

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики  
(наименование института полностью)

Кафедра \_\_\_\_\_ Химическая технология и ресурсосбережение \_\_\_\_\_  
(наименование)

18.04.01 Химическая технология  
(код и наименование направления подготовки)

Рациональное использование природных и сырьевых ресурсов в химической технологии  
и нефтехимии  
(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему: Модернизация промывной колонны производства карбамида

Студент \_\_\_\_\_ Е.П. Астапенко \_\_\_\_\_  
(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Научный \_\_\_\_\_ к.х.н., доцент, И.В. Цветкова \_\_\_\_\_  
руководитель (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Свойства карбамида. Технологии производства карбамида.....	7
1.1. Свойства карбамида .....	7
1.2. Синтез карбамида .....	9
1.3. Применение карбамида.....	11
1.4. Технологии производства.....	12
Глава 2 Модернизация промывной колонны .....	20
2.1. Варианты модернизаций узла очистки аммиака от углекислого газа ...	20
2.2. Реконструкция промывной колонны .....	22
2.3. Гидравлическое сопротивление .....	30
2.4. Сравнительный расчет гидравлического сопротивления регулярной и нерегулярной насадки .....	33
2.5. Расчет насадочной части.....	45
2.6. Расчет экономических затрат на замену насадки.....	47
Глава 3 Конструкционные материалы. Коррозионная стойкость.....	52
3.1. Конструкционные материалы и коррозионная стойкость .....	52
3.2. Выбор материала .....	59
3.3. Экспериментальная часть .....	63
Заключение .....	72
Список используемой литературы и используемых источников.....	74

## Введение

### **Актуальность и научная значимость настоящего исследования.**

В настоящее время производство карбамида – получение высоколиквидного продукта, получаемого из газообразного диоксида углерода. Мировые мощности производства достигли примерно 200 млн. тонн в год. Синтез карбамида увеличивается с каждым годом. Одной из причин роста потребления карбамида, увеличение доли карбамида среди азотных удобрений, другая причина – увеличение промышленного применения.

Диоксид углерода является побочным продуктом получения аммиака. Применение диоксида углерода в качестве сырья для производства карбамида, снижает его выбросы в окружающую среду. Вторым компонентом производства карбамида является аммиак, который остается в сточных водах и газах дистилляции, пагубно влияет на обитателей водоемов и жителей земли. Процесс получения карбамида ведется в избытке аммиака в результате он остается в реакционной массе.

Улучшения в технологии производства сконцентрированы на уменьшение затрат на сырье и минимизации воздействия на окружающую среду и включают следующие направления: улучшения преобразования диоксида углерода, восстановление остаточного аммиака и мочевины из стоков.

Производство карбамида на ПАО «КуйбышевАзот» введено в эксплуатацию впервые в 1968 году с мощностью 90 тыс. тонн в год, а в 1969 году запущен второй агрегат производства с аналогичной мощностью. Наиболее крупные реконструкции были проведены в 2006-2008 годах.

Производство карбамида на ПАО «КуйбышевАзот» занимает одно из ведущих направлений в химической технологии.

Высокая ликвидность карбамида, получаемого из газового сырья, обусловлена его увеличением промышленного применением. Основные

направления использования – удобрения, получения КФС, фармацевтическая промышленность, добавки к топливу.

Химические свойства карбамида обуславливают широкое его применение в химической промышленности в синтезе карбамидо–альдегидных (в первую очередь карбамидо–формальдегидных) смол, широко используемых в качестве адгезивов, в производстве древесно–волоконистых плит (ДВП) и мебельном производстве.

Часть производимого карбамида используется для производства меламина. Значительно меньшая доля используется для нужд фармацевтической промышленности.

**Объект исследования:** производство карбамида цеха №4 ПАО «КуйбышевАзот»

**Предмет исследования:** модернизация промывной колонны производства карбамида путем замены насадочной части.

**Целью данной работы** является повышение эффективности очистки газовых выбросов производства карбамида модернизацией промывной колонны.

**Для реализации цели исследования были сформулированы следующие задачи:**

- Провести анализ существующих технологий производства карбамида.
- Предложить варианты модернизации промывной колоны в производстве карбамида.
- Провести расчеты различных насадок для промывной колонны производства карбамида.
- Произвести техно-экономический расчет эффективности модернизации производства карбамида.
- Оценить коррозионное воздействие среды на предлагаемый материал промывной колонны.

**Теоретико-методологическую основу исследования** составили научные работы Панина А.В. об устранении газовых выбросов, так же в основу легли научные работы других авторов по темам производства карбамида, процессам и аппаратам химической технологии [32].

**Методы исследования:** анализ литературных источников, расчеты технологических процессов и оборудования. В ходе работы были использовано гравиметрическое испытание на коррозию. Расчеты выполнялись в программе PTC Mathcad.

**Научная новизна исследования** заключается в использовании новых разработок насадочных устройств, применение которых приводит к улучшению технологического процесса очистки газов дистилляции в производстве карбамида.

**Теоретическая значимость исследования** заключается в анализе научных работ по существующим методам получения карбамида, вариантам снижения газовых выбросов, разработкам контактных устройств – насадок.

**Практическая значимость исследования** заключается в возможности применения вариантов модернизации на действующей установке производства карбамида, что приведет к улучшению технологии за счёт использования улучшенных контактных устройств.

**Достоверность и обоснованность результатов исследования** обеспечивались результатами экспериментальных исследований и расчетами в программе PTC Mathcad.

**Личное участие автора в организации и проведение исследования** состоит в поиске и анализе литературы по теме данной работы, проведения необходимых технологических расчётов (гидравлическое сопротивление насадочной части, объема насадки, расчета коррозионных показателей). Автор принимал участие в подготовке и проведении экспериментальной части исследования, анализе полученных результатов, расчётах и формулировки вывода.

**Апробация и внедрение результатов.** Результаты магистерской диссертации докладывались на следующей конференции:

- научно-практическая конференция «Студенческие Дни науки в ТГУ», г. Тольятти, май 2021г;

- Международный научный форум «Наука и инновации – современные концепции», Москва, 18 июня 2021.

На конференции представлены доклады по теоретической части диссертационной работы. По результатам конференции опубликованы тезисы в сборнике конференции:

– Астапенко Е.П. Модернизация промывной колонны производства карбамида // Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума «Наука и инновации – современные концепции». Москва: Издательство Инфинити, 2021. – 73-74 с.

**На защиту выносятся:**

Предложение по модернизации промывной колоны производства карбамида путем замены насадочной части.

**Структура магистерской диссертации.** Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников (48 источников). Объем работы составляет 78 страниц машинного текста, содержит 30 рисунков, 9 таблиц и 75 формул.

# Глава 1 Свойства карбамида. Технологии производства карбамида

## 1.1. Свойства карбамида

«Карбамид выпускается по ГОСТ 2081-2010 «Карбамид. Технические условия». Настоящий стандарт распространяется на гранулированный (приллированный) карбамид (мочевина), получаемый из аммиака и диоксида углерода (IV), и устанавливает требования к карбамиду, изготовляемому для потребностей экономики страны и экспорта» [3].

«В зависимости от назначения карбамид согласно ГОСТ 2081-2010 производится марки «А» и «Б»:

- марки «А» для промышленности (таблица 1);
- марка «Б» для растениеводства, животноводства и розничной продажи (таблица 2)» [3].

Таблица 1 – Физико-химические показатели карбамида марки «А»

Наименование показателя	Норма для марки А	
	Высший сорт	1-й сорт
Массовая доля азота в пересчете на сухое вещество, %, не менее	46,3	46,2
Массовая доля биурета, %, не более	0,6	1,4
Массовая доля свободного аммиака, %, не более, для карбамида гранулированного	0,02	0,03
Массовая доля воды, %, не более: гигроскопической общей	0,3	0,3
	0,6	0,6

Для растениеводства и розничной продажи карбамид марки «Б» предъявляются следующие физико-химические показатели, представленные в таблице 2 [3].

Таблица 2 – Физико-химические показатели карбамида марки «Б»

Наименование показателя	Норма для марки Б			
	для растениеводства			для розничной продажи
	Высший сорт	1-й сорт	2-й сорт	
Внешний вид	Гранулы или кристаллы белого цвета или слегка окрашенные			
Массовая доля азота в пересчете на сухое вещество, %, не менее	46,2	46,2	46,2	46,2
Массовая доля биурета, %, не более	1,4	1,4	1,4	1,5
Массовая доля воды, %, не более:	-	-	-	-
Гигроскопическая	0,3	0,3	0,3	0,3
общая	0,5	0,5	0,6	-
Рассыпчатость, %	100	100	100	-
Гранулометрический состав, %:				
массовая доля гранул размером, мм:	-	-	-	-
от 1 до 4, не менее	94	94	94	-
от 2 до 4, не менее	70	50	-	-
менее 1, не более	3	5	5	-
остаток на сите 6 мм	Отсут- ствие	Отсут- ствие	Отсут- ствие	-
Статическая прочность гранул, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ), не менее или	1,4 (14)	1,2 (12)	1,2 (12)	-
в пересчете на 1 гранулу, Н, (кгс), не менее	7 (0,7)	5 (0,5)	3 (0,3)	-

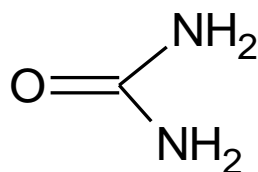
Примечание: биурет - это органическое соединение состава  $C_2H_5N_3O_2$ , амид аллофоновой кислоты

«Карбамид представляет собой амид карбаминовой кислоты

$H_2NCOOH$

Химическая формула:  $CO(NH_2)_2$

Структурная формула (1):



(1)



Чистый карбамид - бесцветное кристаллическое вещество, без запаха. Технический продукт имеет белый или слегка желтоватый цвет» [3].

В таблице 3 представлены следующие физико – химические характеристики карбамида.

Таблица 3 – Физико–химические характеристики карбамида

Показатель	Значение
Молекулярная масса	60,056 г/моль
Плотность при 25 °С	1,330 т/м <sup>3</sup>
Насыпная плотность	0,72-0,76 т/м <sup>3</sup>
Удельная теплоемкость при 25 °С	93,198 кДж/моль
Теплота образования из простых веществ при 25 °С	333,3 кДж/моль
Теплота сгорания при 25 °С	632,5 кДж/моль
Теплота растворения: в воде в жидком аммиаке: при (26,4 – 31,555) °С при (50 - 108,5) °С	242 кДж/кг
	255,4 кДж/кг
	134 кДж/кг

Карбамид содержит не менее 46,2 % азота в амидной форме.

