

УДК 661.321

*Д. В. ФИЛОНЕНКО*, соискатель, НТУ «ХПИ»;  
*В. Ф. РАЙКО*, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
*А. В. ШЕСТОПАЛОВ*, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

### СНИЖЕНИЕ ИНКРУСТАЦИИ ДИСТИЛЛЕРА ПУТЕМ СНЯТИЯ ПЕРЕСЫЩЕНИЯ ПО СУЛЬФАТУ В РЕАКТОРЕ-СМЕСИТЕЛЕ ОТДЕЛЕНИЯ ДИСТИЛЛЯЦИИ

В статье рассмотрены причины сульфатной инкрустации отделения дистилляции содового производства. Исследованы пути снижения кристаллизации ангидрита на поверхности дистиллера и трубопроводов. Установлено, что с повышением температуры и концентрации ангидритной заправки скорость кристаллизации сульфата кальция возрастает. Отгонка части аммиака и воды непосредственно в смесителе на барботажных тарелках также способствует кристаллизации ангидрита и ускоряет процесс снятия пересыщения по гипсу.

**Ключевые слова:** инкрустация аппаратуры, реактор-смеситель, производство соды, дистиллер, кристаллизация ангидрита.

**Введение.** В содовом производстве отделении дистилляции служит для регенерация аммиака из фильтровой и других жидкостей. Обычно часть растворенного аммиака связана с диоксидом углерода, поэтому при разложении карбонатных солей аммония известковым молоком и его карбоната вместе с аммиаком отгоняется и возвращается в производство диоксид углерода [1]. В процессе разложения связанного аммиака в объеме реакционной зоны реактора-смесителя, из-за наличие сульфат-иона, образовавшегося в процессе предварительной очистки рассола от  $MgSO_4$  [2, 3], имеет также место необратимая реакция образования малорастворимого сульфата кальция по реакции (1)



кристаллизирующегося на стенках смесителя, дистиллера и «беломорских» трубопроводов в виде метастабильных модификаций  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  и  $\alpha$ - $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ ,  $\beta$ - $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ ,  $\alpha$ - $CaSO_4$ ;  $\beta$ - $CaSO_4$  переходящих в стабильную модификацию-ангидрит  $\gamma$ - $CaSO_4$  [4–6]. В результате этого дистиллер содового производства в процессе эксплуатации зарастает инкрустациями, что приводит к снижению производительности станции дистилляции и вынуждает останавливать аппарат для чистки, которая производится обычно через 30 – 60 суток.

Эффективным методом предупреждения выпадения сульфатных инкрустаций в дистиллере является снятие пересыщения по сульфату в реакторе-смесителе. Поэтому, несмотря на то, что реакция между  $Ca(OH)_2$  и  $NH_4Cl$  проходит достаточно быстро – в течение от 3–5 мин. с целью ликвидации пересыщения раствора по  $CaSO_4$  и увеличения срока работы дистиллера между чистками пребывание жидкости в смесителе увеличивают до 30–40 мин, что и определяет объем аппарата.

Таким образом, разработка усовершенствованной конструкции реактора смесителя, способствующей быстрому снятию пересыщения по сульфату кальция является перспективным направлением в усовершенствовании технологической схемы отделения дистилляции.

**Цель работы.** Целью работы является исследование путей снятия пересыщения по сульфат-иону в реакторе-смесителе отделения дистилляции содового производства и разработка рекомендаций по усовершенствованию конструкции промышленного смесителя.

**Анализ литературных данных.** Литературный обзор работ по вопросу механизма образования гипсовых инкрустаций в аппаратуре дистилляции содового производства показывает, что данной проблеме исследователи уделили много внимания и были предложены некоторые рекомендации по снижению инкрустаций. Так, причиной отложения ангидритных инкрустаций в дистиллере является образование полугидрата сульфата кальция и последующее превращение его в ангидрит. Одной из причин выпадения сульфата кальция в дистиллере является резкое понижения растворимости  $\text{CaSO}_4$ , обусловленного повышением концентрации  $\text{CaCl}$  и ростом температуры [7, 8]. Главными компонентами инкрустаций являются ангидрит и в виде примеси (до 5 %) кальцит.

При разных температурах сульфат кальция кристаллизуется в различной форме: в виде безводной соли  $\text{CaSO}_4$ , полуводной  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  и двухводного гидрата  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Растворимость гипса в воде показана на рис. 1 [2, 9]. При температурах ниже  $97^\circ\text{C}$  сульфат кальция кристаллизуется в виде двухводной соли  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , выше  $97^\circ\text{C}$  - в виде  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ . В присутствии  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$  температура кристаллизации  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$  снижается от  $97$  до  $93\text{--}95^\circ\text{C}$ .

