим образованием угольной кислоты сравнительно небольшая, зависит от величины рН среды и концентрации сахарозы, присутствующей в растворе, и поэтому является лимитирующей стадией всего многостадийного процесса сатурации [2].

Следовательно, наряду с кинетикой массообмена при абсорбции CO_2 и последующих химических реакций, на скорость процесса сатурации существенное влияние оказывает гидродинамическая обстановка в сатураторе, к основным показателям которой относят размер газовых пузырей (что коррелируется с поверхностью контакта фаз), газосодержание, скорость движения взаимодействующих фаз, высоту барботажного слоя, распределение времени пребывания элементов потока жидкости в сатураторе [10].

В работе рассмотрены возможности повышения эффективности процесса сатурации на основе эксплуатации различных эжекторных систем.

Эжекторы (струйные насосы) применяются во многих отраслях промышленности: энергетической, металлургической, машиностроительной, нефтяной, химической. Широкое распространение они получили благодаря исключительной простоте конструкции, отсутствию подвижных механических частей, простоте их изготовления, высокой надёжности в работе и низкой стоимости. Действие эжектора основано на способности высокоскоростной струи жидкости или газа инициировать вокруг себя движение окружающей среды (жидкость, газ, твёрдый сыпучий материал либо их смеси) и увлекать её за собой. В эжекторе одновременно протекают два взаимосвязанных процесса: передача части энергии от активного потока пассивному и их смешение. Поэтому если эжектор в гидро-пневмосистеме является насосом-смесителем, то его эффективность оказывается наивысшей, так как с пользой расходуется не только энергия пассивного потока, но и остаточная энергия активного потока. В противном случае,

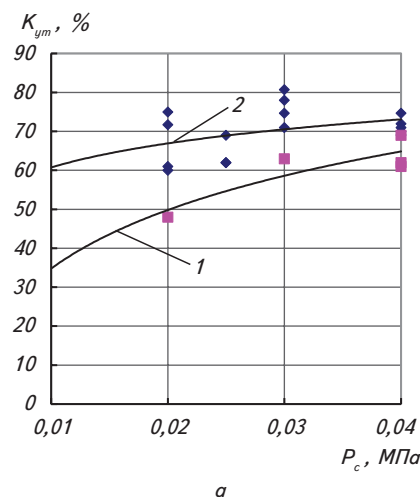
если эжектор используется только в качестве насоса, его эффективность невысокая.

Результаты и обсуждение

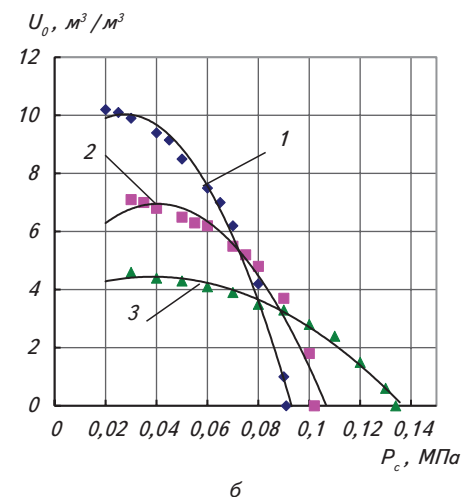
Исследования утилизации CO_2 осуществляли при двухступенчатой инжекционно-барботажной сатурации. В качестве абсорбентов использовали заводской дефекованный сок щёлочностью 1,3–1,5 % CaO , модельные сахаросодержащие растворы щёлочностью 1,1–1,5 % CaO и растворы клервовок сахара-сырца щёлочностью 1,9–2,5 % CaO [4].

Лабораторные опыты проводили при температуре 80 °С. При инжекционной сатурации воздушным компрессором в аппарате создавали противодействие $P_c = 0,02–0,04$ МПа и устанавливали расход диоксида углерода по материальному балансу реакции $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и CO_2 исходя из расхода извести, подаваемой с раствором.

Экспериментально было показано, что на инжекционной ступени сатурации существует зависимость коэффициента утилизации диоксида углерода от величины противодействия газовой фазы (рис. 1), заключающаяся в том, что при повышении противодействия газовой фазы с $P_c = 0,02$ до $P_c = 0,04$ МПа при равных расходах CO_2 коэффициент утилизации существенно возрастает. При этом коэффициент утилизации CO_2 наиболее увеличивается при сатурации вязких растворов клервовок сахара-сырца (см. рис. 1а).



1 – сатурация клервовок сахара-сырца;
2 – сатурация дефекованного сока и модельных растворов



1 – $f_k/f_p = 12,9, z = 6$;
2 – $f_k/f_p = 10, z = 6$;
3 – $f_k/f_p = 7, z = 6$

Рис. 1. Влияние противодействия газовой фазы на коэффициент утилизации CO_2 (а) и величину объёмной подачи инжектора (б):
 f_k/f_p – отношение площади сечения камеры смешения и жидкостного сопла инжектора;
 z – число отверстий в жидкостном сопле

При малых давлениях подачи жидкости на сопло форсунки (до 0,25 МПа) коэффициент эжекции зависит от свойств жидкости: увеличение концентрации растворов приводит к снижению эжектирующей способности. При увеличении давления, под которым происходит распыление жидкости, влияние её физических свойств на работу эжектора прекращается [7].