## 1.2. Синтез карбамида

Синтез карбамида в настоящее время осуществляется в две стадии по реакции Базарова [17]:

- 1) Взаимодействие аммиака с углекислым газом с образованием карбамата аммония (2):



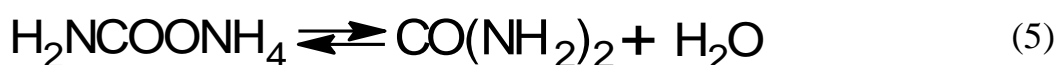
- 2) Отщепление воды и образование карбамида (3):



Образование карбамата аммония происходит с выделением тепла, а дегидратация – с поглощением, суммарно – экзотермический процесс [1].

Процесс протекает в избытке аммиака, который подается для снятия тепла. Мольное соотношение реагентов  $\text{NH}_3:\text{CO}_2:\text{H}_2\text{O}$  соответствует 3,8~4: 1: не более 0,9. Давление процесса – 14 – 20 Мпа, температура – 185-195°C.

Побочные реакции, протекающие в процессе синтеза карбамида (4-8):



Реакции (7) и (8) протекают при температуре выше 180°C.

При термической обработке карбамида до 150 °C и выше образуются  $\text{NH}_4\text{NCO}$ ,  $\text{HNCO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ , биурет, циануровая кислота; в замкнутом сосуде с добавкой  $\text{NH}_3$  – продукты амминирования циануровой кислоты: аммелин, аммелид, меламин. Последний также образуется при испарении карбамида путем каталитической циклизации циановой кислоты в газовой фазе. При нагревании водных растворов карбамида протекают реакции изомеризации, гидролиза и деаминирования с образованием  $\text{NH}_4\text{NCO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ , биурет, циануровая кислота [30].

### 1.3. Применение карбамида

Карбамид – высоколиквидный продукт, его широкая область применения обусловлена его свойствами, так же карбамид является полупродуктом в органическом синтезе, на его основе получают многие вещества. В Индии на «карбамидную» промышленности приходится 30% производства, является крупнейшим потребителем углекислого газа [40].

Применения карбамида представлены (рисунок 1):

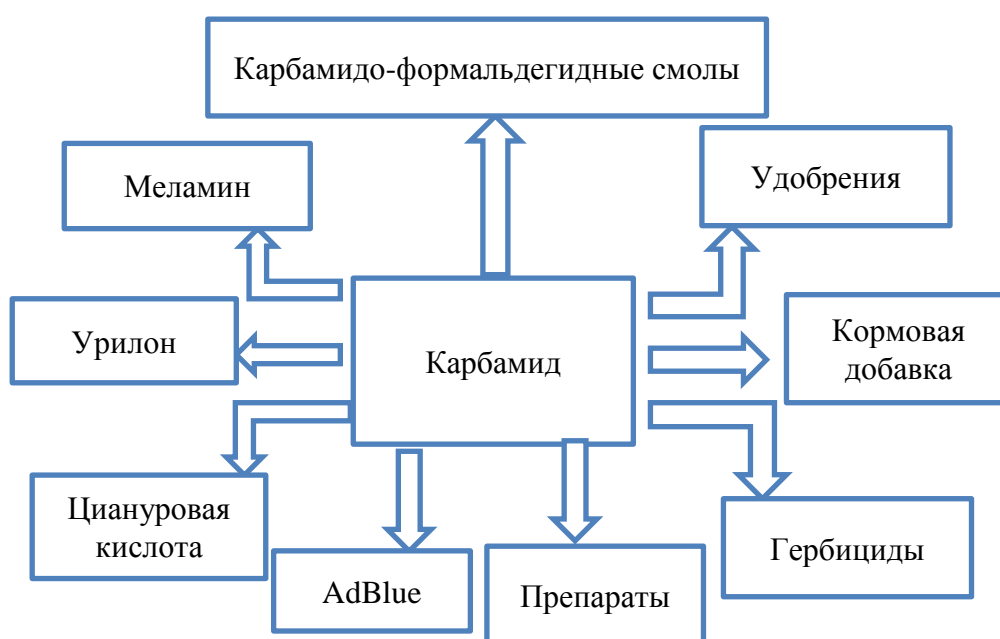


Рисунок 1 – Применение карбамида

Карбамид – высококонцентрированное азотное удобрение с содержанием азота в товарном продукте не менее 46, 2% масс. В почве амидный азот карбамида под действием уреазы очень быстро превращается в карбонат аммония, легко абсорбируемый в почву [31].

Карбамид применяют в фармацевтической промышленности для производства препаратов и кремов. В рубце жвачных животных обитают микроорганизмы, способные использовать мочевину для биосинтеза белка, этим обусловлено использование как кормовой добавки [25]

Карбамидо-формальдегидные смолы. Соединения карбамида с формальдегидом находят широкое применение для получения лаков, клеев, пластиков и т.д.

Меламин. Более 95 % произведенного меламина направляется на выпуск смол. Меламиновые смолы обладают рядом преимуществ перед карбамидо-формальдегидными смолами.

Урилон – гетероцепное полимочевинное волокно, формируемого из расплава полимера, синтезированного воздействием мочевины и 1,9-нонаметиленадиамина [33].

«AdBlue» представляет собой высокочистый раствор мочевины, который распыляется непосредственно в выхлопные газы дизельного топлива и снижает содержание оксида азота [37].

Циануровая кислота и ее производные применяют для получения эффективных отбеливающих и дезинфицирующих средств, полимеров, используют в качестве фунгицидов, гербицидов, клеев.

В патентах [24, 48] представлен способ использования карбамида для улавливания окислов азота из выхлопных газов. Процесс превращает раствор мочевины в газовую смесь аммиака по требованию, чтобы удовлетворить необходимые условия си системы контроля окислов азота и других систем, использующих аммиак.

#### **1.4. Технологии производства карбамида**

«Ранее было замечено, что современные технологические схемы производство карбамида различаются в основном методами рекуперации непрореагировавших аммиака и диоксида углерода» [13].

В промышленности организовано несколько схем производства карбамида:

- разомкнутая (без рецикла  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$ );
- полузамкнутая (с частичной рециркуляцией  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$ );

- замкнутая (с полной рециклом  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$ ).

«История получения карбамида начинается с пятидесятих годов двадцатого века, когда в стране был поставлен вопрос о необходимости увеличения мощности производства карбамида. В середине шестидесятих годов прошлого столетия проводились работы, результаты которых способствовали ускорению освоения проектных мощностей, снижению расходных коэффициентов, решения вопроса взрывобезопасной эксплуатации, уменьшению загрязнения сточных вод и выхлопных газов, а также повышение качества продуктов» [30].

В России наибольшее распространение получили схемы с полузамкнутым циклом и с полным жидкостным рециклом.

Stamicarbon является главным лицензиатом производства карбамида в настоящее время (в мире работает более 80 заводов). В Технологии Stamicarbon совместно с «Научно исследовательским институтом карбамида» частично или полностью реализуют на территории России.

«В замкнутой схеме непрореагировавший аммиака и диоксид углерода отгоняют в стриппере-дистилляторе, где в качестве стриппер – агента используют  $\text{CO}_2$ , газы дистилляции затем конденсируются и преобразуются в раствор угле аммонийных солей, возвращаемых в колонну синтеза» [47].

Структурная схема полного жидкостного рецикла – стриппиг-процесс  $\text{CO}_2$  [11] представлена на рисунке 2.

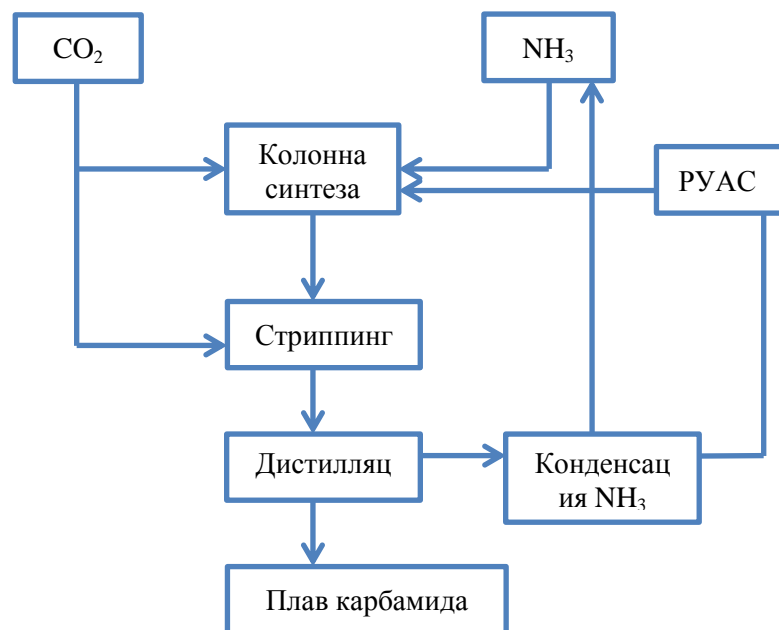


Рисунок 2 – Схема полного жидкостного рецикла

Особенность «карбамидной» отрасли в РФ – разнообразие технологий получения раствора (рисунок 3) [7, 26]:

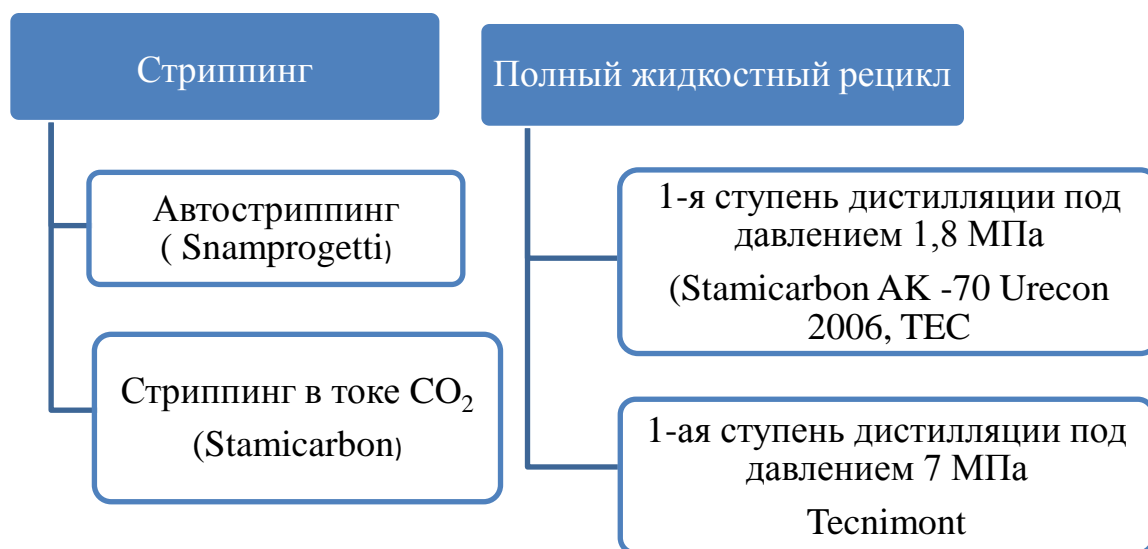


Рисунок 3 – Технологии производства карбамида

На ПАО «Куйбышев Азот» реализован полный жидкостный рецикл со стриппингом в токе CO<sub>2</sub> (рисунок 4).