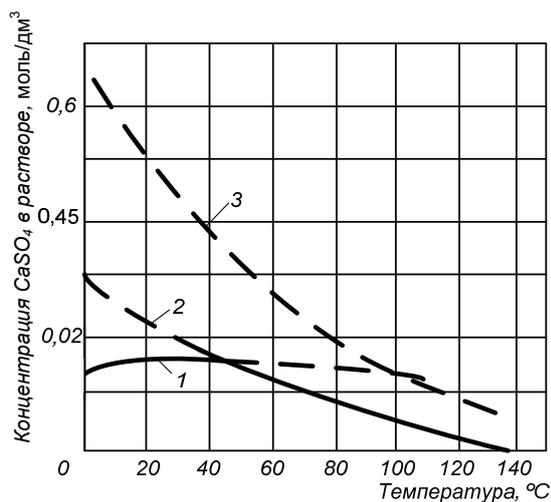


Рис. 1 – Растворимость гипса в воде: 1 – для  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; 2 – для  $\text{CaSO}_4$ ; 3 – для  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$

Выпадающий при температуре ниже критической ( $93^\circ\text{C}$ )  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  при повышении температуры выше критической переходит в полуводный, растворимость которого при увеличении температуры снижается. Этот процесс перекристаллизации способствует отложению твердой соли на внутренних поверхностях аппаратов. Известно, что новые кристаллические зародыши легче образуются на твердой поверхности, чем в объеме раствора. Поэтому гипс откладывается на поверхностях аппаратов особенно интенсивно в процессе образования новых кристаллов или при переходе одной модификации кристаллов в другую.

Экспериментальные данные Дрозина Н.Н. показали, что одной из причин образования инкрустаций внизу дистиллера, при наличии в дистиллерной суспензии двуводрата сульфата кальция, может быть кристаллизация полугидрата

с последующим превращением его в ангидрит. Было установлено [10], что кристаллизация метастабильных модификаций сульфата кальция имеет место из-за пересыщенных растворов относительно этих модификаций.

Экспериментальные работы Зеликина М.Б. [11], Громовой Е.Т. [12] показывают, что за 20-30 минут концентрация иона  $\text{SO}_4^{2-}$  в жидкости смесителя успевают стабилизироваться. Ввод кристаллической прокладки сульфата кальция или карбоната кальция, а также повышение температуры в растворе позволяют существенно снизить время кристаллизации гипса и почти полностью предупреждает образование пересыщения. Кроме того, в литературе указывается на существенное значение способа подачи реагентов в реактор-смеситель. В случае быстрого переливания и смешивания известкового молока с жидкостью теплообменника появляется большое число центров кристаллизации гипса, что приводит к резкому увеличению поверхности кристаллизации и ускоряет процесс снятия пересыщения по  $\text{SO}_4^{2-}$ . Увеличение центров кристаллизации в объеме смесителя также можно достигнуть, путем создания карбонатного режима путем введения в смеситель иона  $\text{CO}_3^{2-}$ , который с известковым молоком образует дополнительно свежесаженный  $\text{CaCO}_3$ . При этом сульфат кальция соосаждается с карбонатом кальция в объеме жидкости и предотвращает инкрустацию аппаратуры [13, 14].

Другим способом снятия пересыщения является создание безинкрустационного процесса при повышенных температурах [15]. В исследованиях Михайловой Е. Н. показано, что начиная с температуры  $152^\circ\text{C}$  и выше происходит резкое снятие пересыщения без ангидритной подкладки. При температурах  $154 - 158^\circ\text{C}$  устанавливается практически постоянная концентрация  $\text{CaSO}_4$  в дистиллерной жидкости  $0,005$  моль/дм<sup>3</sup> [16], не приводящая к инкрустации аппаратуры. Но такой температурный режим требует значительного расхода пара [15].

Исследования Громовой Е. Т. [12] показывают, что в присутствии  $0,05$  моль/дм<sup>3</sup> ангидритной прокладки и температуры  $115^\circ\text{C}$ , время превращения полугидрата в ангидрит составляет около 5 минут. При повышении температуры выше  $115^\circ\text{C}$  позволит уменьшить концентрацию ангидритной подкладки в такой степени, что процесс кристаллизации будет происходить в присутствии следов ангидритных кристаллов. Осуществление способа образования стабильной фазы – ангидрита в потоке жидкости смесителя при температуре более  $120^\circ\text{C}$  позволило бы иметь циркуляционный поток в 4–5 раз меньше по сравнению со способом ангидритной прокладки.

