

- 3 Slavinskaya E.M. Studies of the mechanism of ammonia oxidation into nitrous oxide over Mn-Bi-O/ α -Al₂O₃ catalyst / [E. M. Slavinskaya, S.A. Veniaminov, P. Notté, et al.] // Journal of Catalysis. – 2004. – V. 222, № 1. – P. 129–142.
- 4 Bliznjyk O.N. Production of nitrogen (I) oxide by low-temperature oxidation of ammonium / O.N. Bliznjyk, V.V. Prezhdo // Polish Journal of Applied Chemistry. – Poland, Wydawnictwo PZWL, 2003. – V. 47, № 2. – P. 65–72.
- 5 Загайнов И.В. Наноструктурированные церий-содержащие катализаторы низкотемпературного окисления CO / И.В. Загайнов, Е.А. Трусова, Е.Ю. Либерман // Успехи в химии и химической технологии. 2003. – Т. XXIV, № 9 (114). – С. 65–72.
- 6 Масалітіна Н.Ю. Нітроген (I) оксид. Дослідження процесу одержання шляхом низкотемпературного окиснення аміаку / Н.Ю. Масалітіна, А.С. Савенков, О.М. Близнюк, О.М. Огурцов // Хімічна промисловість України. – 2014. – №5(124). – С. 54–58.

УДК 661.566.097.3

Г.С. Привалова; А.Н. Бутенко, докт. техн. наук; А.Я. Лобойко, докт. техн. наук (НТУ «ХПИ»); В.А. Панасенко, докт. техн. наук (ГУ «НИОХИМ»)

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ НЕПЛАТИНОВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ОКИСЛЕНИЯ АММИАКА ДО ОКСИДА АЗОТА (II) В ПРОИЗВОДСТВЕ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ

У статті представлені відомості щодо двоступеневих каталітичних систем і неплатинових каталізаторів. Наведено склади та особливості приготування різних контактів та розглянуті перспективи їх промислового використання. Підкреслена актуальність і необхідність пошуку та розробки нових складів каталітичних мас.

В статье представлены сведения о двухступенчатых каталитических системах и неплатиновых катализаторах. Приведены составы и особенности приготовления различных контактов и рассмотрены перспективы их промышленного использования. Подчеркнута актуальность и необходимость поиска и разработки новых составов каталитических масс.

In paper presents information on the two-stage catalytic systems and non-platinum catalysts. The compositions and features the preparation of various contacts are cited and the prospects for their industrial using are reveiwed. The urgency and the need to find and develop new formulations of catalytic mass are emphasized.

Ключевые слова: неплатиновый катализатор, окисление аммиака, оксид азота (II), платиноиды, двухступенчатый катализатор.

Keywords: nonplatinum catalyser, ammonia oxidation, nitrogen oxide (II), platinoids, two-stage catalyser.

На современном этапе развития химической промышленности единственным способом получения азотной кислоты является каталитическое окисление аммиака кислородом воздуха до оксида азота (II) с последующим его доокислением до оксида азота (IV) и поглощением полученных оксидов водой. Окисление аммиака до оксида азота (II) принадлежит к числу наиболее

важных и сложных процессов, который протекает только в присутствии селективного катализатора [1].

На азотно-туковых заводах в качестве такого катализатора, как правило, применяют металлические платиноидные системы, состоящие в основном из платины, родия, рутения и палладия.

Первоначально в производстве азотной кислоты использовали катализатор в форме спирали, выполненной из платиновой жести. Эти спирали состояли из двух полос (ровной и гофрированной), имеющих ширину 20 мм и свернутых вместе в спираль диаметром от 75 мм до 100 мм.

На сегодняшний день процесс каталитической конверсии аммиака осуществляют по двум возможным вариантам: либо на чисто платиноидном катализаторе, либо с применением двухступенчатой системы, где в качестве первой ступени используют платиноидные сетки, а второй - оксидный неплатиновый катализатор, как правило, на основе оксида железа (III).