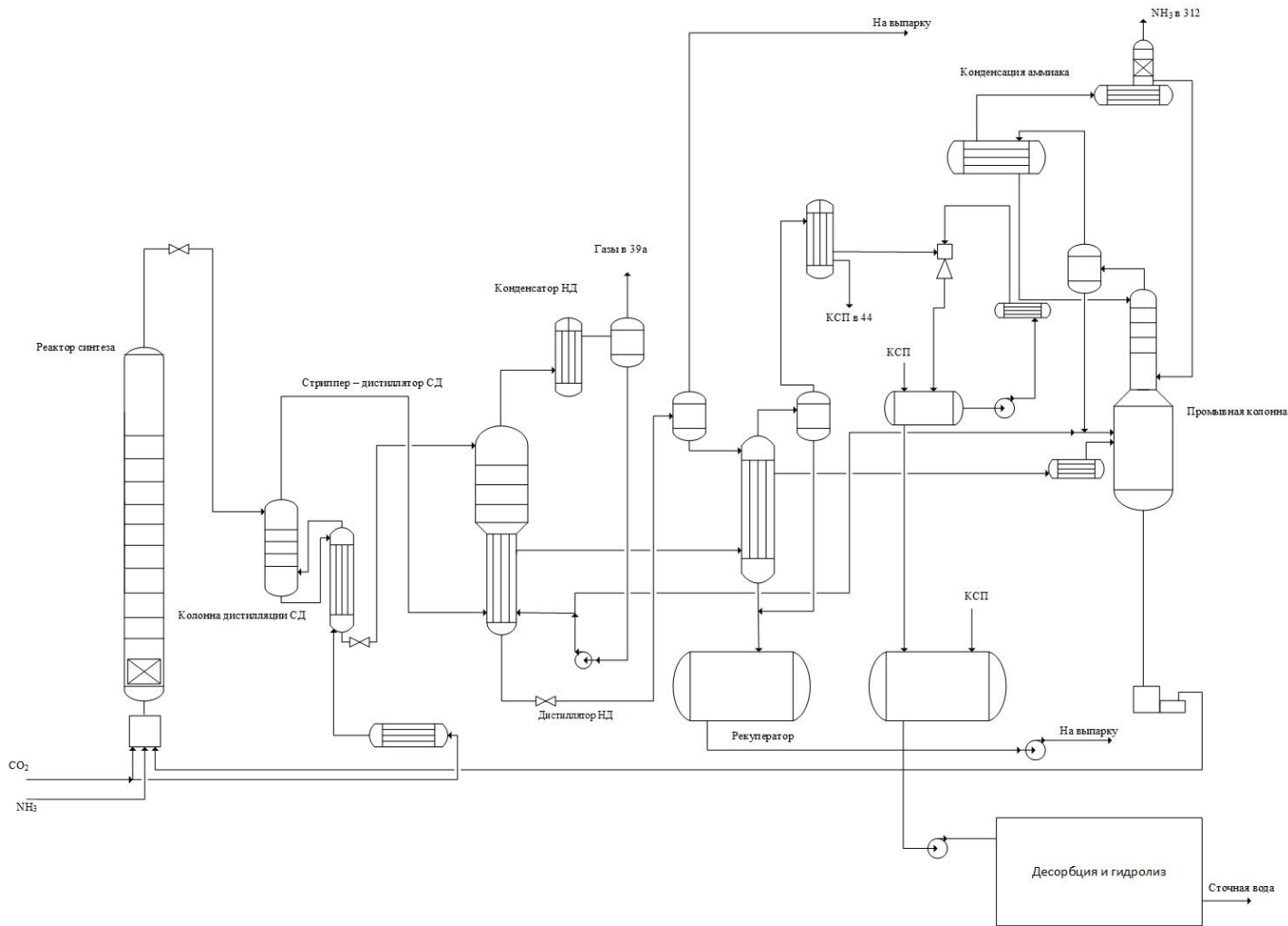


Рисунок 4 – Принципиальная технологическая схема производства карбамида

В колонне синтеза при  $T= 185-195\text{ }^{\circ}\text{C}$  давление  $P=19-20\text{ Мпа}$  протекает реакция образования карбамата аммония из аммиака и углекислого газа. Процесс ведется в избытке аммиака, с соотношением реагентов  $\text{NH}_3: \text{CO}_2: \text{H}_2\text{O} = (3.8-4):1$ :не более 0.9. Реакция протекает в жидкой фазе. Продукты из колонны выводят в газо-жидкостной форме, газовая фаза представляет собой смесь паров аммиака, углекислого газа, воды и инертнов, а жидкостная – плав карбамата аммония и карбамида в аммиаке и воде.

Далее протекает двухступенчатая дистилляция плава и конденсация газообразного аммиака. Первая ступень дистилляции реализуется при давлении 1,8 -2,0 Мпа, вторая при давлении не более 2,5 Мпа

Схемы процесса фирмы «Stamicarbon» технология «Urea 2000+» представлены на рисунках 5-6.



Рисунок 5 – Технология "Urea 2000+"



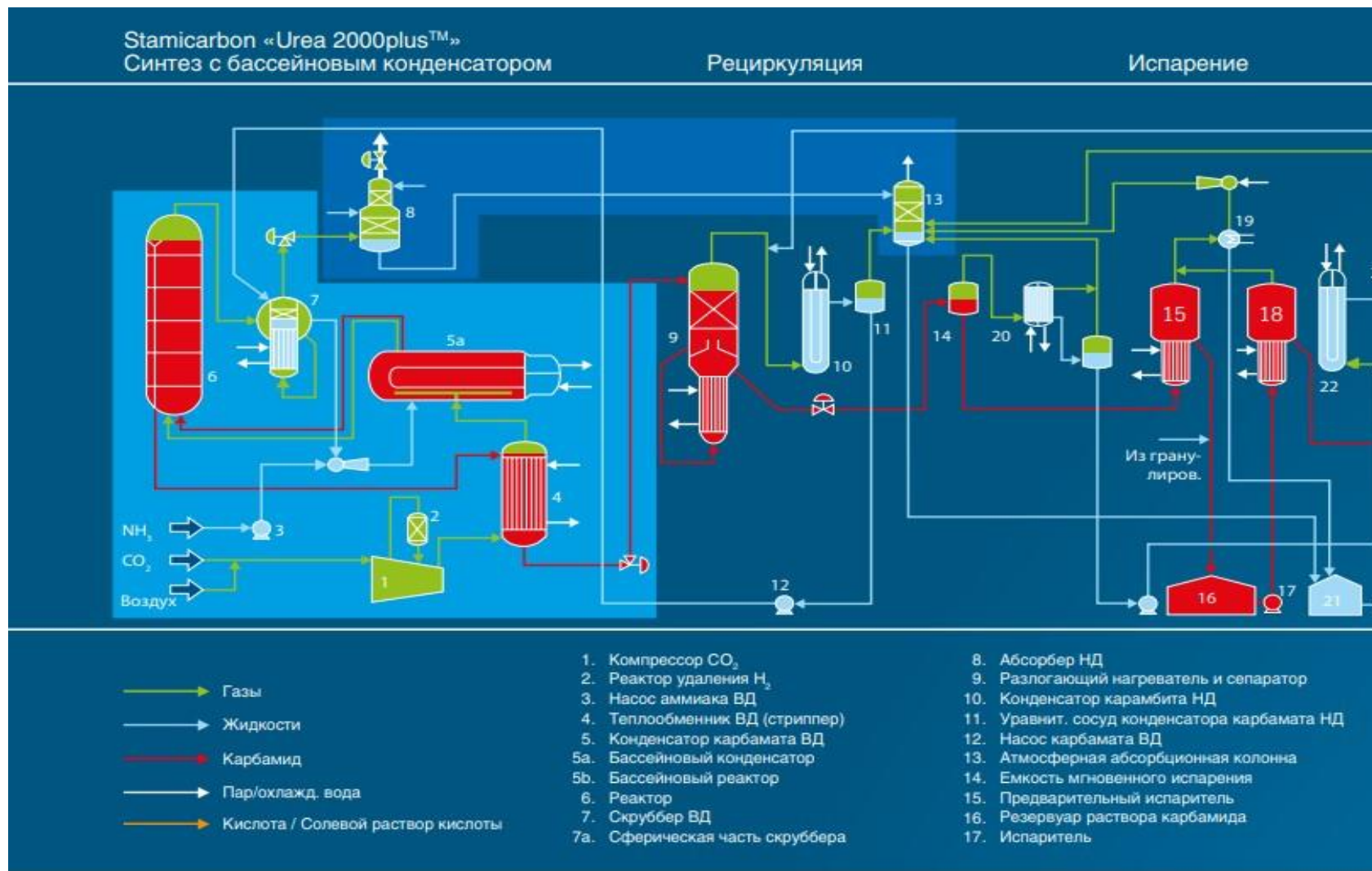


Рисунок 6 – Технология «Urea 2000+»

Характеристика процесса стриппинга  $\text{CO}_2$  фирмы Stamicarbon:

- давление в реакторе 140 бар;
- мольное соотношение  $\text{NH}_3$ :  $\text{CO}_2$  – около 3;
- непрореагировавшие  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$  рециркулируются под давлением реактора;
- дополнительная ступень дистилляции и рециркуляции под давлением 4 бара.