Осуществление необходимого температурного режима возможно с помощью струйных жидкостно-паровых инжекторов, в которых конденсация инжектируемого пара на струе воды протекает весьма интенсивно. Так, коэффициент теплопередачи от концентрируемого пара к струе жидкости, отнесенный к поверхности цилиндрической струи составляет величину около  $10^6$  ккал/м<sup>2</sup>·час  $^\circ\text{C}$  [17]. Следует дополнительно отметить достоинство струйных подогревателей, как малогабаритных в конструктивном отношении, а также простых в изготовлении и обслуживании.

**Методика исследования образования гипсовых инкрустаций.** С целью изучения роли двугидрата сульфата кальция в образовании инкрустаций на

стенках дистиллера, а также разработке рекомендаций эффективного снятия пересыщения в смесителе, изучалось превращение двугидрата сульфата кальция в полугидрат при различных температурах в дистиллерной жидкости и синтетической жидкости реактора-смесителя.

В качестве реактива применяли двугидрат сульфата кальция, полученный путем приливания по каплям 5% раствора  $\text{CaSO}_4$  к жидкости, содержащей  $\text{CaCl}_2$ . Смешение производили при температуре  $84^\circ$ . Полученный осадок  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  отмывали от маточного раствора водой и спиртом. Кристаллы  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  имели размеры от 30 до 300 мкм. Количество кристаллов длиной менее 30 мкм составляло 3%. Для опытов пользовались синтезированной дистиллерной жидкостью, содержащей  $0,01$  моль/дм<sup>3</sup>  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $1,75$  моль/дм<sup>3</sup>  $\text{Cl}^-$ . Растворение солей при приготовлении дистиллерной жидкости производили в следующем порядке. Вначале растворяли сульфат натрия, затем к полученному раствору добавляли поваренную соль. В отдельном стакане растворяли хлорид кальция. Затем раствор его вливали в смешанный раствор сульфата натрия и поваренной соли и доводили до метки в мерной колбе дистиллированной водой. Следует отметить, что при введении навески сульфата натрия в смешанный раствор хлоридов кальция и натрия выпадал осадок; содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  в растворе оставалось ниже  $0,01$  моль/дм<sup>3</sup>. Лабораторная установка для проведения опытов состояла из реакционной толстостенной колбы емкостью 1 л снабженной пробкой, в которую были вмонтированы термометр, загрузочное приспособление, трубка с присоединенным к ней ртутным манометром, трубка для отбора проб суспензии и мешалка с сальниковым уплотнением. Дистиллерную жидкость заливали в реакционную колбу так, чтобы не оставалось воздушных пузырей. Колбу закрывали герметично пробкой, погружали в глицериновый термостат с заданной температурой и отбирали часть раствора для того, чтобы ввести навеску гипса и создать объем для парогазовой фазы. По достижении заданной температуры в реакционную колбу вводили навеску гипса при помощи загрузочного устройства. Пробы после внесения навески отбирали через 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60 и 120 мин. Твердую фазу отделяли с помощью стеклянного фильтра, промывали ее этиловым спиртом, затем высушивали между листами фильтровальной бумаги и анализировали химическим и кристаллооптическим методами. Фильтрат охлаждали до температуры  $20^\circ$ , немедленно отбирали в пипетку и во взятой пробе определяли  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  и прямой титр. Помутнения фильтрата или выпадения в нем осадка не наблюдалось.

**Обсуждение результатов исследования образования сульфатов и их кристаллизации.** Экспериментальные исследования, проведенные в лабораторных условиях, с использованием синтетической жидкости смесителя (без твердой фазы) с концентрацией  $\text{SO}_4^{2-}$ , равной  $0,00975 - 0,01025$  моль/дм<sup>3</sup> показали, что если выдерживать ее при температуре  $90^\circ$  около 2 часов или удалить из нее часть аммиака и воды ( $92 - 98^\circ$ ), то в выделяющемся при этом осадке будет содержаться ангидрит. Основываясь на проведенных опытах, можно ожидать появления ангидритных инкрустаций в условиях, когда дистиллерная жидкость имеет температуру порядка  $95 - 100^\circ\text{C}$ . Было установлено, что скорость кристаллизации ангидрита резко возрастает с повышением температуры и содержания  $\text{SO}_4^{2-}$  в дистиллерной жидкости и не изменяется с увеличением