В агрегатах низкого давления (1 кг/см^2) устанавливают 2-4 вязанные или тканые сетки из сплава платины с Pd, Rh, Ru, массовая доля которых составляет соответственно 15 %, 3,5 % и 0,5 %, а в агрегатах высокого давления УКЛ-7 ($7,3 \text{ кг/см}^2$) и среднего давления АК-72 ($3,5 \text{ кг/см}^2$) – 13-16 аналогичных сеток из сплава платины с Rh и Ru, массовая доля которых составляет 4 % и 3,5 % соответственно.

Сетчатая форма удобна в эксплуатации, характеризуется минимальным вложением платиноидов, позволяет применять наиболее простой и удобный в эксплуатации тип контактного аппарата конусного типа. Для изготовления сеток используют проволоку диаметром от 0,06 мм до 0,09 мм.

ОАО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов» (Россия) является единственным в странах СНГ производителем каталитических систем, состоящих из вязанных и тканых платиновых сеток; пакетов из сплавов на основе палладия для улавливания платины; оксидного сотового катализатора, не содержащего металлы платиновой группы [2].

Недостатками платиновых сеток, как катализатора, является их склонность к механической эрозии при температуре конверсии за счет механических примесей, содержащихся в аммиаке и воздухе, и химической - под воздействием реакционной смеси, а также подверженность влиянию каталитических ядов, что часто приводит к невозвратимым потерям дорогостоящего катализатора и снижению выхода оксидов азота.

Разработанные платиноидные катализаторы в достаточной мере удовлетворяют условиям процесса каталитического окисления аммиака до оксида азота (II). Однако, вследствие дороговизны и дефицитности платиноидов, особенно в Украине, ведутся непрерывные исследования по разработке новых рецептур катализаторов в двух направлениях: замена платиноидов на более дешевые металлы и создание конкурентного неплатинового катализатора на основе оксидов металлов.

Двухступенчатый катализатор. В процессе работы платиноидные сетки разрушаются, образуя безвозвратные потери, которые составляют от 0,048 г платины на 1 т азотной кислоты при атмосферном давлении и до (0,16-0,18) г на 1 т азотной кислоты при давлении 8 кг/см^2 . Анализ этих потерь показал, что последние по ходу газа сетки работают неэффективно и поэтому могут быть заменены на оксидный катализатор [3-4]. В 60-е годы для агрегатов, работающих под атмосферным давлением, ГИАПом разработана двухступенчатая каталитическая система, состоящая из платиноидной сетки и слоя оксидного таблетированного железохромового катализатора марки КН-2. Применение указанной системы обеспечило значительное снижение использования платиноидов и их безвозвратных потерь. Для агрегатов УКЛ-7, работающих при повышенном давлении, в 70-е годы был разработан более дешевый и термоста-

бильный железоалюминиевый гранулированный катализатор марки НК-2У, в котором массовая доля Fe_2O_3 составляет 85 %, Al_2O_3 – 15 %.

Однако, зернистые катализаторы обладают рядом характерных недостатков: высокой истираемостью и пылением во время эксплуатации, неоднородностью и высоким гидравлическим сопротивлением слоя, необходимостью изготовления загрузочных корзин. Неоднородности упаковки зерен и толщины слоя катализатора по сечению реактора могут приводить к проскоку аммиака, что способствует снижению степени конверсии его до оксида азота (II) и повышению взрывоопасности процесса. Значительно улучшить распределение аммиачно-воздушной смеси (АВС) по сечению реактора можно путем замены зернистого катализатора под пакетом сеток на блоки сотовой структуры с параллельными однонаправленными каналами. Обеспечивая гидродинамические преимущества (однородность и низкий перепад давления), упорядоченный слой не требует изготовления загрузочных корзин.

В результате замены зернистого катализатора на блочный сотовой структуры удастся стабилизировать процесс окисления и одновременно снизить интенсивность механического разрушения платиноидного катализатора и его потери [5, 6]. Указанные катализаторы активно разрабатываются [7-9], а также предлагаются математические модели окисления на них [10].

Автором [11] предложен способ приготовления катализатора ИК-42-1 блочной сотовой структуры методом смешения гематитов различного способа производства и связующего по технологии термомеханохимической активации. Массовая доля компонентов в катализаторе составляет от 75 % до 80 % оксида железа (III), от 15 % до 20 % оксида алюминия и 5 % алюмосиликатного волокна. Показана эффективность его применения в качестве второй ступени окисления аммиака в двухступенчатой каталитической системе, состоящей из 9 платиноидных сеток на первой ступени и слоя катализатора сотовой структуры на второй. В ходе испытаний степень конверсии аммиака в оксид азота (II) соответствовала показателям работы агрегата УКЛ-7 на одноступенчатой системе с 12 платиноидными сетками.