«Основное количество аммиачного сырья добавляется после повышения давления аммиака с помощью насоса высокого давления. Необходимый  $\text{CO}_2$  смешивается с небольшим количеством воздуха для предотвращения коррозии и компримируется до давления синтеза в многоступенчатом компрессоре. Затем  $\text{CO}_2$  через стриппинг направляется на стадию синтеза карбамида при сохранении оптимальных условий протекания процесса, то есть при давлении примерно 140 бар и температуре 180 °С. В ходе стриппинга улавливаются и небольшие количества непрореагировавшего  $\text{NH}_3$ , которые возвращаются на стадию синтеза. В проверенном процессе Urea 2000plus™  $\text{H}_2$  удаляется из подаваемого потока свежего диоксида углерода в реакторе удаления водорода, расположенном между ступенями компрессии. В результате реакции синтеза достигается химическое равновесие, часть  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$  не превращается в карбамид и воды и должна быть удалена из реакционной смеси с помощью стриппинг-процесса при использовании  $\text{CO}_2$  для отпаривания непрореагировавшего  $\text{NH}_3$ . Эта высокоэффективная стадия отличается низким энергопотреблением и удержанием реагентов, которые не преобразовались на стадии синтеза» [20].

«Так как раствор карбамида после стриппинга имеет низкую концентрацию  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$  необходима лишь одна ступень рециркуляции. На этой ступени низкого давления рекуперировываются  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$ , которые еще содержатся в растворе карбамида. В связи с идеальным соотношением  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$  в рекуперированных газах, они минимально разбавляются в полученном растворе карбамата аммония, несмотря на низкое давление примерно 4 бар. В

результате может быть использован насос карбамата меньшей мощности, и на стадию синтеза возвращается меньше нежелательной рецикловой воды. После стадии рециркуляции раствор карбамида подается на стадию испарения, чтобы довести концентрацию до необходимой концентрации гранулирования» [20].

«Несмотря на то, что новая технология предназначена, в первую очередь, для использования в новых проектах, предлагается её применение для модернизации действующих установок. При реконструкции агрегата с полным жидкостным рециклом секция синтеза дооборудуется конденсатором затопленного типа с узлом получения пара и стриппером. Действующий реактор синтеза не заменяется. Промывная колонна работает как абсорбер. Конденсаторы аммиака не используются, рецикл  $\text{NH}_3$  исключается» [30].

Вывод по главе

Историческое развитие производства карбамида пришло к использованию замкнутой системы, с полной рециркуляции аммиака и диоксида углерода. Технологические схемы с полужамкнутой системой используются в Российской Федерации, где реализована частичная рециркуляция аммиака и диоксида углерода. В результате модернизации действующих производств, совместно с научно-исследовательскими институтами или компаниями лицензиатами производства карбамида, постепенно заводы, находящиеся на территории России, приходят к замкнутой системе рециркуляции аммиака и диоксид углерода.

Главный лицензиат рынка производства карбамида – Stamicarbon, в борьбе за экологичность, пришел к использованию замкнутой технологии производства карбамида.

## **Глава 2 Модернизация промывной колонны производства карбамида**

### **2.1. Варианты модернизаций узла очистки аммиака от углекислого газа**

В связи с ужесточением контроля выбросов в окружающую среду, поднимается вопрос о снижении влияния производства карбамида на окружающую среду

После анализа работы [32] было выявлено, что для обеспечения автономной работы цеха производства карбамида необходимо ликвидировать три основных источника газовых сдувок в смежный цех:

- газовую фазу после конденсаторов жидкого аммиака (I ступень дистилляции);
- газовую фазу из емкости постоянного напора (II ступень дистилляции);
- газовую фазу из танка жидкого аммиака.
- Концепция реконструкции цехов с полным жидкостным рециклом включает в себя решение двух взаимосвязанных задач:
  - минимизация объема газовых сдувок;
  - замыкание газовых сдувок.

«Первую задачу можно разделить на две взаимосвязанных подзадачи: снижение объема газовых сдувок после I и II ступеней дистилляции.

Для решения первой подзадачи необходимо снизить нагрузку на узел промывной колонны, а также повысить эффективность работы этого узла. Снижение нагрузки на узел промывной колонны достигается путем рекуперации тепла газов дистилляции I ступени в межтрубном пространстве теплообменника-рекуператора, заменой барботера промывной колонны, а замена тарельчатого промывателя промывной колонны позволяет повысить эффективность работы узла промывной колонны.

Установка теплообменника-рекуператора.

Для уменьшения тепловой нагрузки на узел промывной колонны на 30–40%, а также с целью повышения концентрации раствора карбамида перед выпаркой устанавливается теплообменник-рекуператор. Упариваемый раствор карбамида после второй ступени дистилляции вводится в сепарационную камеру, где распределяется по теплообменным трубкам специальными устройствами и стекает тонкой пленкой по внутренней поверхности труб вертикального пучка. Благодаря этому процесс упаривания протекает очень интенсивно даже при малой разности температур.

Замена барботера.

«С целью более полной конденсации газов дистилляции I ступени барботер заменяется аппаратом с увеличенной теплообменной поверхностью. Кроме того, в результате увеличения диаметра аппарата происходит увеличение объема жидкости в барботажной зоне, что снижает вероятность колебаний уровня и его влияние на технологический режим. Барботер представляет собой кожухотрубный теплообменник с двумя барботажными трубами, расположенными под трубчаткой. В теплообменнике происходят поглощение аммиаком основного количества диоксида углерода и конденсация водяного пара. Тепло реакции образования угле-аммонийных солей отводится обратной водой, подаваемой в трубное пространство барботера» [32].

Принципиальная схема реконструкции узлов дистилляции I ступени и форвыпарки представлена на рисунке 7.

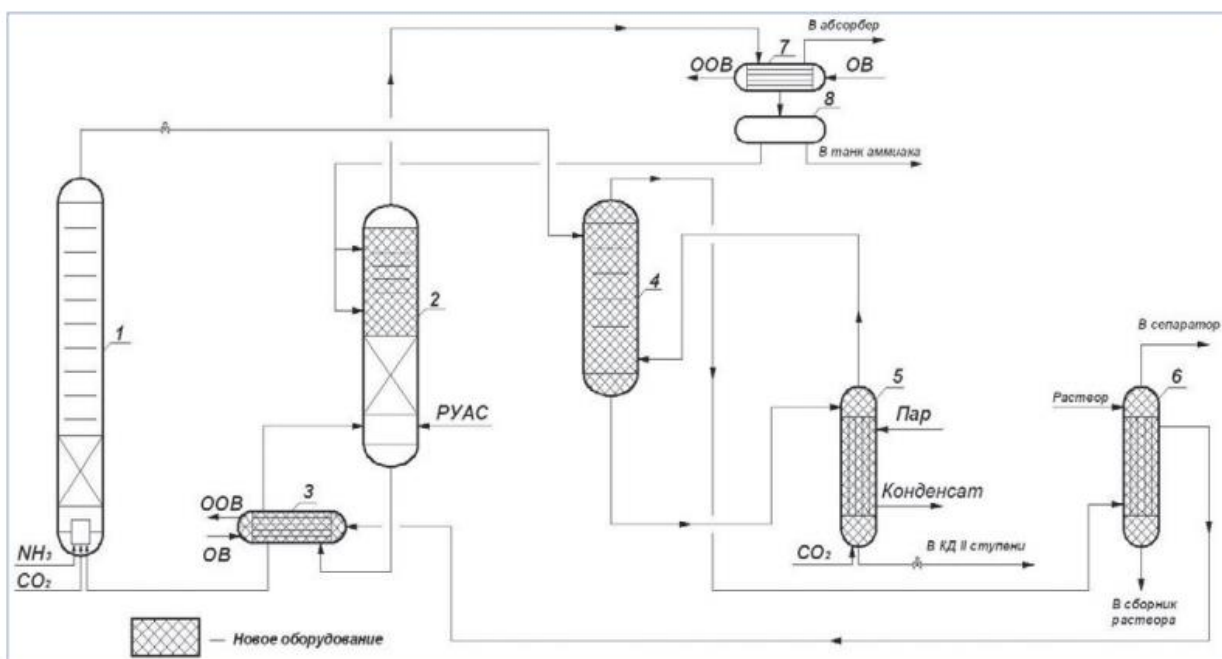


Рисунок 7 – Принципиальная схема реконструкции узлов дистилляции I ступени и форвыпарки

## 2.2. Реконструкция промывной колонны

Промывная колонна – аппарат колонного типа, средняя часть которого заполнена насадками (кольца Рашига). Верхняя часть промыватель, имеющая пять барботажных тарелок для более тонкой очистки газообразного аммиака от диоксида углерода.

Насадочная часть колонны предназначена для интенсификации тепло- и массообмена и обеспечения однородных гидродинамических условий проведения процесса. С этой целью она заполнена слоями твердых тел, служащие для создания развитой поверхности контакта между потоками. В промывной колонне давление не более  $19 \text{ кгс/см}^2$ , температура куба –  $82^\circ\text{C}$ , низ насадки –  $95^\circ\text{C}$ , верх насадки –  $51^\circ\text{C}$ , температура выходящих газов с колонны не более плюс  $50^\circ\text{C}$  [8].

Насадки разделяются на нерегулярные и регулярные. В настоящее время последние вытеснили нерегулярные насадки в крупнотоннажных производствах [16].

## Виды регулярных насадок

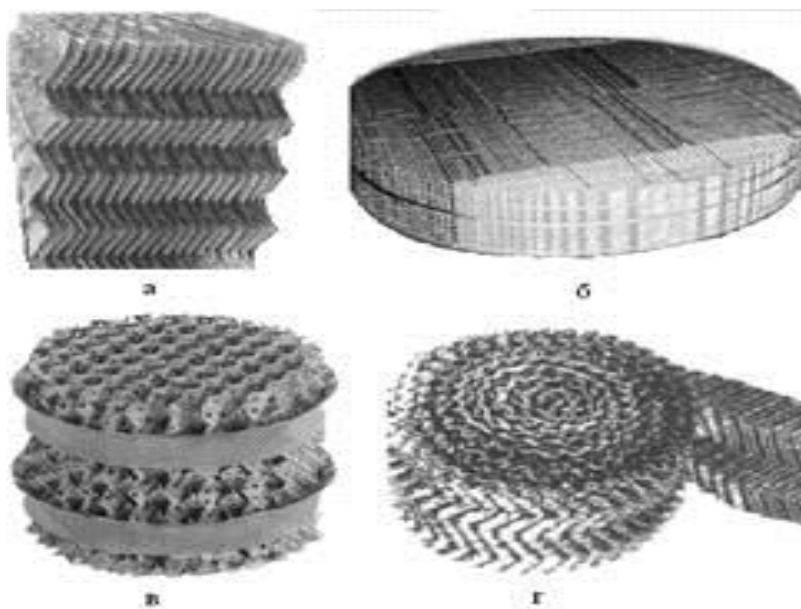
«Отечественная насадка «Вакупак» (рисунок 8 а) представляет собой пакет вертикальных пластин изготовленных методом горизонтального гофрирования. На гофрах имеются отогнутые и направленные вниз выступы с отверстиями, которые обеспечивают заданное расстояние между соседними пластинами при изготовлении насадки. Жидкость стекает по гофрам в виде пленки, а газ движется снизу вверх в зазорах между гофрированными листами. Выступы гофров обеспечивают интенсивное внутреннее перемешивание и турбулизацию потоков жидкости и пара» [18].