Сделанные на инжекторной ступени оценки скорости поглощения CO_2 позволяют прийти к заключению, что при максимальном увеличении межфазовой поверхности контакта CO_2 и щелочного сахаросодержащего раствора в пенном потоке, обеспечении непрерывного обновления поверхности контакта фаз, их усиленной турбулизации и поддержании избыточного давления можно более эффективно вести процесс первой сатурации двухступенчатым инжекционно-барботажным способом.

Промышленные испытания двухступенчатой инжекционно-барботажной сатурации безрециркуляционным способом выполнены на пилотной установке (рис. 2) в условиях ЗАО «Кристалл-Бел».

Инжекционная ступень сатурации дефектованного сока осуществлялась при давлении высоконапорного

потока на инжекторе 0,5 МПа и противодействии низконапорного потока сатурационного газа 0,05–0,06 МПа, что позволило сократить двукратно время процесса при сохранении седиментационных показателей осадка.

В период переработки сахара-сырца инжекционная сатурация клеровки производилась при давлении рабочего потока клеровки на инжекторе 0,15–0,18 МПа и противодействии сатурационного газа 0,03–0,04 МПа. При этом достигнуто повышение степени адсорбционного удаления красящих веществ из клеровки сахара-сырца с 40–45 до 65–70 %.

При поиске решения задачи снижения выбросов CO_2 в атмосферу изучена кинетика поглощения диоксида углерода щелочными сахаросодержащими растворами в условиях инжекционно-барботажной сатурации дефектованного сока и клеровки сахара-сырца. Установлена возможность увеличения коэффициента использования CO_2 с 60–65 до 68–72 % в свеклосахарном производстве и с 42–50 до 60–65 % при переработке сахара-сырца, что приводит к уменьшению расхода известняка на 0,9 и 3,0 % соответственно к массе сырья [5].

Можно показать, что при фиксированных значениях расхода известняка на очистку, содержания CaCO_3 в известняке, степени обжига известняка и его влажности сокращение расхода известняка $M_{\text{изв}}$ и пропорциональное ему сокращение выброса CO_2 в атмосферу на сатурации происходит пропорционально изменению соотношения коэффициентов утилизации: a_T – теоретического, a_d – действительного в типовом аппарате и $a_{\text{д.инб}}$ – действительного в инжекционно-барботажном сатураторе. Таким образом, при инжекционно-барботажной сатурации сока сокращение выброса CO_2 в атмосферу составляет

$(a_T/a_d) : (a_T/a_{\text{д.инб}}) = (72,7/55) : (72,7/70) =$ в 1,27 раз на 1 т свёклы, а при сатурации клеровки сахара-сырца соответственно

$(a_T/a_d) : (a_T/a_{\text{д.инб}}) = (65/46) : (65/62,5) =$ в 1,36 раз на 1 т сахара-сырца.

Проведено также исследование инжекционной ступени предварительной сатурации клеровки сахара-сырца с наложением на поток жидкостно-газовой смеси пульсационных воздействий интенсивностью $5 - 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}^3$, приводящих к увеличению межфазной турбулентности, обновлению межфазной поверхности и, соответственно, увеличению коэффициента массоотдачи в жидкой фазе и поверхности контакта фаз. Оценка эффективности воздействия пульсаций на сатурацию осуществлена по технологическим эффектам очистки, которые увеличились на 18–20 %, и коэффициенту утилизации, возросшему на 35–38 %.

Технологические результаты проверки способа инжекционной сатурации с пульсационными воз-

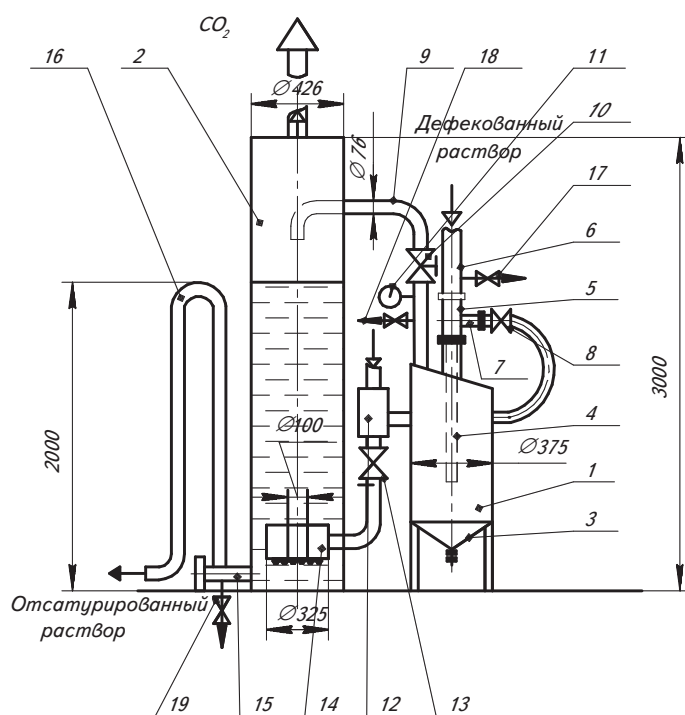


Рис. 2. Пилотная инжекционно-барботажная установка:

1, 2 – инжекционная и барботажная ступень; 3 – конусное днище; 4 – камера смешения; 5 – инжектор; 6, 7 – подвод дефектованного раствора и сатурационного газа; 8, 10, 13 – клапаны; 9 – трубопровод; 11 – манометр; 12 – коллектор сатурационного газа; 14 – газораспределитель; 15 – отвод отсатурированного раствора; 16 – сифон; 17–19 – пробоотборники

действиями указанной интенсивности подтвердили, что при одинаковых энергетических затратах, выражающихся диссипируемой турбулентной энергией, пульсационные воздействия являются более эффективными, чем стационарный процесс. При этом часть энергии идёт на образование поверхности дисперсий и, главным образом, на её возобновление, компенсирующее коалесценцию, а другая часть идёт на деформацию этой поверхности под действием турбулентных пульсаций.

Показано, что скорость поглощения N_x диоксида углерода раствором клеровки в инжекционной части сатуратора на выходе из камеры смешения, работающего в пульсационном режиме, можно определить по формуле

$$N_x = K \cdot \Phi \cdot \beta_{ж} \cdot F \cdot (C_p - C_0),$$

где K – коэффициент, учитывающий влияние интенсивности пульсационных воздействий на скорость процесса поглощения (экспериментальная оценка $K = 1,6$); Φ – фактор ускорения абсорбции химической реакцией; $\beta_{ж}$ – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, м/с; F – площадь поверхности раздела фаз, м²; C_p – растворимость CO₂ в клеровке, кмоль/м³; C_0 – концентрация газа в основной массе жидкости, кмоль/м³.

Оценки скорости поглощения диоксида углерода при рассмотрении кинетики инжекционной сатурации растворов клеровок сахара-сырца при пульсационных воздействиях показали $N_x = 3,2 - 3,6 \cdot 10^{-3}$ кмоль/(с · м³).

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования инжекционно-барботажной сатурации дефекованного сока и клеровки сахара-сырца позволили разработать способ двухстадийного процесса с 60%-ной карбонизацией на инжекционной ступени при повышенном давлении. На основе струйной технологии предложены варианты конструкций инжекционно-барботажных сатураторов с высокими эффектом адсорбционной очистки и степенью утилизации диоксида углерода, представленные в разделе «Описание конструктивных решений».

Обсуждение и анализ полученных результатов

Как известно, в настоящее время эффективность использования газа при сатурации сока и клеровки тростникового сахара-сырца в типовых сатураторах составляет 40–55 %. Это значительно ниже минимально допустимой величины около 73 % при сбалансированном потреблении известкового молока и сатурационного газа для очистки диффузионного сока и клеровки сахара-сырца. Вследствие этого заводы вынуждены перерасходовать топливо при дополнительном обжиге известняка и выводить часть извести

как товарную. Кроме того, при низком коэффициенте использования диоксида углерода увеличиваются тепловые потери, время сатурации, повышается цветность соков и нарушается экологическая обстановка атмосферы из-за излишних выбросов диоксида углерода с отработанным сатурационным газом.

Известно, что при постоянных физико-химических свойствах дисперсной системы «жидкость – газ» объёмный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе при турбулизации зависит от мощности перемешивания и газосодержания. Исходя из анализа процесса сатурации, был сделан акцент на повышении мощности механического перемешивания в инжекторах, которая пропорциональна скорости диссипации энергии – чем она больше, тем выше скорость рассеивания энергии в аппаратах, реализующих процесс турбулизации. Для этого использовались следующие эффекты:

- режим инжестирования с противодавлением по газовой фазе;
- многоструйный режим инжестирования;
- наложение на поток жидкостно-газовой смеси пульсационных воздействий.

В проведённых экспериментах скоростные режимы течения потока составляли 25 м/с, что соответствует критерию Рейнольдса $15,5 \cdot 10^5$. Для сопоставления можно отметить, что конструкция аппарата, имеющего последовательные периодические сужения типа «конфузор – диффузор» для системы «газ – жидкость» при значении критерия $Re = 3,56 \cdot 10^4$ позволяет интенсифицировать тепло-массообмен в 1,5 раза.

В предложенных сатураторах с инжекционной ступенью влияние эффектов нестационарности и инерционности на межфазовый перенос приводит к обновлению межфазной поверхности, увеличению межфазной турбулентности, что увеличивает основные составляющие переноса – коэффициент массоотдачи $\beta_{ж}$ и межфазную поверхность F .