скорости движения жидкости относительно поверхности, на которой происходит осаждение. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Прямые 1 и 1' дают зависимость скорости кристаллизации ангидрита от температуры при постоянной концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$  в растворе; кривая 2 показывает изменение скорости кристаллизации ангидрита при температуре  $102^\circ$  в зависимости от концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$  в дистиллерной жидкости от изменяющейся в пределах 0,00875 до 0,0095 моль/дм<sup>3</sup>; прямая 3 указывает на отсутствие зависимости скорости кристаллизации ангидрита при температуре  $102,5^\circ\text{C}$  и постоянном содержании  $\text{SO}_4^{2-}$ , равном 0,0095 моль/дм<sup>3</sup>, от изменения скорости движения жидкости в пределах 0,3 до 0,8 м/сек.

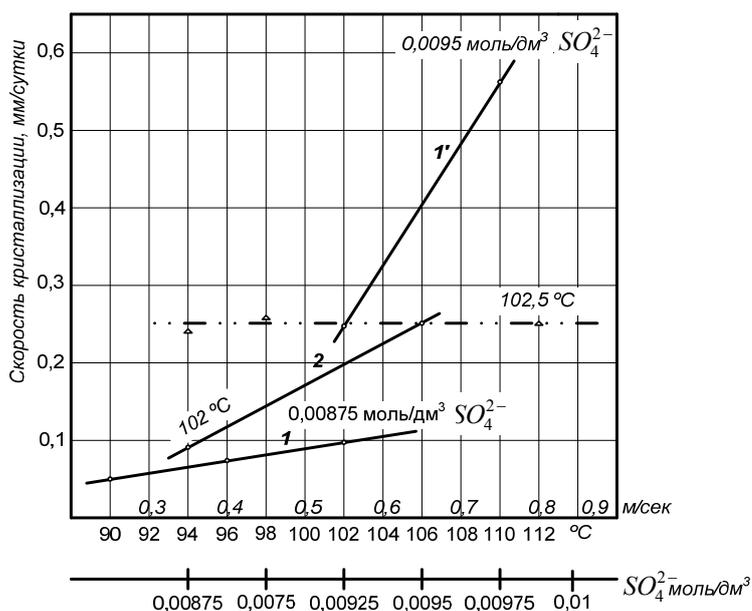


Рис. 2 – Результаты экспериментального исследования инкрустации: кривая 1 – скорость кристаллизации ангидрита в зависимости от температуры; кривая 2 – концентрации  $\text{CaSO}_4$  в растворе; кривая 3 – скорости движения жидкости

Скорость кристаллизации характеризуется скоростью прироста толщины слоя инкрустаций. При концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$ , равной 0,0095 моль/дм<sup>3</sup> и температуре  $110^\circ$  скорость кристаллизации ангидрита составляет 0,56 мм/сутки и снижается до 0,25 мм/сутки при понижении температуры до  $102^\circ$ . Уменьшение концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$  в растворе при той же температуре до 0,0085 моль/дм<sup>3</sup> приводит к понижению скорости осаждения ангидрита до 0,08 мм/сутки, а понижение температуры до  $90^\circ\text{C}$  – к дальнейшему замедлению кристаллизации. Скорость кристаллизации падает до 0,046 мм/сутки, хотя при этом относительное пересыщение раствора ангидритом составляет 100%.

Так как скорость кристаллизации ангидрита практически не зависит от скорости движения жидкости и очень сильно увеличивается с ростом температуры, то можно считать, что процесс кристаллизации определяется кинетическими, а не диффузионными факторами.

Анализ лабораторных опытов показал, что для предотвращения инкрустации конструкция реактора-смесителя может включать в себя лишь одну емкость – ликвидатор пересыщения с вводом реагентов и ангидритной прокладки через инжектор-смеситель, выполняющий роль струйного подогревателя. Разложение  $\text{NH}_4\text{Cl}$  активной  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при такой температуре происходит весьма интенсивно, а для взаимодействия малоактивной  $\text{CaO}$  и снятия пересыщения в этих условиях потребуется менее 5 минут. Экспериментальные данные применения парогазового инжектора с температурой подачи пара  $120 - 140^\circ\text{C}$ , монтированного на штуцер подачи жидкости в реактор-смеситель показали высокую эффективность по

снятию пересыщения – концентрация сульфат-иона в жидкости смесителя падала в 1,5-2 раза [18]. Такая эффективность работы объясняется не только температурным режимом смеси, но и высокой интенсивностью перемешивания реагентов в инжекторе, что способствует быстрому протеканию реакции (1) образования сульфатов и их кристаллизации на поверхности твердой фазы в объеме жидкости.