Предлагается также технология изготовления блочного катализатора сотовой структуры, в которой модифицирование железооксидной катализаторной шихты осуществляется на стадии подготовки и экструзии. Проведены опытно-промышленные испытания блочного катализатора и показана эффективность его применения в качестве второй ступени конверсии аммиака в каталитической системе с 8 платиноидными сетками. В условиях, идентичных с промышленными, массовая доля выхода оксида азота (II) составила от 92,7 % до 94,2 %, что соответствует показателям работы агрегата УКЛ на чисто платиноидном катализаторе с 12 сетками [12-13].

В работе [14] экспериментально показано, что каталитическая система, состоящая из 6-11 тканых или редковязанных платиноидных сеток и слоя блочного катализатора, приводит к увеличению массовой доли выхода оксида азота (II) на них в среднем на (2-3) % по сравнению с чисто платиноидным вариантом оформления процесса и обосновано использование палладийсодержащих улавливающих сеток в составе двухступенчатой системы окисления аммиака с вязаными платиноидными сетками.

Предложена катализаторная система, состоящая из 4 платиноидных сеток и слоя блочного катализатора сотовой структуры с массовой долей металлов платиноидной группы от 0,1 % до 5,0 %, что позволяет уменьшить количество катализаторных и улавливающих платиноидных сеток [15].

Разрабатываемые кремнеземистые стекловолоконистые тканые катализаторы (КСВК) с массовой долей платины или палладия от 0,01% до 0,10 % демонстрируют высокую активность в реакции окисления аммиака до оксида азота (II), соизмеримую с активностью штатных каталитических платиноид-

ных сеток, масса платины в которых на три порядка больше, чем в КСВК. Достигнутая к настоящему времени селективность КСВК-систем составляет от 85 % до 90 %, что несколько ниже, чем у платиноидных металлических сеток, и допускает реализацию КСВК-пакетов в реакторах конверсии аммиака пока в форме комбинированной с платиноидным пакетом схемы. Однако, даже эта схема позволяет сократить массовую долю платиноидов в каталитическом пакете реактора на (20-50) % и в два раза уменьшить их потери (0,06 г платины на тонну выработанной кислоты против штатного показателя – 0,12 г). Данная структура катализаторного пакета в настоящее время реализуется в промышленных реакторах некоторых российских предприятий, производящих азотную кислоту [16-18].

Неплатиновые катализаторы. Причина поиска неплатинового катализатора на основе оксидов различных металлов заключается в высокой стоимости и постоянно увеличивающемся дефиците платиноидов.

В области разработки и внедрения неплатиновых катализаторов проведено огромное количество исследований, однако на данный момент проблема поиска альтернативного платине контакта остается актуальной.

Из большого числа предложенных оксидных катализаторов ни один не нашел самостоятельного промышленного применения, некоторые из них имеют высокую активность в начале работы, но снижают ее в процессе эксплуатации. Кроме того, некоторые катализаторы работают в узком интервале температур.

Активность по данным авторов [19] изменяется в ряду: $\text{Co}_3\text{O}_4 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{Mn}_2\text{O}_3 > \text{NiO} > \text{CuO} > \text{V}_2\text{O}_5 > \text{TiO}_2 > \text{Sc}_2\text{O}_3$, в то время как селективность изменяется $\text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{Mn}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Co}_3\text{O}_4$.

Разработана система $\text{A}_{3-x}\text{B}_x\text{O}_4$, где А – катионы Mn или Cr, В – Co, а значение «х» не превышает 3, которая показывает селективность до 96 % [20].

Показано положительное влияние добавок LiO_2 и BeO на хром (III) оксидный катализатор в работе [21], а оксида церия (IV) – кобальт (II, III) оксидный катализатор [22].

Предлагается катализатор на основе оксидов кобальта (II, III), хрома (III) и циркония (IV) с массовой долей компонентов, %: 70-75, 3-5 и 20-25 соответственно, который позволяет обеспечить селективность по оксиду азота (II) до 97,5 %, а также снизить выход оксида азота (I) в 4,5 раза [23].

