

пени кандидата технических наук / Мубарков Рифгат Гусманович ; Ангарский государственный технологический институт. – Ангарск, 1998. – 132 с.

18. **Подоплелов, Е.В.** Массообмен между газом и жидкостью при получении дихлорэтана / Е.В. Подоплелов, А.В. Бальчугов, Б.А. Ульянов // Известия высших учебных

заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2006. – Т. 49. – № 8. – С. 92-96.

19. **Бальчугов, А.В.** Реактор синтеза 1,2-дихлорэтана с комбинированным способом отвода теплоты / А.В. Бальчугов, Е.В. Громова, Е.В. Подоплелов, Б.А. Ульянов // Химическая технология. – 2008. – Т. 9. – № 1. – С. 37-41.

УДК 630\*866.1.002.6

**Подоплелов Евгений Викторович,**  
к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Машины и аппараты химических производств»,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: uch\_sovet@angtu.ru

**Петрушин Георгий Александрович,**  
обучающийся, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: georg.petrushin@yandex.ru

**Петрушина Анна Дмитриевна,**  
обучающаяся, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: tut.ann4@yandex.ru

## КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАКТОРОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПРОЦЕССОВ

*Podoplelov E.V., Petrushin G.A., Petrushina A.D.*

### DESIGN FEATURES OF REACTORS FOR CARRYING OUT GAS-LIQUID PROCESSES

**Аннотация.** В работе приведены основные конструкции реакторов для проведения газожидкостных процессов, в частности, рассмотрен процесс жидкофазного хлорирования этилена и его аппаратурное оформление. Проанализированы основные способы получения 1,2-дихлорэтана, отмечены их преимущества и недостатки. В качестве альтернативного варианта основным способам получения 1,2-дихлорэтана предложен новый способ получения с комбинированным отводом теплоты и добавлением в реагенты азота, отличающийся высокой селективностью процесса.

**Ключевые слова:** реактор, 1,2-дихлорэтан, этилен, хлор, селективность, процесс жидкофазного хлорирования этилена.

**Abstract.** The paper presents the basic designs of reactors for carrying out gas-liquid processes, in particular, the process of liquid-phase chlorination of ethylene and its instrumentation are considered. The main methods for producing 1,2-dichloroethane are analyzed, their advantages and disadvantages are noted. As an alternative to the main methods for producing 1,2-dichloroethane, a new production method with combined heat removal and the addition of nitrogen to the reagents, characterized by high selectivity of the process, has been proposed.

**Keywords:** reactor, 1,2-dichloroethane, ethylene, chlorine, selectivity, process of liquid-phase chlorination of ethylene.

Наиболее широкое распространение в промышленности для проведения гетерогенных реакций в системе газ - жидкость, в том числе для процесса жидкофазного хлорирования этилена, получили реакторы типа колонн с насадкой, барботажные колонны [1] и эжекционные аппараты [2].

Гетерогенные реакции в системе газ – жидкость происходят только в жидкой фазе, при этом для осуществления реакции необходимо, чтобы газообразный реагент был рас-

творён в жидкой фазе. Поэтому собственно химическому взаимодействию всегда предшествует физический процесс диффузии газа в жидкость. Реакторы для проведения процессов в системе газ – жидкость по конструкции похожи на абсорбционные аппараты, имеют большой объём и сравнительно просты в эксплуатации. Практически все реакторы работают непрерывно; реакторы полупериодического действия с непрерывной подачей газа применяются редко.

Размеры реакторов для проведения гетерогенных реакций в системе газ–жидкость зависят от величины межфазной поверхности.

В реакторах с насадкой (рис. 1) развивается большая поверхность контакта реагирующего газа и жидкости. Жидкость стекает по насадке 2 в виде тонкой плёнки, газ движется противотоком в жидкости, диффундируя внутрь объёма жидкости. Химическое взаимодействие, происходящее в объёме жидкости, заканчивается за время прохождения жидкостью слоя насадки. Слой насадки уложен на керамической решётке 3, закреплённой на опорах. Стенки реактора 1 изготовлены из стали и покрыты изнутри материалом, стойким к коррозионному воздействию среды.

В барботажных реакторах контакт газа с жидкостью осуществляется пропусканием пузырьков газа через слой жидкости. Если пузырьки газа достаточно малы, то образуется большая поверхность контакта фаз. Барботажные реакторы обеспечивают большее время пребывания жидкой фазы и поэтому используются для проведения реакций с небольшой скоростью.