«На рисунке 8 б показана насадка «Кедр», которая представляет собой пакет вертикальных листов с двунаправленным гофрированием, обеспечивающим обеим фазам возможность перехода в смежные каналы, образованные гофрами. Для улучшения смачивания насадки и создания более равномерной пленки жидкости на поверхности листов перед гофрированием наносят мелкое рифление» [27].

«Среди иностранных конструкций большой интерес представляет насадка Меллапак (рисунок 8 в), которая состоит из перемежающихся слоев перфорированного металлического листа малой толщины (0,15 - 0,25 мм). Гофры в соседних слоях насадки повернуты в противоположные стороны. Отмечена высокая эффективность и насадки Гудлоу (рисунок 8 г), представляющей собой свернутую гофрированную спираль из плетеного сетчатого чулка (толщина нити составляет доли мм) [19]. Высокой эффективностью характеризуется и насадка фирмы «Инжехим», разработанная в КНИТУ (рисунок 9)» [15].

При проектировании регулярных насадок учитывается их дальнейший монтаж. Для этой цели насадки изготавливаются в виде отдельных блоков, которые проходят через монтажные люки. При монтаже блоки укладываются послойно с минимальными зазорами, блоки изолируются относительно стенок колонны монтажной пеной, для исключения прохождения потока минуя насадку. Благодаря изменению ориентации блоков в соседних слоях,

обеспечивается дополнительное перераспределение жидкости в пределах каждого слоя. Свернутые (спиральные) насадки менее удобны для монтажа и используются только в колоннах небольшого диаметра (до 0,8 м), выполненных в виде отдельных царг.



а – Вакупак; б – «Кедр»; в – Меллапак 250; г - насадка Гудлоу

Рисунок 8 - Регулярные насадки:

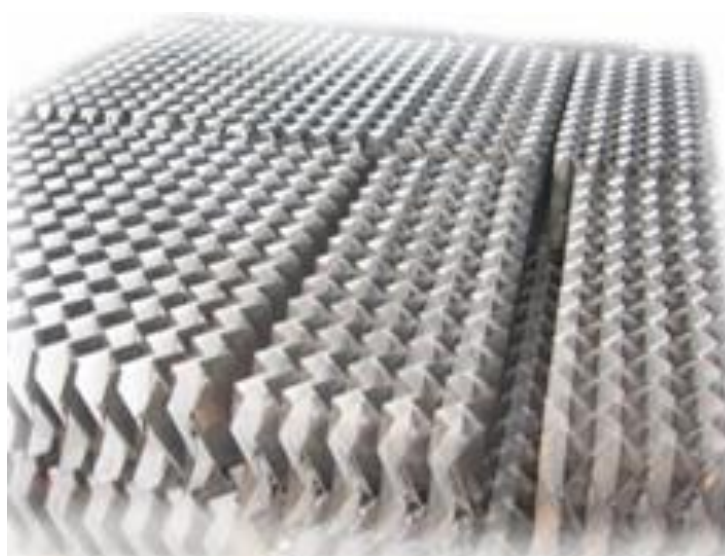


Рисунок 9 - Насадка фирмы «Инжехим»



Примером насадки регулярного типа является упорядоченные кольца Рашига, Паля и др.

В последнее время много разработок спиральных насадок (рисунок 10), выполненных из металлических лент и проволоки, стеклянного волокна уложенных в виде блока горизонтального или спирального. Данные насадки характеризуются низким гидравлическим сопротивлением [22, 23].

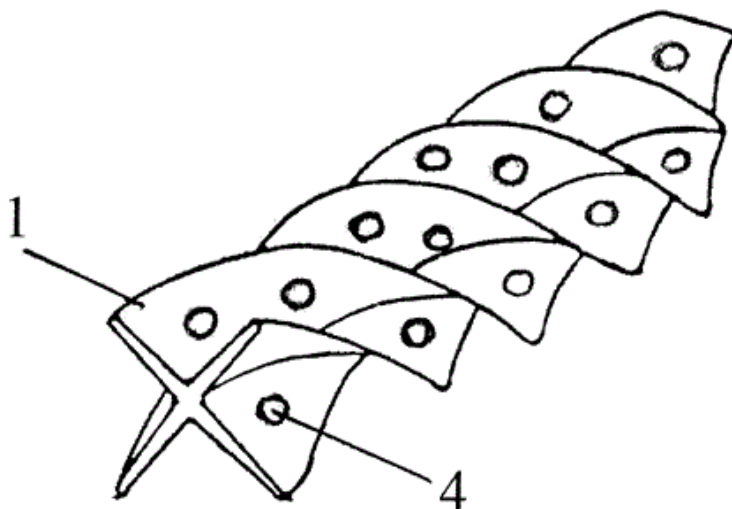


Рисунок 10 – Спиралевидная насадка

К наиболее известным конструкциям регулярных насадок относятся: Клитч-Грид, плоскопараллельная, Зульцер, Перформ-Грид, ромбовидная ВНИИнефтемаша и т.д.

Примером насадки регулярного типа является упорядоченные кольца Рашига, Паля и др.

На рисунке 11 представлена плетеная структурированная насадка АМАС.

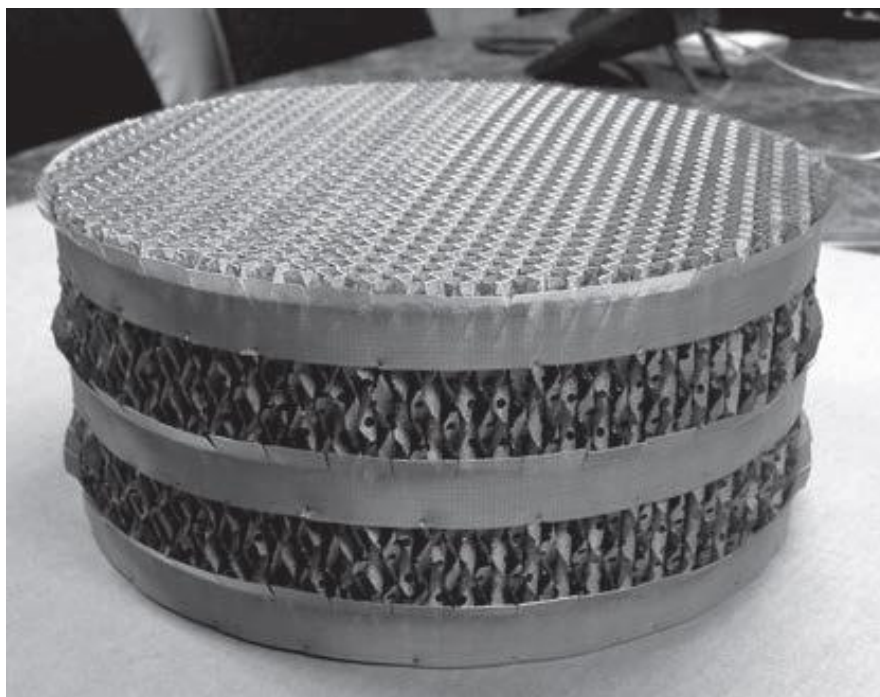


Рисунок 11 – Плетеная структурированная насадка АМАС

Набивка изготовлена из специально сплетенной проволочной сетки, которая спрессована в гладкие пластины, равномерно перфорирована, гофрирована и уложена гофрами в чередующихся направлениях. Эта конструкция способствует тесному контакту газа и жидкости [39].

На рисунке 12 изображена упаковка Кох-Глитча – Intalox обеспечивающая более низкий перепад давления и повышенную емкость. Гофрированные металлические листы структурированной упаковки расположены в чередующемся соотношении для создания проточных каналов газовой фазы. Пересечение листов создает точки смешения для жидкой и газовой фазы [41].

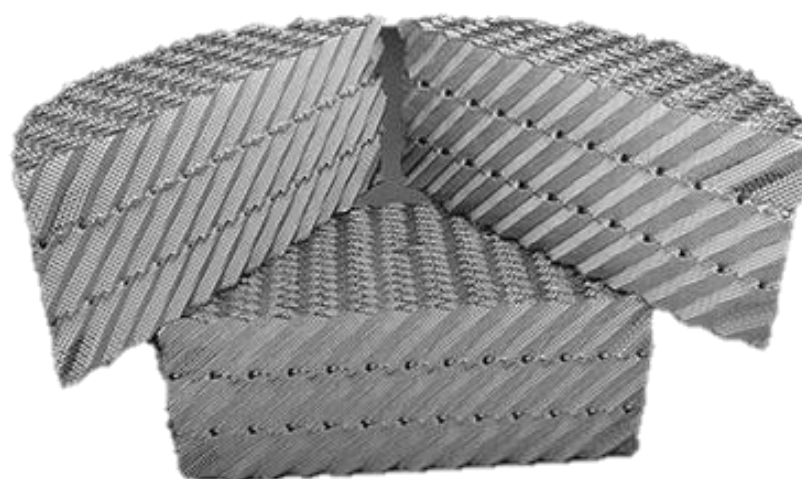


Рисунок 12 – Упаковка Кох-Глитча

К наиболее известным конструкциям регулярных насадок относятся: Клитч-Грид, плоскопараллельная, Зульцер, Перформ-Грид, ромбовидная ВНИИнефтемаша и т.д.