Дальнейшее усовершенствование конструкции реактора-смесителя должно идти по пути разработки аппарата, имеющего две последовательно работающие реакционные зоны. Такое конструктивное решение позволило бы получить наилучшие условия для автоматического регулирования расхода известкового молока, создания и использования «кристаллической подкладки», снижающей пресыщение раствора по сульфату кальция и наиболее полного использования CaO, содержащегося в растворе известкового молока в виде малоактивной полусвязанной формы.

Так, в качестве первой реакционной зоны предложена барботажная секция, выполненная из трех провальных тарелок, где реакция проходит в пенном слое. В предлагаемой нами конструкции реактора-смесителя, представленной на рис. 3, грубодисперсная фаза известкового молока, отделенная на гидроциклоне после смесителя, карбонатное сырье (шлам рассолоочистки) и жидкость ТДС (содержащая хлорид аммония) с помощью парожидкостного инжектора (с температурой пара 120 – 140 °С) подаются в верхнюю барботажную секцию, работающую в пенном режиме.

Барботаж на провальных тарел-

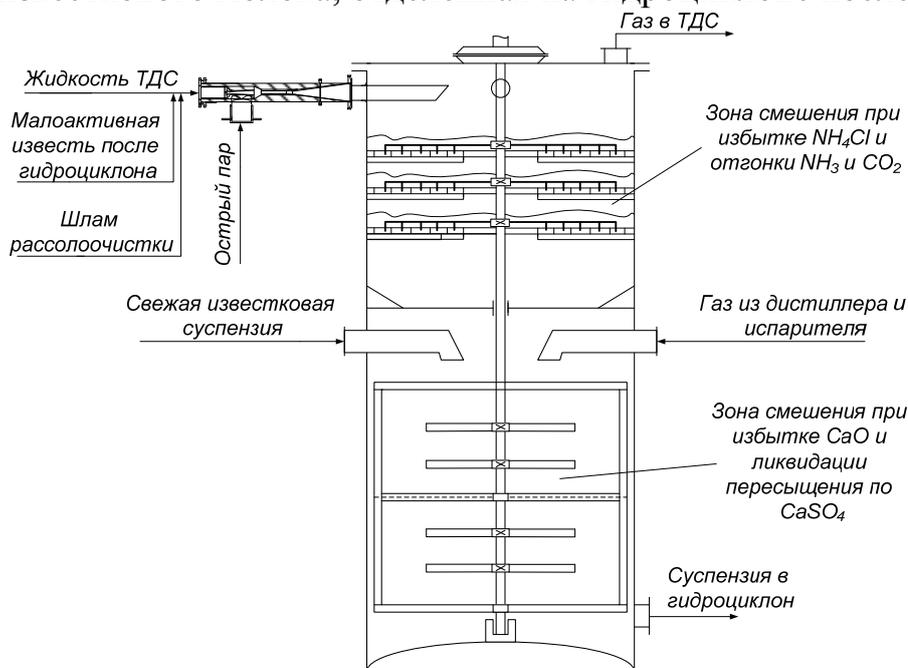


Рис. 3 – Принципиальная схема реактора-смесителя

ках может осуществляться подачей газа дистиллера и частичной подачей острого пара, с целью поддержания температуры реакционной массы в районе 96–99°С, что также интенсифицирует вступление в реакцию малоактивных форм извести. В свою очередь отгонка аммиака и испарение части воды при температуре 96–99°С, согласно экспериментальным данным, полученным на синтетической жидкости смесителя, приводит к интенсификации выпадения кристаллов ангидрита в объеме жидкости. Это объясняется тем, что одновременно с химической реакцией разложения хлорида аммония происходит частичная дистилляция аммиака и испарение воды, в результате чего температура смеси несколько снижается, а концентрация  $\text{Ca}^+$  возрастает, что приводит к кристаллизации и соосаждению карбоната и сульфата кальция.