Разработан оксидный катализатор на основе оксидов железа (III) и алюминия с добавкой V_2O_5 для повышения термостабильности и прочности контакта при сохранении высокой селективности [24].

Предлагаются также катализаторы на основе оксида железа (III) с модифицирующими добавками оксидов Cu (II), Mn (II), Cd (II), Zn (II), Ni (II), Co (II), Mg (II) и Ce(II) [25], оксидов Ba (II), Sr (II), Mg (II), Ce (IV), Be (II) и оксидом железа (III) α -модификации [26], с добавками оксидов Zr (IV), Mg (II), Al (III), массовая доля которых соответственно составляет, %: от 15 до 25; от 0,5 до 1,0 и от 0,1 до 0,3 [27], обеспечивающие повышение селективности по оксиду азота (II) до (94,5–95,0) %.

Разработан модифицированный оксидный катализатор процесса селективного окисления аммиака до оксида азота (II), в котором используют оксидную кобальт-хром активную массу и пемзу в качестве носителя [28].

Промышленное применение самостоятельно неплатиновых катализаторов осложнено из-за высоких температур зажигания, узкого рабочего интервала температур, быстрой потери активности и снижения выхода оксида азота (II) по сравнению с платиноидными катализаторами.

Несмотря на многолетнюю историю, вопрос разработки конкурентоспособного, эффективного и менее дорогостоящего катализатора окисления аммиака до оксидов азота (II) остается актуальным и до настоящего времени.

Литература

- 1 Производство азотной кислоты в агрегатах большой единичной мощности / М. Бонне, Н.Д. Заичко, М.М. Караваев [и др.]; под ред. В.М. Олевского. – М.: Химия, 1985. – 400 с., ил.
- 2 Гуцин Г.М. Сетки и каталитические системы на основе платины и палладия для азотной промышленности / Г.М. Гуцин, В.П. Черемных, Г.М. Симков // Драгоценные камни. Драгоценные металлы. – 2005. – №8. – С. 163–166.
- 3 Караваев М.М. Каталитическое окисление аммиака / М.М. Караваев, А.П. Засорин, Н.Ф. Клещев – М.: Химия. – 1983. – 232 с.
- 4 Технология связанного азота / В.И. Атрошенко, А.М. Алексеев, А.П. Засорин [и др.] – К.: Вища шк. Головное изд-во – 1985. – 327 с.
- 5 Неплатиновый катализатор сотовой структуры для окисления аммиака / В.И. Ванчурин, В.С. Бесков, Е.А. Бруштейн [и др.] // Химическая промышленность. – 1997. – №10. – С. 694–696.
- 6 Разработка и применение двухступенчатой системы окисления аммиака в производстве азотной кислоты с использованием сотовых оксидных катализаторов / В.А. Садыков, Е.А. Бруштейн, Л.А. Исупова [и др.] // Химическая промышленность. – 1997. – №12. – С. 819–824.
- 7 Пат. 2063267 Российская Федерация, МПК6 С1 В 01 J 23/83, В 01 J 23/94, В 01 J 23/83, В 01 J 101:32. Катализатор окисления на основе оксидов со структурой перовскита / Тихов С.Ф., Садыков В.А., Кимхай О.Н., Розовский А. Я., Лунин В.В., Третьяков В.Ф.; заявитель и патентообладатель Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. – № 94042794/04; заявл. 02.12.94; опубл. 10.07.96.
- 8 Пат. 2117528 Российская Федерация, В 01 J 23/83, В 01 J 21/04, С 01 В 21/26. Катализатор окисления аммиака / Исупова Л.А.; Садыков В.А.; Снегуренко О.И. [и др.]; заявитель и патентообладатель Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. – № 97103800/04; заявл. 12.03.1997; опубл. 20.08.1998
- 9 Пат. 2207904 Российская Федерация, МПК7 В 01 J 23/84, В 01 J 21/04, С 01 В 21/26. Блочный катализатор сотовой структуры селективного окисления аммиака до оксида азота / Кирчанов А.А., Макаренко М.Г., Сотников В.В.; заявитель и патентообладатель Кирчанов А.А. – № 2002113795/04; заявл. 27.05.2002, опубл. 10.07.2003
- 10 Моделирование окисления аммиака на оксидном блочном катализаторе / В.С. Бесков В.С., Е.А. Бруштейн, В.И. Ванчурин [и др.] // Катализ в промышленности – 2010. – №3. – С. 45–48.
- 11 Кругляков В. Ю. Железо-оксидный катализатор блочно-сотовой структуры для процесса окисления аммиака и технология его приготовления: автореферат диссертации канд. техн. наук: 02.00.15 – Новосибирск, 2010. – 19 с.
- 12 Аслан М. [Технология приготовления блочного катализатора сотовой структуры для II ступени окисления аммиака](#): автореферат диссертации канд. техн. наук: 05.17.01 – Москва, 2010. – 16 с.
- 13 Ванчурин В.И. [Технология блочных катализаторов и сорбентов для окисления аммиака и диоксида серы](#) : автореферат диссертации канд. техн. наук.: спец. 05.17.01 «Технология неорганических веществ» – Москва, 2001. – 32 с.
- 14 Головня Е.В. Окисление аммиака на платиноидных сетках и блочном оксидном катализаторе сотовой структуры: автореферат диссертации канд. техн. наук: 05.17.01 – Москва, 2009. – 21 с.