По конструкции барботажные реакторы делятся на аппараты колонного типа с тарелками и аппараты с барботажем в массе жидкости. Более распространённым является первый тип, причём конструкции этих аппаратов практически не отличаются от конструкций абсорбционных колонн с колпачковыми или ситчатыми тарелками.

Реакторы с барботажем в массе жидкости применяются в частности, при получении 1,1-дихлорэтана из хлора и этана. Конструкция аппарата непрерывного действия представлена на (рис. 2).

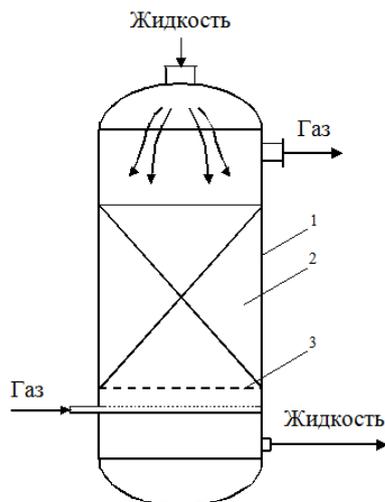


Рисунок 1 – Реактор с насадкой: 1 – реактор, 2 – слой насадки, 3 – керамическая решётка

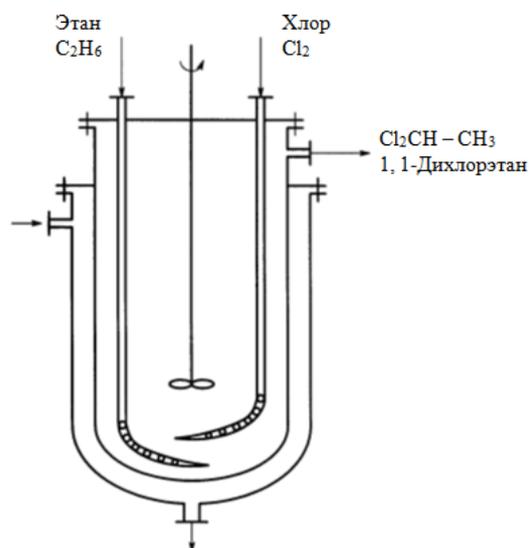


Рисунок 2 – Реактор для получения 1,1-дихлорэтана

Реакция между хлором и этаном (рис. 2.) происходит в жидкой массе 1,1-дихлорэтана при температуре 40 °С. Газообразный хлор Cl<sub>2</sub> и этан C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> поступают через отдельные трубопроводы и барботируют в 1,1-дихлорэтан, которым заполнен реактор. Продукты реакции удаляются непрерывно: постоянная температура в реакционном объёме обеспечивается подачей охлаждённой до 10 °С воды в рубашку аппарата.

В АО «ИркутскНИИхиммаш» разработан новый реактор жидкофазного хлорирования этилена с эжекционными смесителями (рис. 3).

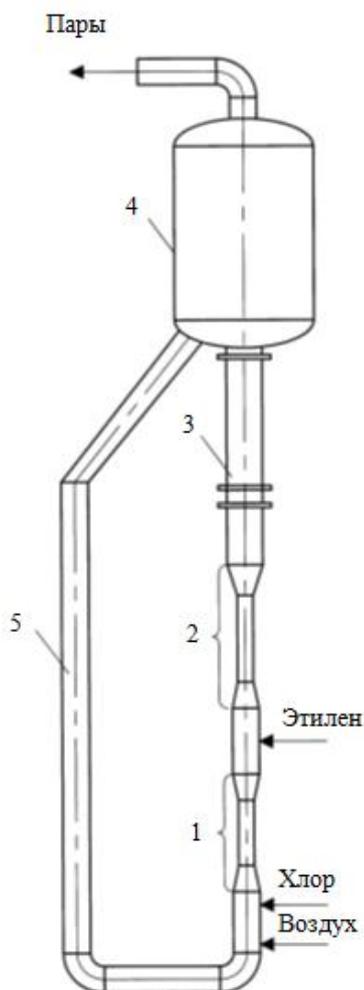


Рисунок 3 – Опытно-промышленный реактор:

- 1, 2 - эжекционные смесители хлора и этилена; 3 - газлифтная труба; 4 – сепаратор; 5 – циркуляционная труба.

Реактор с эжекционными смесителями [3] (рис. 3) представляет собой аппарат высотой 16 м. Основными элементами реактора являются: эжекционные смесители хлора (1) и этилена (2), газлифтная труба (3), сепаратор (4), циркуляционная труба (5). Аппарат заполнен жидким 1,2-дихлорэтаном. В смесителях струя газа эжектирует поступающую снизу рабочую среду. Полное растворение газа происходит в камере смешения. Диффузор служит переходным участком между камерой смешения и расположенным выше трубопроводом.