Далее жидкость стекает в нижнюю зону, оборудованную рамной мешалкой, куда подается свежее известковое молоко. Эта зона выполняет функцию ликвидатора пересыщения раствора по сульфату кальция и завершения разложения хлорида аммония избытком активной извести, скорость которых по опытным данным составляет до 5 минут. В свою очередь, быстрый рост концентрации хлорида кальция в результате реакции разложения хлорида аммония способствует дальнейшей кристаллизации ангидрита в объеме жидкости на поверхности твердой фазы кристаллической затравки и кристаллах карбоната кальция.

Таким образом, проведенные нами исследования позволяют рекомендовать введение реагентов в реактор-смеситель с помощью парожидкостного инжектора, а в верхней части смесителя установить барботажные тарелки, под которые можно направить парогазовую смесь из дистиллера и часть острого пара для первичной отгонки аммиака. Все это позволит существенно сократить время пребывания реагентов, необходимое для снятия пересыщения по гипсу, в несколько раз уменьшить циркуляционный поток кристаллов ангидрита в реакторе смесителе, а также более полно использовать малоактивную часть известковой суспензии, утилизировать карбонаты шлама рассолоочиски, повысить содержание аммиака и  $\text{CO}_2$  в газе дистиллера.

### **Выводы**

1. В дистиллере содового производства имеет место значительное пересыщение по ангидриту. Инкрустации на стенках дистиллера могут образовываться за счет кристаллизации из раствора непосредственно ангидрита либо полугидрата сульфата кальция, который кристаллизуется из пересыщенного раствора на стенках дистиллера и постепенно переходит в ангидрит.

2. Эффективным методом предупреждения выпадения сульфатных инкрустаций в дистиллере является снятие пересыщения по сульфату в реакторе-смесителе.

3. Экспериментальные данные на синтетической жидкости реактора смесителя показали, что с ростом температуры интенсивность образования ангидрита увеличивается, следовательно увеличивается и скорость снятия пересыщения, которая при соответствующем температурном режиме, интенсивном смешении реагентов и в присутствии ангидритной прокладки составляет 5 – 10 минут.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют рекомендовать использование парожидкостного инжектора в качестве первичного смесителя и подогревателя реагентов, перед их подачей в промышленный реактор-смеситель, выполняющий функцию ликвидатора пересыщения.

5. Введение через инжектор циркуляционного потока твердой фазы и карбанатного сырья шлама рассолоочистки создает достаточное количество центров кристаллизации для быстрого снятия пересыщения в объеме жидкости. Отгонка части аммиака и воды непосредственно в смесителе на барботажных тарелках также способствует кристаллизации ангидрита и ускоряет процесс снятия пересыщения по гипсу.