Преимущества регулярных насадок:

- удельное гидравлическое сопротивление на порядок меньше;
- обладают высокой разделяющей способностью;

Недостаток:

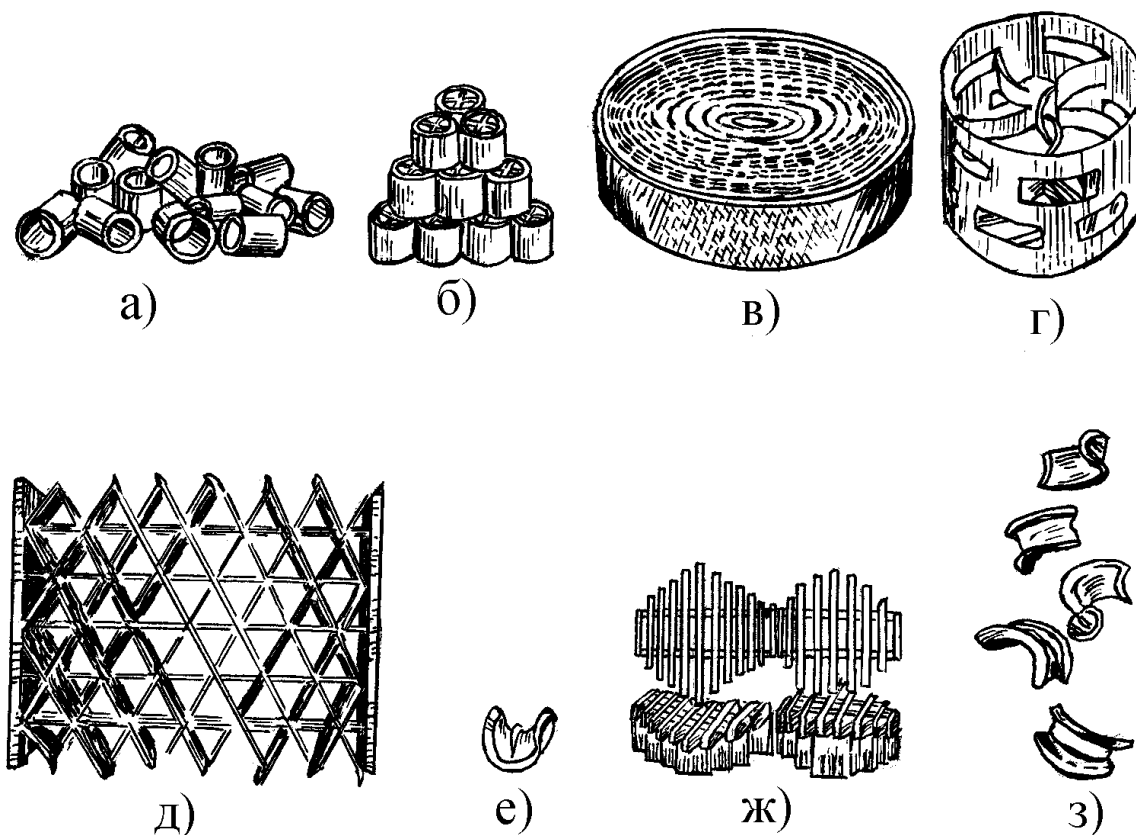
- высокая стоимость;
- меньшая коррозионная стойкость, из – за тонкой толщины стенок насадки.

Нерегулярные насадки

Насадку применяют в процессах массообмена, протекающих под давлением или в условиях неглубокого вакуума. Эта насадка обладает рядом преимуществ, одно из которых состоит в практическом отсутствии проблемы выбора материала.

Материалы для изготовления насадки: металл, полимер, керамика. Полимерная и керамическая насадка наиболее приемлема для обработки агрессивных сред. Нерегулярная насадка имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с регулярной. Такие как технологи изготовления, транспортирование и монтаж.

По конструктивным признакам эту насадку можно разделить на кольца и седла, хотя в отечественной и зарубежной практике применяют насадочные тела и других форм (рисунок 13) [12].



а) кольца Рашига, беспорядочно уложенные (навалом); б) кольца с перегородками, правильно уложенные; в) насадка Гудлое; г) кольца Палля; д) насадка «Спрейпак»; е) седла Берля; ж) хордовая насадка; з) седла «Инталлокс»

Рисунок 13 – Нерегулярные насадки

Насадки беспорядочно укладывают (навалом). Наиболее распространенные являются кольца Рашига. В настоящее время широкое

распространение получили кольца Палля, рабочие характеристики которых выше. Перфорированные стенки позволяют повысить эффективность и производительность колонны.

Седлообразные насадки имеют форму полукольца с прямоугольной перфорацией и лепестками, отогнутыми вовнутрь или лепестками с разрезанными концами и выдавленными дугами. Все эти насадки образуют рыхлый насадочный слой, с более высокой пропускной способностью и более низким гидравлическим сопротивлением. Минимум застойных зон в местах контакта элементов [10].

Наиболее высокие показатели имеют насадка Лева и «Инжехим 2002» рисунки 14 и 15.

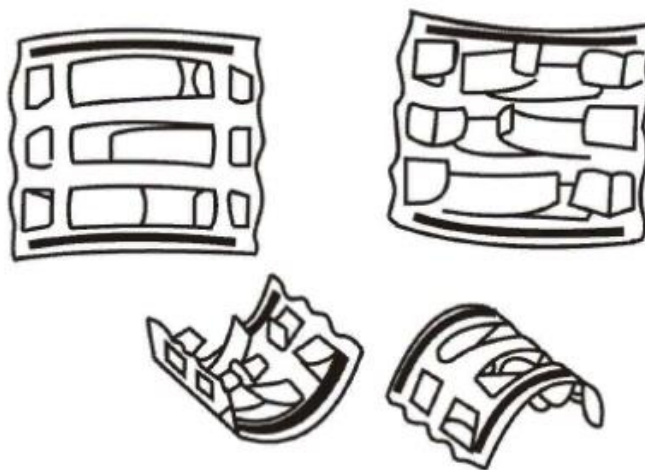


Рисунок 14 – Насадка Лева



Рисунок 15 – Насадка «Инжехим»

Наполнитель для установок удаления  $\text{CO}_2$  ДанПак. Обеспечивает низкий перед давлением, конструкционная особенность наполнителя предотвращает возникновение «мостов» и «мертвых зон». В ходе эксплуатации не теряет своих физико-химических свойств (рисунок 16):



Рисунок 16 – Наполнитель ДанПак

Основной недостаток нерегулярных насадок заключается в том, что в объеме насадки образуются каналы, по которым проходят потоки, из – за чего происходит неравномерное распределение пара и жидкости.

### **2.3. Гидравлическое сопротивление**

Для увеличения производительности и улучшения технологических показателей выбрано направление модернизации промывной колонны.

«Гидродинамические режимы движения фаз зависят от скорости газа, плотности орошения жидкости, свойств веществ, характеристик насадки» [9].

«На рисунке 17 показана зависимость гидравлического сопротивления насадки от постоянной скорости газа для различных гидродинамических режимов» [27].

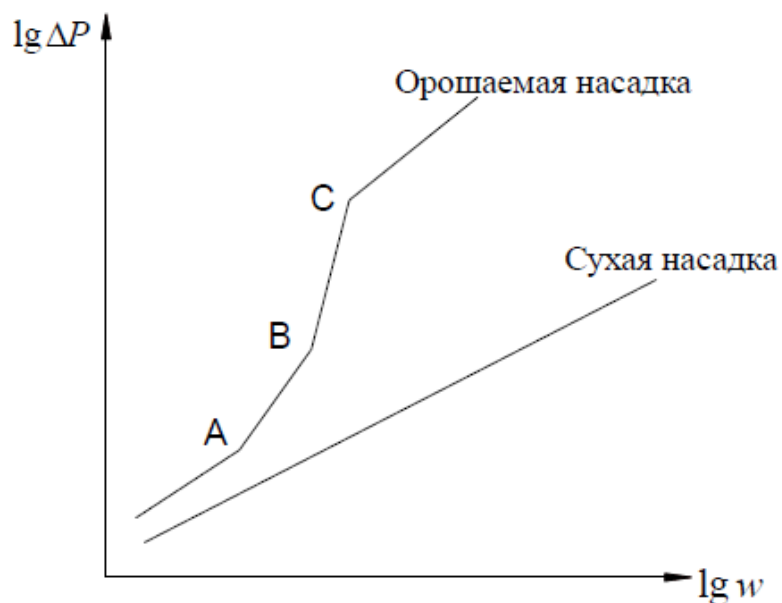


Рисунок 17 – Зависимость ГС слоя насадки от скорости газа при различных гидродинамических режимах.

«Первый режим – пленочный (линия ОА) – наблюдается при малых скоростях газа и небольших плотностях орошения. В этом режиме взаимодействие фаз незначительно, газовый поток не влияет на скорость течения жидкой пленки по насадке и, следовательно, на количество жидкости, удерживаемой на насадке лишь силами поверхностного натяжения. Пленочный режим заканчивается в первой переходной точке А, называемой точкой подвисания» [9].

«Второй режим – режим подвисания (линия АВ). В этом режиме повышение скорости газа приводит к заметному увеличению сил трения между фазами и торможению жидкости газовым потоком. Вследствие этого скорость течения жидкости уменьшается, а толщина ее пленки и количество удерживаемой в насадке жидкости увеличивается. Спокойное течение жидкости нарушается, появляются завихрения, брызги, увеличивается смоченная поверхность насадки и соответственно интенсивность тепло- и

массообмена. Этот режим заканчивается в точке В, называемой точкой инверсии фаз. В этой точке накопление жидкости в свободном объеме насадки достигает такого значения, при котором наступает обращение или инверсия фаз (жидкость становится сплошной фазой, а газ – дисперсной)» [9].

«Третий режим – режим эмульгирования (линия ВС). В этом режиме газо-жидкостная система по внешнему виду напоминает барботажный слой (пену) или газо-жидкостную эмульсию. Режим эмульгирования соответствует максимальной эффективности аппарата вследствие увеличения поверхности контакта фаз, которая определяется в основном поверхностью газовых пузырей и интенсивной турбулизации потоков. Однако этот режим сопровождается резким увеличением гидравлического сопротивления аппарата.

Кроме того, режим эмульгирования трудно поддерживать без специальных устройств, поскольку узок интервал изменения скоростей газа, при котором насадочный аппарат работает в этом режиме. Режим эмульгирования заканчивается в точке С, называемой точкой захлебывания, а скорость газа соответствующая этой точке – скоростью захлебывания. Скорость захлебывания является максимальной скоростью газа эффективной работы насадочного аппарата» [9].

«Четвертый режим – режим уноса или обращенного движения жидкости, выносимой из аппарата газовым потоком (линия выше точки С). При этом происходит вторичная инверсия фаз. Этот режим на практике не используется» [9].

«Насадочные контактные устройства в настоящее время изготавливаются в основном из металла, полимерных материалов и керамики. Предпочтительными являются насадки из металла, во многих случаях – насадки из нержавеющей стали» [10].

«К контактным устройствам предъявляют следующие технологические требования:



- низкое гидравлическое сопротивление;
- высокая эффективность;
- высокая пропускная способность;
- малая удерживающая способность» [10].