Положительное влияние противодействия на эффективность инжекционной сатурации связано со смещением зоны активного перемешивания из диффузора инжектора в камеру смешения, что увеличивает реакционное время и способствует более полному поглощению диоксида углерода щелочным сахаросодержащим раствором. Однако дальнейшее повышение противодействия уменьшает эжекцию (см. рис. 16) и создаёт скачок давления в начале камеры смешения, после чего в ней движется уже не жидкостно-газовая эмульсия (пена), а жидкость с пузырьками газа.

Показано, что при отношении площади сечения камеры смешения и жидкостного сопла инжектора $f_k / f_p = 12,9$; $P_{ж} = 0,52$ МПа; $P_c = 0,04$ и $0,06$ МПа существует максимум коэффициента объёмной по-

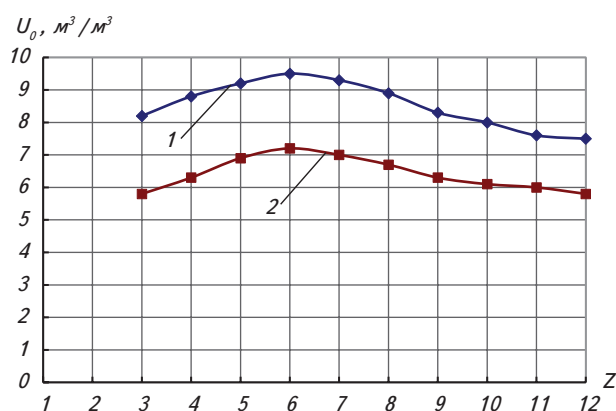


Рис. 3. Влияние числа отверстий Z в рабочем сопле инжектора на объёмный коэффициент подачи U_0 :
 1 – $f_n/f_p = 12,9$, $P_p = 0,52$ МПа, $P_c = 0,04$ МПа;
 2 – $f_n/f_p = 12,9$, $P_p = 0,52$ МПа, $P_c = 0,06$ МПа

дачи инжектора от числа отверстий в жидкостном сопле $z = 6$ ($3 \leq z \leq 12$), что объясняется характером обновления поверхности струй при спутном течении на участке распада и взаимодействия с газовой фазой (рис. 3). Полученные при исследовании инъекционной сатурации результаты являются предиктивной аналитикой использования струйной техники и позволяют усовершенствовать процесс сатурации дефекованных сахаросодержащих растворов.

Экономическая эффективность при использовании инъекционно-барботажной сатурации определяется сокращением расходов на уголь (13 тыс. р/т) и известняк (900 р/т). Средний расход каменного угля на обжиг 1 т известняка принимаем 8,0 % к его массе.

Тогда при сатурации сока сокращение расхода известняка составит 0,9 %, или 0,009 т, на 1 т свёклы, а угля соответственно $0,009 \times 0,08 = 0,00072$ т на

1 т свёклы. Суммарная экономия затрат на известняк и каменный уголь за 1 месяц переработки свёклы на сахарном заводе производственной мощностью по переработке свёклы $A = 6\,000$ т/сут составит по топливу $\Theta_{\text{топ}} = 0,00072 \cdot 13\,000 \cdot 6\,000 \cdot 30 = 1\,685\,000$ р., а по известняку $\Theta_{\text{изв}} = 0,009 \cdot 900 \cdot 6\,000 \cdot 30 = 1\,460\,000$ р. Суммарная экономия затрат на известняк и каменный уголь за 1 месяц переработки свёклы равна $\Theta_{\text{сум}} = 1\,685\,000 + 1\,460\,000 = 3\,145\,000$ р. (см. табл.).

Описание конструктивных решений

Предлагаемый сатуратор (рис. 4) может быть применён в качестве аппарата первой или второй сатурации. Использование эжектора 7 в качестве первой ступени сатуратора позволяет в течение нескольких секунд предварительно обработать сок с 20%-ной степенью карбонизации, что приводит к образованию центров кристаллизации карбоната кальция с высокой адсорбционной способностью. В барботажной секции сатуратора продолжается рост этих кристаллов с одновременной адсорбцией несахаров. Таков механизм получения соков высокой степени очистки.

В качестве газа для сатурации сахарного сока на первой ступени сатуратора является отработанный сатурационный газ из барботажной части сатуратора, концентрация CO_2 в котором составляет 12–15 %.

Повышение коэффициента использования CO_2 из сатурационного газа снижает загрязнение воздуха и тепловые выбросы в атмосферу.