При движении вверх по газлифтной трубе (3) статическое давление жидкости уменьшается и при достижении равновесного давления происходит вскипание потока. В зоне кипения имеются четыре перфориро-

ванных тарелки с постоянным свободным сечением и одна тарелка с переменным свободным сечением. Тарелка с переменным свободным сечением предназначена для регулирования расхода циркулирующей рабочей среды.

Парожидкостная смесь из газлифтной трубы поступает в сепаратор (4), где происходит разделение жидкости и пара. После сепаратора пары продукта поступают на стадию конденсации, а жидкость по циркуляционной трубе (5) спускается к эжектору хлора.

Преимуществом реактора с эжекционными смесителями по сравнению с другими типами реакторов для проведения процесса жидкофазного хлорирования этилена является высокая селективность, которая по данным работы [2], составляет 99,85-99,95%.

В зависимости от температуры, при которой проводится процесс, различают реакторы низкотемпературного и высокотемпературного хлорирования [4, 5].

Низкотемпературный процесс (рис. 4) проводится в барботажной колонне 1, соединенной в верхней и нижней части с выносным кожухотрубчатый теплообменником 5. Рабочей средой в реакторе является продукт реакции – дихлорэтан в жидком состоянии с примесью побочных продуктов. Хлор вводится в нижнюю часть колонны через распределитель 2. Выше в образовавшийся раствор хлора через распределитель 3 вводится этилен. За счет разности плотностей сред в холодильнике и колонне возникает циркуляция рабочей среды с восходящим потоком в колонне. Отвод синтезированного продукта осуществляется самотеком через перелив. Отделение продукта от катализатора осуществляется на стадии очистки. Катализатор после стадии очистки не подлежит регенерации. Продукты процесса со стадии очистки поступают на ректификацию.

Достоинством низкотемпературного процесса является высокая селективность (99,8%), объясняющаяся замедлением побочных реакций заместительного хлорирования при снижении температуры. К недостаткам низкотемпературного процесса относятся большой расход сточных вод на стадии очистки продукта от катализатора, значительный расход катализатора на единицу продукции, большие энергетические затраты на охлаждение реакционной массы и нерациональное использование теплоты реакции.

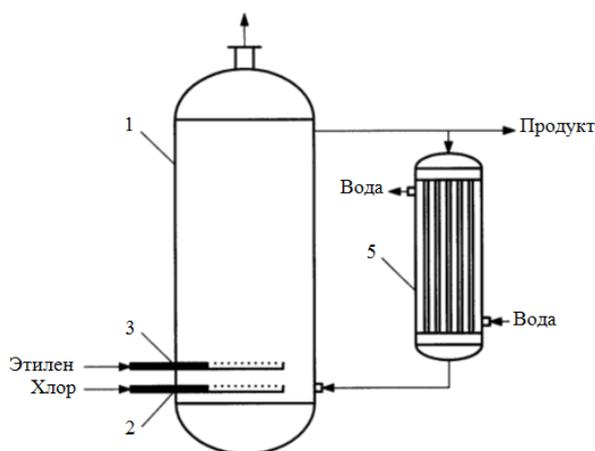


Рисунок 4 – Барботажный реактор низкотемпературного хлорирования этилена:  
1 - колонна; 2,3 - газораспределители; 5 - холодильник

Высокотемпературный процесс проводится при температуре, равной температуре кипения рабочей среды (83,5-110 °С, в зависимости от давления). Реактор высокотемпературного процесса представляет собой барботажную газлифтную колонну 1, снабженную внутренней циркуляционной трубой 4 (рис. 5).

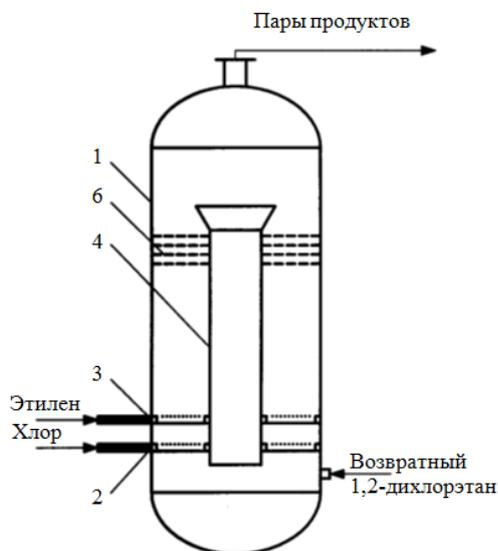


Рисунок 5 – Барботажный газлифтный реактор высокотемпературного жидкофазного хлорирования этилена:  
1 - колонна; 4 - циркуляционная труба; 2, 3 – газораспределители; 6 – перфорированные тарелки