В результате ранее выполненных технологических расчетов, было выявлено, что существующая насадочная часть создает сильное гидравлическое сопротивление (~300 кПа). В результате увеличивается количество затрачиваемых веществ на орошение промывной колонны, таких как жидкий аммиак, технологический конденсат.

Гидравлическое сопротивление определяет необходимые энергозатраты на прокачку газовой фазы через насадку, отсюда следует, что для создания данного гидравлического сопротивления необходимо потратить много энергии.

Изменение насадочной части приведет:

- к снижению гидравлического сопротивления (таблица 5);
- к более полной абсорбции газов, за счет изменения конструкции насадки;
- к уменьшению или исключению «мертвых» зон;
- к уменьшению энергозатрат для перекачивания газов [9].

#### **2.4. Сравнительный расчет гидравлического сопротивления регулярной и нерегулярной насадки**

Для выполнения расчета гидравлического сопротивления необходима характеристика насадок (таблица 4) [9,10]:

Таблица 4 – Характеристики насадочных устройств

Насадка	Удельная поверхность, а, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	Свободный объем, ε, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Эквивалентный диаметр, d <sub>э</sub> , м	Насыпная плотность, ρ, кг/м <sup>3</sup>	Число штук в 1 м <sup>3</sup>
Регулярные керамические кольца Рашига, 50*50*5	110	0,735	0,027	650	8 500
Неупорядоченные стальные кольца Рашига, 25*25*0,8	220	0,92	0,017	640	55 000
Кольца Палля, 25*25*0,6	215	0,9	0,019	455	48 000
Насадка ДАНПАК	360	0,45*	0,055	-	-
ИнжеХим 2000, 24*0,5	168	0,961	0,023	-	65 000
Насадка Mellорак 250У	250	0,95	0,015	-	-
Упаковка Кох-Глитча 250	250	0,95	0,015	125	-

\*- рассчитывается по формуле:  $\varepsilon = \frac{A}{d_{\text{э}}^3} + B$  [25]

Габариты промывной колонны:

- Высота аппарата – 11 000 мм;
- Диаметр – 1 396 мм;
- Объём – 14,6 м<sup>3</sup>;
- Высота насадочной части – 3000 мм
- Насадка – кольца Рашига Навалом

«Гидравлическое сопротивление ΔР обуславливает энергетические затраты на транспортировку газового потока. Рассчитывают по формуле (9):

$$\Delta P = \Delta P_c \cdot 10^{bU}, \quad (9)$$

где ΔР<sub>с</sub> – гидравлическое сопротивление сухой ( не орошаемой жидкостью) насадки, Па;

U – плотность орошения, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>с);

$b$  – коэффициент, для колец Рашига в укладку – 173, для колец Рашига в навал – 184.

Гидравлическое сопротивление сухой насадки  $\Delta P_C$  определяется по уравнению (10):

$$\Delta P_C = \lambda \frac{H}{d_3} \frac{\omega_0^2}{2} \rho_r, \quad (10)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления [26].»

Для беспорядочно насыпанных колец Рашига:

При турбулентном движении ( $Re_y > 40$ ) (11)

$$\lambda = \frac{16}{Re_y^{0.2}}; \quad (11)$$

Для колец Рашига, уложенных в шахматном порядке (12) [27]:

$$\lambda = \frac{2,3}{Re^{0,55}}; \quad (12)$$

Для насадки Меллопак [29] (13):

$$\lambda = \frac{6,6}{Re^{0,55}}; \quad (13)$$

$\omega_0 = \omega/\varepsilon$  – скорость газа в свободном сечении насадки (м/с) (14):

$$\omega = 3 \text{ м/с}. \quad (14)$$

Плотность орошения  $U$  определяется по формуле  $U = \frac{L}{\rho \cdot S}$ , где  $S$  – площадь поперечного сечения колонны,  $\text{м}^2$ ,  $L$  – массовый расход поглотителя,  $\text{кг/с}$ ,  $\rho$  – плотность жидкости»

Площадь поперечного сечения равна:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{1,396}{2}\right)^2 = 1,53 \text{ м}^2, \quad (15)$$

$$U = \frac{L}{\rho \cdot S} = \frac{6,65}{721,56 \cdot 1,53} = 0,006 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}. \quad (16)$$

Гидравлический расчет для колец Рашига навалом:

1. Скорость газа:

$$\omega_0 = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{3}{0,92} = 3,26 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (17)$$

2. Рассчитываем критерий Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = \frac{4 \cdot 3,26 \cdot 0,5554}{220 \cdot 1,28 \cdot 10^{-5}} = 2\,571,9. \quad (18)$$

3. Расчет коэффициента сопротивления  $\lambda$  для насадок:

$$\lambda = \frac{16}{\text{Re}^{0,2}} = \frac{16}{2\,571,9^{0,2}} = 3,33. \quad (19)$$

4. Гидравлическое сопротивление сухой насадки:

$$\Delta P_C = \lambda \frac{H}{d_3} \frac{\omega_0^2}{2} \rho_y = 3,33 \cdot \frac{3}{0,017} \cdot \frac{3,26^2}{2} \cdot 0,5554 = 1\,732,82 \text{ Па.} \quad (20)$$

5. Гидравлическое сопротивление:

$$\Delta P = \Delta P_C \cdot 10^{bU} = 1732,82 \cdot 10^{0,006 \cdot 184} = 22\,016,75 \text{ Па.} \quad (21)$$

Проверочный расчет проведем с помощью программы РТС Mathcad версия 15 (рисунок 18):

#### 2.4.1. Программа РТС Mathcad

РТС Mathcad является уникальной системой для научных и инженерных расчетов. Она относится к классу приложений, называемые PSE (problem solution environment – программная среда для решения задач). Это подразумевает, что ее работа не определяется однозначно действиями пользователя (как, например, в текстовых редакторах), а является результатом работы встроенных алгоритмов [14].

Приложение Mathcad – самый популярный из компьютерных математических пакетов. С его помощью можно решать самые разные математические задачи и оформлять результаты расчетов на высоком профессионально уровне. «При помощи этого пакета осуществляются не только простые и вспомогательные вычисления, но и довольно сложные расчеты и научные исследования, использующие комбинации самых разных численных алгоритмов и аналитических преобразований» [14].

В состав Mathcad входит несколько интегрированных между собой компонентов – текстовый редактор для ввода и правки, вычислительный процессор для проведения расчетов согласно введенным формулам, а также символьный процессор, являющийся системой искусственного интеллекта. Сочетание этих компонентов создает удобную вычислительную среду для

разнообразных математических расчетов и документирования результатов работы [14].

Расчет гидравлического сопротивления

Дополнительный расчет

Площадь поперечного сечения

$$D := 1.396 \text{ м}$$

$$S := \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 1.531$$

$$L := 6.65 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$\rho_1 := 721.56 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$U := \frac{L}{\rho_1 \cdot S} = 6.021 \times 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

Расчет гидравлического сопротивления Для колец Рашига

$$\omega := 3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad \varepsilon := 0.92 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2} \quad d_9 := 0.017 \text{ м}$$

$$a := 220 \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3} \quad \rho := 0.5554 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} \quad H := 3 \text{ м}$$

1. Скорость газа

$$\omega_0 := \frac{\omega}{\varepsilon} = 3.261 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

2. Критерий Рейнольдса

$$\mu := 1.28 \cdot 10^{-5}$$

$$Re := \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = 2.573 \times 10^3$$

3. Коэффициент сопротивления

$$\lambda := \frac{16}{Re^{0.2}} = 3.327$$

4. Гидравлическое сопротивление сухой насадки

$$\Delta P_c := \lambda \cdot \rho \cdot \frac{H \cdot \omega_0^2}{d_9^2} = 1.734 \times 10^3 \text{ Па}$$

5. Гидравлическое сопротивление

$$b := 184$$

$$\Delta P := \Delta P_c \cdot 10^{b \cdot U} = 2.223 \times 10^4$$

Рисунок 18 – Расчёт гидравлического сопротивления Колец Рашига навалом

Аналогично рассчитываем для других вариантов

Гидравлический расчет для колец Рашига упорядоченных:

$$\omega_0 = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{3}{0,735} = 4,08 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad (22)$$

$$Re = \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = \frac{4 \cdot 4,08 \cdot 0,5554}{110 \cdot 1,28 \cdot 10^{-5}} = 6\,440; \quad (23)$$

$$\lambda = \frac{2,3}{Re^{0,375}} = \frac{2,3}{6\,440^{0,375}} = 0,086; \quad (24)$$

$$\Delta P_C = \lambda \frac{H}{d_3} \frac{\omega_0^2}{2} \rho_y = 0,086 \cdot \frac{3}{0,027} \cdot \frac{4,08^2}{2} \cdot 0,5554 = 44,07 \text{ Па}; \quad (25)$$

$$\Delta P = \Delta P_C \cdot 10^{bU} = 44 \cdot 10^{0,006 \cdot 173} = 480,96 \text{ Па}. \quad (26)$$

Проверочный расчет проведем с помощью программы PTC Mathcad версия 15 (рисунок 19):

Расчет гидравлического сопротивления для колец Рашига упорядоченные

$$\omega := 3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad \varepsilon := 0,735 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2} \quad d_3 := 0,027 \text{ м}$$

$$a := 110 \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3} \quad \rho := 0,5554 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} \quad H := 3 \text{ м}$$

1. Скорость газа

$$\omega_0 := \frac{\omega}{\varepsilon} = 4,082 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

2. Критерий Рейнольдса

$$\mu := 1,28 \cdot 10^{-5}$$

$$Re := \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = 6,44 \times 10^3$$

3. Коэффициент сопротивления

$$\lambda := \frac{2,3}{Re^{0,375}} = 0,086$$

4. Гидравлическое сопротивление сухой насадки

$$\Delta P_C := \lambda \cdot \rho \cdot \frac{H \cdot \omega_0^2}{d_3 \cdot 2} = 44,095 \text{ Па}$$

5. Гидравлическое сопротивление

$$b := 173$$

$$\Delta P := \Delta P_C \cdot 10^{b \cdot U} = 485,37 \text{ Па}$$

Рисунок 19 – Гидравлическое сопротивление колец Рашига упорядоченных

Гидравлический расчет для колец Палля:

$$\omega_0 = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{3}{0,90} = 3,33 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad (27)$$

$$Re = \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = \frac{4 \cdot 3,33 \cdot 0,5554}{215 \cdot 1,28 \cdot 10^{-5}} = 2\,688; \quad (28)$$

$$\lambda = \frac{16}{Re^{0,2}} = \frac{16}{2\,688^{0,2}} = 3,29; \quad (29)$$

$$\Delta P_c = \lambda \frac{H}{d_3} \frac{\omega_0^2}{2} \rho_y = 3,29 \cdot \frac{3}{0,019} \cdot \frac{3,33^2}{2} \cdot 0,5554 = 1603,47 \text{ Па}; \quad (30)$$

$$\Delta P = \Delta P_c \cdot 10^{bU} = 1603,47 \cdot 10^{0,006 \cdot 126} = 9\,142,39 \text{ Па}. \quad (31)$$