**Список литературы:** 1. *Ткач, Г. А.* Производство соды по малоотходной технологии [Текст] / *Г. А. Ткач, В. А. Шапоров, В. М. Титов.* – Х.: ХГПУ, 1998. – 429 с. 2. *Коробочкин, В. В.* Производство карбоната натрия: учебное пособие [Текст] / *В. В. Коробочкин, Д. А. Горлушко, И. В. Фролова.* – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010 – 110 с. 3. *Onac, B. P.* Minerogenetic mechanisms occurring in the cave environment: an overview [Text] / *B. P. Onac, P. Forti* // *International Journal of Speleology.* – 2011. – Vol 40 (2). – pp. 79–98. 4. *Gainey, R. J.* CaSO<sub>4</sub> seeding prevents CaSO<sub>4</sub> scale [Text] / *R. J. Gainey, C. A. Thorp, E. A. Cadwallader.* // *Ind. Eng. Chem.* – 1963. – Vol. 55. – pp. 39–43. 5. *Lager, G. A.* A crystallographic study of the low-temperature dehydration products of gypsum CaSO<sub>4</sub>·0,50H<sub>2</sub>O and γ-CaSO<sub>4</sub> [Text] / *G. A. Lager.* // *Am. Mineral.* – 1984 – Vol. 69. – pp. 910–918. 6. *Kasikowski, T.* Utilization of distiller waste from ammonia-soda processing [Text] / *T. Kasikowski, R. Buczkowski, B. Dejewski, K. Peszynska-Bialczyk, E. Lemanowska, B. Iglinski* // *Journal of Cleaner Production.* – 2004. – Vol. 12, Issue 7. – P. 759–769. 7. *Husson, D.* Mechanism of calcium sulphate scale deposition on heat-transfer surfaces [Text] / *D. Husson, J. Zahavi* // *hid. Eng. Chem. Fund.* – 1970. – Vol. 9. – pp. 1–10. 8. *Krause, S.* Fouling of heat-transfer surfaces by crystallization and sedimentation [Text] / *S. Krause* // *Int. Chem. Eng.* – 1993. – Vol. 33 – 355 P. 9. *Крашенинников, С. А.* Технология кальцинированной соды и очищенного бикарбоната натрия / *С.А. Крашенинников.* – М. Высшая школа, 1985. – 287 с. 10. *Дрозин, Н. Н.* О механизме образования инкрустаций в дистиллере [Текст] / *Н. Н. Дрозин, Е. К. Овечкин, М. И. Куцина* // *Труды НИОХИМ.* – Харьков: НИОХИМ, 1959. – Том XII. – С. 97–109. 11. *Зеликин, М. Б.* Производство каустической соды химическими способами [Текст] / *М. Б. Зеликин.* – М.: Госатомиздат, 1961. – 230 с. 12. *Громова Е. Т.* К вопросу о предотвращении инкрустации в аппаратах и коммуникациях станции дистилляции содового производства [Текст] / *Е. Т. Громова* // *Журнал прикладной химии.* – 1961. – Т. 34. – С. 1502–1508. 13. *Südmalis, M.* Coprecipitation of CaCO<sub>3</sub> and CaSO<sub>4</sub> [Text] / *M. Südmalis, R. Sheikholeslami* // *Can. J. Chem. Eng.* – 2000. – Vol. 78. – pp. 21-31. 14. *Höfling, V.* Crystallization fouling of the aqueous two-component system CaSO<sub>4</sub>/CaCO<sub>3</sub> [Text] / *V. Höfling, W. Augustin, M. Bohnet* // *J. Trans. Phenomena.* – 2004. – Vol. 6. – pp. 99–109. 15. *Лукьянчиков, А. А.* Определение возможности ведения безинкрустационного процесса дистилляции при повышенных температурах [Текст] / *А. А. Лукьянчиков, А. Я. Лобойко, Е. Н. Михайлова* // *Труды НИОХИМ.* – Харьков: НИОХИМ, 2013. – Том 77. – С. 49 – 52. 16. *Михайлова, Е. Н.* Исследование возможности получения ангидритного режима дистилляции содового производства [Текст] / *Е. Н. Михайлова* // *Труды НИОХИМ.* – Харьков: НИОХИМ, 2005. – Том 74. – С. 18 – 21. 17. *Соколов, Е. Я.* Струйные аппараты [Текст] / *Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер.* – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с. 18. *Филоненко, Д. В.* Исследование процесса разложения хлорида аммония гидроксидом кальция на модели реактора инжекторного смешения [Текст] / *Д. В. Филоненко, М. А. Цейтлин, В. Ф. Райко, А. В. Шестопалов* // *Уральский научный вестник (Оралдың ғылым жаршысы). Серия «Технические науки».* – Уральск: ТОО «Уралнаучкнига», 2014. – № 41 (120) – С. 77 – 84.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Tkach, G. A., Shaporev, V. P., Titov, V. M.* (1998) Production of soda on low-waste technology, Kharckov, KHGPU. 2. *Korobochkin, V. V., Gorlushko, D. A., Frolova, I. V.* (2010) Production of carbonate of sodium, Tomsk: Tomsk polytechnic university. 3. *Onac, B. P., Forti P.* (2011). Minerogenetic mechanisms occurring in the cave environment: an overview. *International Journal of Speleology*, 40 (2), 79-98. Tampa, FL (USA). ISSN 0392-6672. DOI: 10.5038/1827-806X.40.2.1 4. *Gainey, R. J., Thorp, C. A., Cadwallader, E. A.* (1963). CaSO<sub>4</sub> seeding prevents CaSO<sub>4</sub> scale. *Ind. Eng. Chem.*, V. 55, 39-43. DOI: 10.1021/ie50639a009 5. *Lager, G. A.* (1984) A crystallographic study of the low-temperature dehydration products of gypsum CaSO<sub>4</sub>·0,50H<sub>2</sub>O. and γ-CaSO<sub>4</sub>, *Am. Mineral.* V. 69, 910-918. 6. *Kasikowski, T. et all.* (2004) Utilization of distiller waste from ammonia-soda processing. *Journal of Cleaner Production*, V. 12 (7), 759-769. doi:10.1016/s0959-6526(03)00120-3 7. *Husson, D., Zahavi, J.* (1970) Mechanism of calcium sulphate scale deposition on heat-transfer surfaces, *hid. Eng. Chem. Fund.*, 9, 1-10. 8. *Krause, S.* (1993) Fouling of heat-transfer surfaces by crystallization and sedimentation, *Int. Chem. Eng.*, 33: 355. 9. *Krashennnikov, S. A.* Technology of the calcinated soda and cleared bykarbonata of sodium, Moscow: High school. 10. *Drozin, N. N., Ovechkin, E. K. Kutsina M. I.* (1959). About the mechanism of formation of encrustations in dystyllere. Kharckov: NIOCHIM, V. 12, 97–109. 11. *Zelikin, M. B.*