Предлагаемый сатуратор для сахаросодержащего раствора (рис. 5) имеет цилиндрический корпус с коническим днищем, где расположены система рециркуляции сока (позиции 6, 7, 8) и инжектор 9, подключённый к системе рециркуляции сока и трубопроводу для подвода сатурационного газа 13. С целью повышения коэффициента использования углекислого

Экономические аспекты реализации НДТ сатурации растворов при производстве сахара на сахарном заводе производственной мощностью по переработке свёклы 6 тыс. т/сут

Наименование мероприятия	Капитальные затраты, млн р.	Эксплуатационные затраты, млн р.	Обоснование экономического эффекта	Экономия затрат по топливу и известняку, млн р.	Примечание
Проведение процессов первой и второй сатурации инъекционно-барботажным способом	5,0 (модернизация действующего сатуратора)	3,0	Увеличение степени утилизации сатурационного газа на 15%, уменьшение расхода известнякового камня на 0,9% к массе свёклы	3,145 в месяц	Результаты производственных испытаний
Проведение процессов первой и второй сатурации на основе многоступенчатого контакта газа и сока [3]	14,0 (модернизация действующего сатуратора) 20,0 (приобретение сатуратора)	2,0	Увеличение степени утилизации сатурационного газа на 15 %, уменьшение расхода известнякового камня на 0,2 % к массе свёклы	0,698 в месяц	п. 4.2.4 ИТС 44-2017 «Производство продуктов питания», табл. 5.12

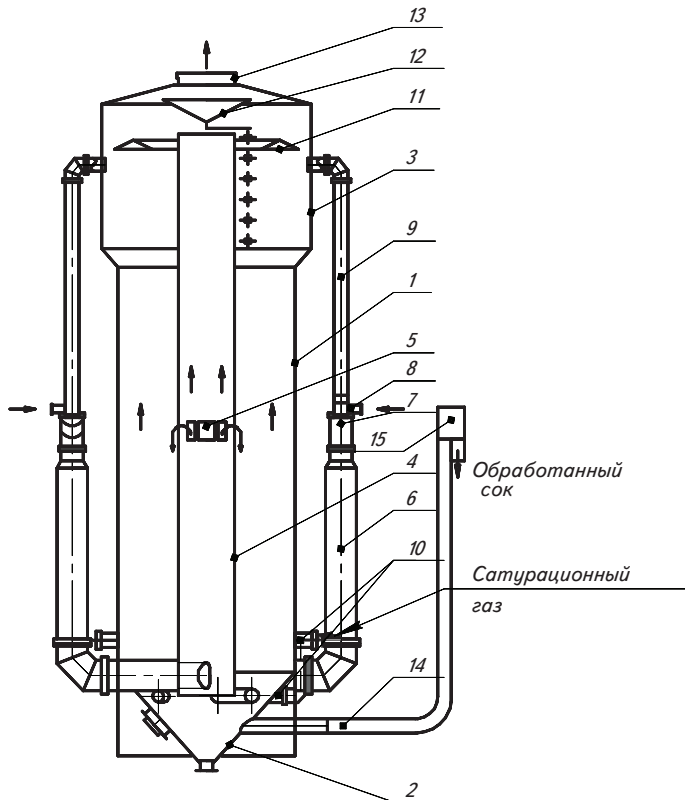


Рис. 4. Аппарат первой сатурации с первой эжекционной ступенью [6]:
 1 – цилиндрический корпус; 2 – коническое днище;
 3 – расширенная верхняя часть; 4 – циркуляционная труба;
 5 – отверстия; 6 – трубопровод подачи сокогазовой смеси;
 7 – эжектор; 8 – подвод дефектованного сока в эжектор;
 9 – патрубок подвода отработанного сатурационного газа в эжектор; 10 – патрубок подвода сатурационного газа в эжектор; 11, 12 – каплеотбойники; 13 – патрубок удаления отработанного сатурационного газа в атмосферу; 14 – патрубок вывода обработанного сока; 15 – переливной ящик

газа в сопле инжектора установлены под углом 10–15° к вертикальной оси ребра для завихрения сока, а трубопровод для подвода сатурационного газа подключён к приёмной камере инжектора под углом 35–50° к её оси. Устройство, согласно изобретению, позволяет повысить коэффициент использования углекислого газа до 95 %.

Сатуратор (рис. 6) включает в себя вертикальный цилиндрический корпус 1, снабжённый распределителями сатурационного газа (5, 6, 7), циклоном 3 для отделения газа от раствора. Снаружи корпуса установлена вертикальная цилиндрическая обечайка 13 с днищем и крышкой, сообщённая переливным трубопроводом 22 с циклоном. На крышке обечайки установлен жидкостно-газовый инжектор (16–18) для предварительного сатурации сахаросодержащего раствора. Обечайка снабжена системой управления пульсациями давления внутри неё, содержащей