- 15 Пат. 82046 Україна, МПК (2013.01) C01B 21/26, B01J 23/72, B01J 23/74, B01J 21/00. Катализатор конверсії аміаку / Рябчиков О.О.; заявник і власник охоронного документа Рябчиков О.О., Україна. – № u 2012 11117; заявл. 24.09.2012; опубл. 25.07.2013, Бюл. №14.
- 16 Пат. 2069584 Российская Федерация, МПК6 В 01 J 23/38, 23/70 Катализатор для химических процессов, например, для конверсии аммиака, окисления углеводов, диоксида серы, очистки выхлопных газов / В. В. Барелко, П.И. Хальзов, В.Я. Онищенко [и др.]; заявитель и патентообладатель В.В. Барелко, П. И. Хальзов, В. Я. Онищенко [и др.] – № 94042794/04; заявл. 24.11.94; опубл. 27.11.96, Бюл. № 33.
- 17 Пат. 2069585 Российская Федерация, В 01 J 23/42, С 01 В 21/06. Каталитический элемент для конверсии аммиака / В. В. Барелко, П.И. Хальзов, В.Я. Онищенко [и др.]; заявитель и патентообладатель В.В. Барелко, П. И.Хальзов, В.Я.Онищенко – № 94006708/04; заявл. 24.02.1994; опубл. 27.11.1996, Бюл. №33.
- 18 Пат. 2160157 Российская Федерация, МПК В 01 J 23/58, В 01 J 23/63, В 01 J 23/78, В 01 J 21/06, С 01 В 21/26. Катализатор для конверсии аммиака / В. В. Барелко, Б. С. Бальжинимаев, В. Я. Онищенко [и др.]; заявитель и патентообладатель Институт проблем химической физики РАН; Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН; Закрытое акционерное общество "Катализаторная компания"; Закрытое акционерное общество "Химфист" - № 99123026/04 ; заявл. 02.11.1999; опубл. 10.12.2000 ; Бюл. № 34.
- 19 ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л. Катализатори в технології неорганічних речовин / Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, О. Я. ЛОБОЙКО, А. М. БУТЕНКО [та ін.]; за ред. Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО, О.Я. ЛОБОЙКО; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - Х.: Підручник, 2013. – 219 с.
- 20 Пат. 2185279 (B1) EP, МКИ B01J 23/00; B01J 23/86; B01J 23/889; C 01B 21/26; C01B 21/38. Production of nitric oxide by oxidation of ammonia in presence of a mixed metal oxide catalyst / Waller David, assignor to YARA International ASA 0202 Oslo (NO); Application 22.08.2008 ; Published 19.05.2010.
- 21 Каналина В. С. Оксидные катализаторы окисления аммиака: автореферат диссертации докт. техн. наук: 05.17.01 – С–Пб., 1999. – 40 с.
- 22 Jan Petryk Cobalt oxide catalysts for ammonia oxidation activated with cerium and lanthanum / Jan Petryk, Ewa Kołakowska // Applied Catalysis B: Environmental. – 2010. – №24. – p. 121–128.
- 23 Пат. 87611 Україна, МПК (2009) C2 B01 J 23/84, B01J 23/46, C01B 21/26. Катализатор для другого ступеня окиснення аміаку / Близнюк О.М., Савенков А.С., Ратушна Л.М., Скляров В.Л., Антонов О.М.; заявник і власник охоронного документа Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № а 2008 00210 ; заявл. 04.01.2008; опубл. 27.07.2009, Бюл. №14.
- 24 Декл. пат. на винахід України 50996 А6 B01J 23/76. Катализатор для окиснення аміаку / Савенков А. С., Ратушна Л. М., Рищенко І. М., Противень І. М., Цапко Д. Ю.; заявник та та власник охоронного документа Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; заявл. 12.11.2001 ; опубл. 15.11.2002, Бюл. № 11.
- 25 Декл. пат. на винахід України 35424 А6 B01J 23/76. Катализатор для окиснення аміаку / Захарченко М. І., Середенко В. В.; заявник та власник охоронного документа Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; заявл. 12.10.1999; опубл. 15.03.2001, Бюл. № 2.