(1961) Production of caustic soda by chemical methods. Moscow: Gosatomizdat. **12.** Gromova E. T. (1961) To the question about prevention of encrustation in aparatakh and communications of the station of distillation of soda production. Journal of Applied Chemistry, V. 34, 1502–1508 **13.** Südmalis, M., Sheikholeslami, R. (2000) Coprecipitation of CaCO<sub>3</sub> and CaSO<sub>4</sub>, Can. J. Chem. Eng. V. 78, 21-31. **14.** Höfling, V., Augustin, W., and Bohnet, M. (2004). Crystallization fouling of the aqueous two-component system CaSO<sub>4</sub>/CaCO<sub>3</sub>, J. Trans. Phenomena. V. 6., 99-109. **15.** Luk'yanchikov, A. A., Loboyko A. Ya., Mikhaylova E. N. (2013). Determination of opportunity of non-crusting distillation process under elevated temperatures. Kharckov: NIOCHIM, V. 77, 49–52. **16.** Mikhaylova E. N. (2005) Study in anhydride condition ensuring at soda ash plant distillation unit. Kharckov: NIOCHIM, V. 74, 18–21. **17.** Sokolov, E. Ya. (1989) Streams vehicles. Moscow: Москва: Energoatomizdat. **18.** Filonenko, D. V. Rayko, V. F., Shestopalov, O. V. (2014) Research of process decomposition of salmiac by calcium hydroxide on the model of reactor of the injector mixing. Ural scientific announcer (Оралдың ғылым жаршысы). Ural'sk: Uralnauchkniga, V. 41 (120), 77 – 84.

Надійшла (received) 18.12.2014

УДК 628.3:658.512:66.011

**О. К. НЕСТЕРЕНКО**, студентка, НТУУ «КПІ», Київ;  
**Т. В. БОЙКО**, канд. техн. наук, зав. каф., НТУУ «КПІ», Київ;  
**Ю. О. БЕЗНОСИК**, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ», Київ

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАСОПЕРЕНОСЕННЯ ГЕКСАНУ В ПОРАХ СИЛІКАГЕЛЮ

У статті на основі отриманих експериментальних даних, отриманих на лабораторній установці, розглянуто процес масопереносу гексану в порах зерна силікагелю. Показано, що процес масопереносу описується дифузійною моделлю, яка може бути апроксимована на різних ділянках запропонованими математичними залежностями. Розраховано чисельні значення коефіцієнта дифузії та встановлено, що вони не залежать від температури. Визначені швидкості руху газу в порах.

**Ключові слова:** процес, масопереносу, гексану, дифузійна, модель, зерна, силікагелю, порах, математичними, залежностями.

**Вступ.** Процеси масопереносу відіграють ключову роль у багатьох промислових синтезах. Особливо це стосується тих технологічних процесів, які включають стадію гетерогенного каталізу. Зокрема обов'язковою стадією гетерогенно-каталітичної реакції є перенесення речовини до активної поверхні, як правило твердої частинки. Швидкість такого процесу може бути лімітована дифузією реагентів до поверхні частинки та дифузією реагентів у порах зерна каталізатора. Таке дифузійне гальмування процесу зазвичай супроводжується ускладненнями із відводом тепла реакції, що призводить до перепадів температури всередині пористого зерна каталізатора, а також між поверхнею частинки та потоком реагентів [1]. Крім того, додаткові ускладнення, часом досить суттєві, вносять гідродинамічні умови проведення процесу, такі як характер руху газу чи рідини, які призводять до виникнення конвективного переносу тепла і речовини [2, 3]. Тому для регулювання технологічних параметрів та успішного керування промисловими процесами дуже важливо знати теоретичне підґрунтя процесів та взаємозв'язки між ними, які впливають із теоретичних законів та рівнянь масопереносу.

© О. К. НЕСТЕРЕНКО, Т. В. БОЙКО, Ю. О. БЕЗНОСИК, 2014