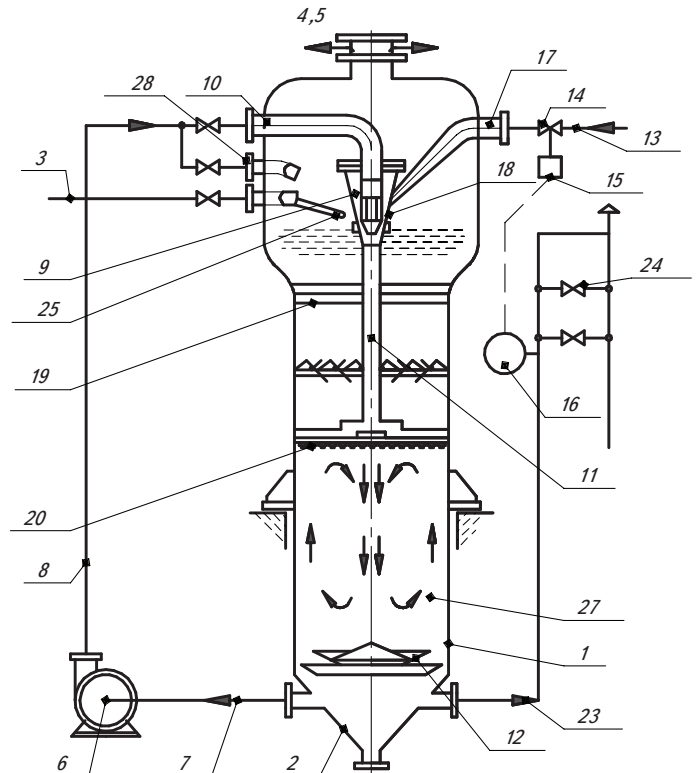


Рис. 5. Сатуратор с инжекционной ступенью [SU 1150269]:
 1 – корпус; 2 – днище; 3 – патрубок для подвода дефектованного сока; 4, 5 – патрубки отвода отсатураированного сока и отработанного газа; 6 – насос; 7, 8 – трубопроводы; 9 – инжектор; 10 – патрубок нагнетательный; 11 – камера смешения инжектора; 12 – сепаратор газа и отбойник; 13 – трубопровод подачи газа; 14 – дозировочный вентиль; 15 – регулятор; 16 – прибор для измерения pH; 17 – патрубок для подачи сатурационного газа в инжектор; 18 – приёмная камера инжектора; 19 – газораспределительные решётки; 20 – газоабсорбер; 23 – трубопровод отбора отсатураированного сока; 24 – устройство регулирования уровня; 25 – распределительное устройство для известкового молока и дефектованного сока; 28 – патрубок отводной

датчик давления 25 и связанный с ним регулятор 26. На переливном трубопроводе установлен клапан 23 с исполнительным механизмом 24. В сатураторе обеспечивается повышение эффекта очистки сахаросодержащего раствора и увеличение коэффициента использования диоксида углерода сатурационного газа.

Установка для сатурации сахаросодержащего раствора (рис. 7) состоит из снабжённых газораспределителями и соединённых друг с другом трубопроводом две ёмкости – 1 и 2, одна из которых служит для обработки раствора свежим, а другая – отработанным сатурационным газом. Ёмкости снабжены расположенными в их нижней части газораспределителями 18, 3. Ёмкость для обработки раствора отработанным сатурационным газом выполнена герметичной и

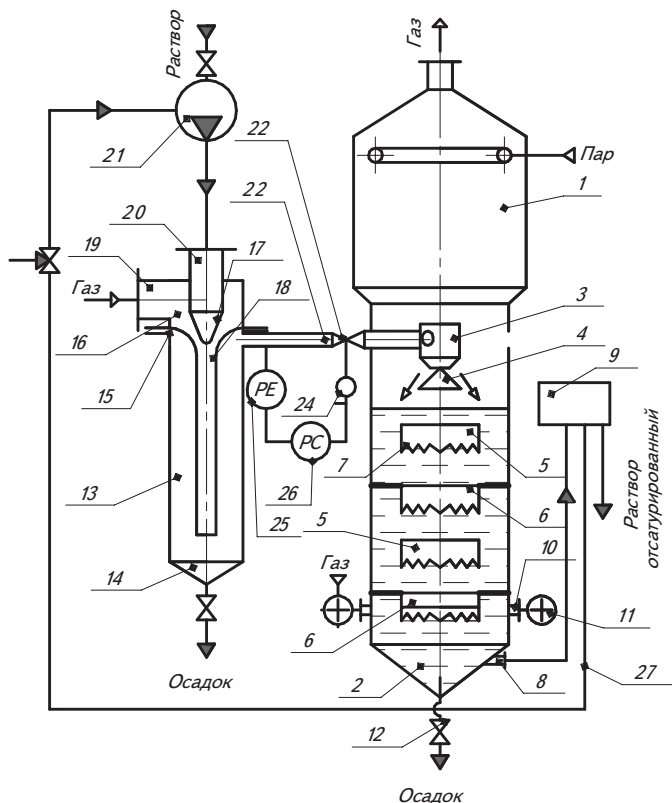


Рис. 6. Сатуратор для сахаросодержащего раствора [RU 2292400]:

1 – корпус; 2, 14 – днище; 3 – циклон; 4 – зонт;
 5, 6 – сплошные и кольцевые тарелки; 7 – диспергирующие
 элементы; 8, 12 – патрубки отвода отсатурированного
 раствора и удаления осадка; 9 – контрольный ящик;
 11 – коллектор; 13 – цилиндрическая обечайка;
 15 – крышка; 16 – приёмная камера инжектора; 17 –
 рабочее сопло; 18 – камера смешения; 10, 19, 20 – патрубки
 подвода сатурационного газа и дефектованного раствора;
 21 – насос; 22 – переливной трубопровод; 23 – клапан;
 24 – исполнительный механизм; 25 – датчик давления;
 26 – регулятор; 27 – рециркуляционный трубопровод

снабжена струйным насосом 8 для смешивания этого газа с подаваемым на сатурацию сахаросодержащим раствором, подключённым к её газораспределителю 3, и трубопроводом 30 для подачи обработанного раствора из этой ёмкости в ёмкость для его обработки свежим сатурационным газом. Эта ёмкость снабжена расположенным в наджидкостном пространстве зонтом 24 для улавливания отработанного сатурационного газа и размещённой под ним и прикреплённой к стенке ёмкости конической тарелкой 26 для стекания раствора в нижнюю часть ёмкости. Ёмкость для обработки сахаросодержащего раствора отработанным сатурационным газом снабжена системами автоматического регулирования от качки обработанного раствора и давления в её наджидкостном пространстве.

В ёмкости 1 за счёт избыточного давления по газовой фазе достигается интенсификация процесса абсорбции диоксида углерода. Во-первых, изначально в струйном насосе, работающем с противодействием, и, во-вторых, при барботировании пузырьков диоксида углерода, выходящих из газораспределителя, через слой раствора. При этом происходит интенсивное и равномерное образование мелких кристаллов карбоната кальция (CaCO_3), обладающих высокой адсорбционной способностью. В результате высоко развитой поверхности кристаллов карбоната кальция несахара более полно адсорбируются на их поверхности.

Сатуратор обеспечивает увеличение степени использования диоксида углерода сатурационного газа, улучшение эффекта адсорбционной очистки сахаросодержащего раствора, улучшение фильтрационных и седиментационных свойств сатурационного осадка, уменьшение уноса воды и потерь теплоты с водяным паром.

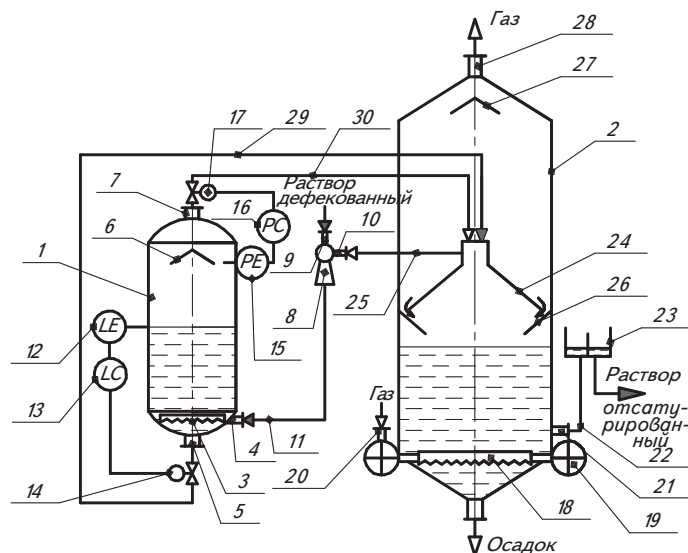


Рис. 7. Установка для сатурации сахаросодержащего раствора [9]:

1, 2 – ёмкости; 3, 18 – газораспределители; 4, 5 – патрубки для подвода и отвода предсатурированного раствора;
 6 – каплеотбойник; 7 – патрубок отвода отработанного сатурационного газа; 8 – струйный насос; 9, 10 – патрубки подвода дефектованного раствора и отработанного сатурационного газа; 11, 22, 25, 29, 30 – трубопроводы;
 12 – датчик уровня; 13 – регулятор; 14 – исполнительный механизм; 15 – датчик давления; 16 – регулятор;
 17 – исполнительный механизм; 19 – кольцевой коллектор; 20 – патрубок подвода свежего газа; 21 – патрубок;
 23 – контрольный ящик для отвода отсатурированного раствора; 24 – зонт для улавливания отработанного сатурационного газа; 26 – коническая тарелка; 27 – каплеотбойник; 28 – патрубок отвода отработанного газа

Выводы

Учитывая, что эффективность адсорбционной очистки осадком CaCO_3 определяется адсорбционной способностью адсорбента и адсорбтива, этот процесс более интенсивно реализуется в прямоточных секционных сатураторах с эжекционной первой ступенью, где соблюдается последовательное снижение щёлочности до оптимальной. При этом непрерывно изменяются свойства адсорбента и адсорбтива, в результате чего на определённых этапах протекания процесса реализуются условия, в которых происходит интенсивная адсорбция того или иного адсорбтива.