Для получения раствора газообразный хлор через распределитель 2 подаётся в нижнюю часть кольцевого пространства. Реакция осуществляется выше по потоку при вводе в

реактор газообразного этилена через распределитель 3. Вследствие разности плотностей сред в циркуляционной трубе и в кольцевом пространстве возникает циркуляция жидкости. В верхней части реактора устанавливаются перфорированные тарелки 6, предназначенные для интенсификации перемешивания. Верхняя часть циркуляционной трубы выполняется в виде диффузора. Скорость газожидкостной смеси в диффузоре ниже скорости свободного всплытия пузырьков газа, что способствует эффективному отделению газа от жидкости и предотвращает попадание газа в циркуляционную трубу. Это позволяет обеспечить максимальную движущую силу процесса циркуляции в реакторе. Верхняя часть реактора играет роль сепаратора для отделения капель жидкости от пара. Продукты реакции отводятся в виде паров на стадию ректификации через штуцер в крышке реактора. Вследствие низкой летучести катализатор остается в реакторе. Для поддержания уровня жидкости в нижнюю часть реактора вводится дихлорэтан.

Важным преимуществом высокотемпературного процесса по сравнению с низкотемпературным является экономичность: выделяющееся тепло расходуется на испарение и ректификацию продуктов, сточные воды отсутствуют, расход катализатора минимален. Недостатком высокотемпературного процесса являются низкая селективность (98,0-98,7%), связанная с увеличением скорости побочных реакций при росте температуры.

В описанных выше реакторах теплота процесса отводится либо за счёт охлаждения реакционной среды в холодильнике, либо за счёт испарения 1,2-дихлорэтана при кипении. В работе [6] предложен новый комбинированный способ отвода теплоты с добавлением в реагенты азота, то есть с отводом теплоты как за счет испарения продукта реакции, так и за счет охлаждения реакционной среды в выносном теплообменнике. Селективность процесса с комбинированным отводом теплоты достигает до 99,9%. Высокую селективность нового способа можно объяснить тем, что температура в реакторе поддерживается ниже температуры кипения, в результате чего снижается скорость побочных реакций, а добавление азота приводит к уменьшению концентрации хлора в газовой и жидкой фазах, что также снижает скорость побочных реакций заместительного хлори-

рования 1,2-дихлорэтана. Данный способ получения 1,2-дихлорэтана может быть осуществлён в барботажном или насадочном реакторе. Таким образом, разработка новых конструкций реакторов и способов ведения про-

цесса, на примере процесса жидкофазного хлорирования этилена, позволит повысить селективность процесса и снизить себестоимость готового продукта по сравнению с традиционными способами производства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лекае, В.М.** Процессы и аппараты химических производств / В.М. Лекае, А.В. Лекае. – Москва : «Высшая школа», 1977 – 256 с.

2. **Бальчугов, А.В.** Высокоселективные газожидкостные химические процессы с большим тепловым эффектом и их аппаратное оформление : специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Бальчугов Алексей Валерьевич ; Томский политехнический университет. – Ангарск, 2009. – 384 с.

3. **Подоплелов, Е.В.** Массообмен между газом и жидкостью при получении дихлорэтана / Е.В. Подоплелов, А.В. Бальчугов, Б.А. Ульянов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2006. – Т. 49. – № 8. – С. 92-96.

4. **Абдрашитов, Я.М.** Развитие произ-

водства винилхлорида в Стерлитамакском АО «Каустик». Основные технические решения / Я.М. Абдрашитов // Химическая промышленность. – 1996. – № 5. – С. 320-324.

5. **Аветьян, М.Г.** Анализ действующих производств винилхлорида из этилена / М.Г. Аветьян, Ю.А. Трегер, Э.В. Сонин // Химическая промышленность. – 1991 – № 10. – С. 579-583.

6. **Подоплелов, Е.В.** Получение 1,2-дихлорэтана способом жидкофазного хлорирования этилена с испарительным охлаждением : специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Подоплелов Евгений Викторович ; Ангарская государственная техническая академия. – Ангарск, 2006. – 143 с.