- 26 Декл. пат. на винахід України 47971 А6 В01J 23/76. Каталізатор для окиснення аміаку / Захарченко М. І., Противень І. М.; заявник та власник охоронного документа Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; заявл. 18.12.2001; опубл. 15.07.2002, Бюл. № 7.
- 27 Пат. 87626 Україна, МПК (2009) С2 В01J 37/04, В01J 37/08, В01J 23/745, В01J 21/06, В01J 21/10, С01В 21/26. Спосіб одержання каталізатора для другого ступеня окиснення аміаку / Близнюк О.М., Савенков А.С., Семченко Г.Д., Ратушна Л.М.; заявник і власник охоронного документа Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № а 2008 05682; заявл. 30.04.2008; опубл. 27.07.2009, Бюл. №14.
- 28 Пат. на корисну модель 79474 Україна, МПК С 01В 21/26 Спосіб приготування модифікованого оксидного каталізатора процесу селективного окиснення амоніаку до нітроген (II) оксиду / Лобойко О.Я., Бутенко А.М., Юрченко Г.О.; заявник та власник охоронного документа Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № u 2012 11798; заявл. 12.10.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. №8.

УДК 661.185:66.02

*А.І. Дзевочко; М.О. Подустов, докт. техн. наук (НТУ «ХПІ»);
А.П. Заїкін, канд. техн. наук (ДУ «НІОХІМ»)*

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ МАСООБМІНУ У ТРУБЧАСТОМУ ПЛІВКОВОМУ РЕАКТОРІ СУЛЬФАТУВАННЯ

Стаття присвячена аналізу взаємодії двофазних потоків в процесі сульфатування органічної сировини газоподібним триоксидом сірки у плівковому трубчастому реакторі. Проведено аналіз рівнянь, що описують даний процес, показано складність в проведенні експериментальних досліджень. На основі детального аналізу рекомендовано рівняння для визначення коефіцієнту масо-передачі, що буде використане при математичному моделюванні процесу.

Статья посвящена анализу взаимодействия двухфазных потоков в процессе сульфатирования органического сырья газообразным триоксидом серы в пленочном трубчатом реакторе. Проведен анализ уравнений, которые описывают данный процесс, показана сложность в проведении экспериментальных исследований. На основе детального анализа рекомендовано уравнение для определения коэффициента массопередачи, которое будет использовано при математическом моделировании процесса.

The article is devoted to analysis of the interaction of two-phase flows in the process of sulfation of organic materials with gaseous sulfur trioxide into a film reactor tube. A thorough analysis of the equations which describe this process was held, a significant difficulty in conducting experimental research was shown. On the basis of a detailed analysis, the recommended equation for determining the mass transfer coefficient that will be used in the mathematical model.

Ключові слова: масообмін, сульфатування, органічна сировина, плівковий реактор, пограничний шар, дифузія, математична модель.

Keywords: mass transfer, sulfation, organic substance, film reactor, boundary layer, diffusion, a mathematical model.