Для достижения эффекта снижения эмиссии диоксида углерода в атмосферу разработаны технические решения инжекционно-барботажных сатураторов и сатуратора с пульсационными воздействиями на инжекционной ступени, в которых обеспечивается заданный эффект утилизации CO_2 . Модернизация аппаратов сатурации может быть осуществлена силами сахарного завода.

Аппаратурное оформление процесса сатурации с использованием эжекторных систем на предварительной сатурации является перспективным с позиций энергоэффективности, ресурсосбережения, экологической и экономической целесообразности.

Список литературы

1. *Van der Poel, P.W.* Sugar technology. Beet and cane sugar manufacture / P.W. van der Poel, H. Schiweck, T. Schwartz // Berlin : Verlag Dr. Albert Bartens KG, 1998.
2. *Бугаенко, И.Ф.* Общая технология отрасли: научные основы технологии сахара / И.Ф. Бугаенко, В.И. Тужилкин. – Ч. I. – СПб. : ГИОРД, 2007. – 512 с.
3. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 44-2017 «Производство продуктов питания» (утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2017 г. № 2784).
4. Струйно-инжекционная сатурация с пульсационными воздействиями / С.М. Петров, Н.М. Подгорнова, С.К. Воинов, В.Е. Игнатов // Сахар. – 2007. – № 9. – С. 33–36.
5. *Петров, С.М.* Экологическая оценка выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух свеклосахарными заводами / С.М. Петров, Н.М. Подгорнова, В.И. Тужилкин // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26. – № 3. – С. 10–16. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-3-10-16>
6. *Пономаренко, В.* Уменьшение загрязнения окружающей среды от выбросов сатурационного газа в сахарной промышленности / В. Пономаренко, В. Дмитриев, Ц. Пушанко // Научни трудове на русенския университет. – 2014. – Т. 53. – Сер. 10.2. – С. 71–74.

7. *Пономаренко, В.В.* Вплив фізичних властивостей рідин на роботу рідинно-газових ежекторів / В.В. Пономаренко М.М. Пушанко, А.М. Слюсенко, О.А. Єщенко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2019. – № 25. – № 2. – С. 111–120.

8. Технологическое оборудование сахарных заводов / С.М. Гребенюк, Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, К.И. Виноградов. – М. : КолосС, 2007. – 520 с.

9. Патент № 2236470 Российская Федерация, МПК C13D3/04 C13D3/06. Установка для сатурации сахарсодержащего раствора : № 2003104212/13 : заявл. 12.02.2003 : опубл. 20.09.2004 / Яцковский П.В., Усыченко В.Н., Петров С.М., Подгорнова Н.М., Фурсов В.М., Гудзь Ю.А. ; ГОУ «Воронежская государственная технологическая академия»

10. *Штангеев, В.О.* Современные технологии и оборудование свеклосахарного производства / В.О. Штангеев, В.Т. Кобер, Л.Г. Белостоцкий [и др.]. – Киев : Цукор України, 2003. – С. 352.

Аннотация. Для повышения эффективности процесса сатурации предложено осуществлять предсатурацию соков и клеровок прямоточным способом на эжекционной первой ступени двухсекционных сатураторов. При этом образование центров кристаллизации и рост кристаллов CaCO_3 происходит в гидродинамических условиях с контролируемым изменением щёлочности, что приводит к образованию осадка с наибольшей адсорбционной способностью и обуславливает высокую эффективность очистки сахарного раствора от несахаров. Приведено обоснование и сделаны оценки двухступенчатой сатурации с использованием эжекторной системы, сопровождающейся снижением выбросов в атмосферу. Заданный эффект очистки растворов и утилизации CO_2 обеспечивается за счёт увеличения межфазной поверхности и уменьшения времени её обновления в системе «жидкость – газ». Рассмотрены различные варианты аппаратного оформления для практической реализации эжекционной ступени процесса сатурации.

Ключевые слова: свеклосахарное производство, прямоточная предсатурация, эжекторные системы, диоксид углерода, повышение утилизации CO_2 .

Summary. To improve the efficiency of the saturation process, it is proposed to carry out the pre-saturation of juices and clerks in a direct-flow way at the ejection first stage of two-section saturators. At the same time, the formation of crystallization centers and the growth of CaCO_3 crystals occur under hydrodynamic conditions with a controlled change in alkalinity, which leads to the formation of a precipitate with the highest adsorption capacity and determines the high efficiency of cleaning the sugar solution from non-sugars. The substantiation and estimates of two-stage saturation using an ejector system, accompanied by a reduction in emissions into the atmosphere, are given. The desired effect of cleaning solutions and utilizing CO_2 is provided by increasing the interfacial surface and reducing the time of its renewal in the liquid-gas system. Various options for hardware design for the practical implementation of the ejection stage of the saturation process are considered.

Keywords: sugar beet production, once-through presaturation, ejector systems, carbon dioxide, increased CO_2 utilization.