Проверочный расчет проведем с помощью программы PTC Mathcad версия 15 (рисунок 20):

1. Скорость газа

$$\omega_0 := \frac{\omega}{\varepsilon} = 3,333 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

2. Критерий Рейнольдса

$$\mu := 1,28 \cdot 10^{-5}$$

$$Re := \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = 2,691 \times 10^3$$

3. Коэффициент сопротивления

$$\lambda := \frac{16}{Re^{0,2}} = 3,297$$

4. Гидравлическое сопротивление сухой насадки

$$\Delta P_c := \lambda \cdot \rho \cdot \frac{H \cdot \omega_0^2}{d_3 \cdot 2} = 1,606 \times 10^3 \text{ Па}$$

5. Гидравлическое сопротивление

$$b := 126$$

$$\Delta P := \Delta P_c \cdot 10^{b \cdot U} = 9,216 \times 10^3 \text{ Па}$$

Рисунок 20 – Гидравлическое сопротивление Колец Палля

Гидравлический расчет для насадки Mellorak:



$$\omega_0 = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{3}{0,95} = 3,16 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad (32)$$

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = \frac{4 \cdot 3,16 \cdot 0,5554}{250 \cdot 1,28 \cdot 10^{-5}} = 2\,192,37; \quad (33)$$

$$\lambda = \frac{6,6}{\text{Re}^{0,55}} = \frac{6,6}{2\,192,37^{0,55}} = 0,096; \quad (34)$$

$$\Delta P_c = \lambda \frac{H}{d_3} \frac{\omega_0^2}{2} \rho_y = 0,096 \cdot \frac{3}{0,0152} \cdot \frac{3,16^2}{2} \cdot 0,5554 = 52,44 \text{ Па}; \quad (35)$$

$$\Delta P = \Delta P_c \cdot 10^{bU} = 52,44 \cdot 10^{0,006 \cdot 119} = 271,45 \text{ Па}. \quad (36)$$

Проверочный расчет проведем с помощью программы PTC Mathcad версия 15 (рисунок 21):

1. Скорость газа

$$\omega_0 := \frac{\omega}{\varepsilon} = 3.158 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

2. Критерий Рейнольдса

$$\mu := 1.28 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{Re} := \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = 2.192 \times 10^3$$

3. Коэффициент сопротивления

$$\lambda := \frac{6.6}{\text{Re}^{0.55}} = 0.096$$

4. Гидравлическое сопротивление сухой насадки

$$\Delta P_c := \lambda \cdot \rho \cdot \frac{H \cdot \omega_0^2}{d_3 \cdot 2} = 53.143 \quad \text{Па}$$

5. Гидравлическое сопротивление

$$b := 119$$

$$\Delta P := \Delta P_c \cdot 10^{b \cdot U} = 276.678 \quad \text{Па}$$

Рисунок 21 – Гидравлическое сопротивление Mellorak

Гидравлический расчет для насадки Кох -Глитч:

$$\omega_0 = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{3}{0,95} = 3,16 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad (37)$$

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = \frac{4 \cdot 3,16 \cdot 0,5554}{250 \cdot 1,28 \cdot 10^{-5}} = 2\,192,37; \quad (38)$$

$$\lambda = \frac{6,6}{\text{Re}^{0,55}} = \frac{6,6}{2\,192,37^{0,55}} = 0,096; \quad (39)$$

$$\Delta P_c = \lambda \frac{H}{d_3} \frac{\omega_0^2}{2} \rho_y = 0,096 \cdot \frac{3}{0,015} \cdot \frac{3,16^2}{2} \cdot 0,5554 = 52,44 \text{ Па}; \quad (40)$$

$$\Delta P = \Delta P_c \cdot 10^{bU} = 52,44 \cdot 10^{0,006 \cdot 110} = 239,71 \text{ Па}; \quad (41)$$

Проверочный расчет проведем с помощью программы РТС Mathcad версия 15 (рисунок 22):

1. Скорость газа

$$\omega_0 := \frac{\omega}{\varepsilon} = 3.158 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

2. Критерий Рейнольдса

$$\mu := 1.28 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{Re} := \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = 2.192 \times 10^3$$

3. Коэффициент сопротивления

$$\lambda := \frac{6.6}{\text{Re}^{0.55}} = 0.096$$

4. Гидравлическое сопротивление сухой насадки

$$\Delta P_c := \lambda \cdot \rho \cdot \frac{H \cdot \omega_0^2}{d_3 \cdot 2} = 53.143 \quad \text{Па}$$

5. Гидравлическое сопротивление

$$b := 110$$

$$\Delta P := \Delta P_c \cdot 10^{b \cdot U} = 244.221 \quad \text{Па}$$

Рисунок 22 – Гидравлическое сопротивление Кох -Глитч:  
Гидравлический расчет для насадки ДанПак:

$$\omega_0 = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{3}{0,45} = 6,67 \frac{\text{М}}{\text{с}} \quad (42)$$

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = \frac{4 \cdot 6,67 \cdot 0,5554}{360 \cdot 1,28 \cdot 10^{-5}} = 3\,214,12 \quad (43)$$

$$\lambda = \frac{16}{\text{Re}^{0,2}} = \frac{16}{3\,214,12^{0,2}} = 3,18 \quad (44)$$

$$\Delta P_C = \lambda \frac{H}{d_3} \frac{\omega_0^2}{2} \rho_y = 3,18 \cdot \frac{3}{0,055} \cdot \frac{6,67^2}{2} \cdot 0,5554 = 2\,143 \text{ Па} \quad (45)$$

$$\Delta P = \Delta P_C \cdot 10^{bU} = 2\,143 \cdot 10^{0,006 \cdot 33} = 3\,380 \text{ Па} \quad (46)$$

Проверочный расчет проведем с помощью программы РТС Mathcad версия 15 (рисунок 23):

1. Скорость газа

$$\omega_0 := \frac{\omega}{\varepsilon} = 6.667 \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

2. Критерий Рейнольдса

$$\mu := 1.28 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{Re} := \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = 3.214 \times 10^3$$

3. Коэффициент сопротивления

$$\lambda := \frac{16}{\text{Re}^{0.2}} = 3.182$$

4. Гидравлическое сопротивление сухой насадки

$$\Delta P_C := \lambda \cdot \rho \cdot \frac{H \cdot \omega_0^2}{d_3 \cdot 2} = 2.142 \times 10^3 \text{ Па}$$

5. Гидравлическое сопротивление

$$b := 33$$

$$\Delta P := \Delta P_C \cdot 10^{b \cdot U} = 3.385 \times 10^3 \text{ Па}$$

Рисунок 23 – Гидравлическое сопротивление ДанПак  
Гидравлический расчет для насадки Инжехим:

$$\omega_0 = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{3}{0,96} = 3,125 \frac{\text{М}}{\text{с}} \quad (47)$$

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = \frac{4 \cdot 3,125 \cdot 0,5554}{167 \cdot 1,28 \cdot 10^{-5}} = 3\,247,80 \quad (48)$$

$$\lambda = \frac{133}{\text{Re}} + 2,34 = \frac{133}{3\,247,8} + 2,34 = 2,38 \quad (49)$$

$$\Delta P_C = \lambda \frac{H}{d_3} \frac{\omega_0^2}{2} \rho_y = 2,38 \cdot \frac{3}{0,023} \cdot \frac{3,125^2}{2} \cdot 0,5554 = 842,2 \text{ Па} \quad (50)$$

$$\Delta P = \Delta P_C \cdot 10^{b_U} = 842,2 \cdot 10^{0,006 \cdot 33} = 1328,678 \text{ Па} \quad (51)$$

Проверочный расчет проведем с помощью программы РТС Mathcad версия 15 (рисунок 24):

1. Скорость газа

$$\omega_0 := \frac{\omega}{\varepsilon} = 3.122 \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

2. Критерий Рейнольдса

$$\mu := 1.28 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{Re} := \frac{4 \cdot \omega_0 \cdot \rho}{a \cdot \mu} = 3.225 \times 10^3$$

3. Коэффициент сопротивления

$$\lambda := \frac{133}{\text{Re}} + 2.34 = 2.381$$

4. Гидравлическое сопротивление сухой насадки

$$\Delta P_C := \lambda \cdot \rho \cdot \frac{H \cdot \omega_0^2}{d_3 \cdot 2} = 840.559 \text{ Па}$$

5. Гидравлическое сопротивление

$$b := 33$$

$$\Delta P := \Delta P_C \cdot 10^{b \cdot U} = 1.328 \times 10^3 \text{ Па}$$

Рисунок 24 – Гидравлическое сопротивление Инжехим

Результаты расчета гидравлического сопротивления для всех видов насадок приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Расчет гидравлического сопротивления

Насадка	Гидравлическое сопротивление сухой насадки, Па	Гидравлическое сопротивление сухой насадки (PТC Mathcad), Па	Гидравлическое сопротивление, Па	Гидравлическое сопротивление (PТC Mathcad), Па
Регулярные керамические кольца Рашига, 50*50*5	44,07	44,09	480,96	485,37
Неупорядоченные стальные кольца Рашига, 25*25*0,8	1 732,82	1 734	22 016,75	22 230
Кольца Палля, 25*25*0,6	1 603,47	1 606	9 142,39	9 216
Насадка ДАНПАК	2 143	2 142	3 380	3 385
ИнжеХим 2000, 24*0,5	842,2	840,56	1328,678	1 328
Насадка Mellорак 250У	52,44	53,143	271,45	276,678
Упаковка Кох-Глитча	52,44	53,143	239,71	244,221

В результате расчетов гидравлического сопротивления видно, что регулярные насадки имеют наименьшее гидравлическое сопротивление, в следствии нам необходимо затратить меньше энергии на его преодоление. Результат проверочного расчета отличается от выполненного последовательно, в результате человеческого фактора и использованием программой Mathcad логических алгоритмов расчета.

## 2.5. Расчет насадочной части

Для проведения экономического анализа выберем 3 насадки: Кольца Палля, ИнжеХим 2000, упаковка Кох-Глитча 250.

В случае замены насадочной части, рассчитываем объём необходимой насадки.

Промывная колонна имеет следующие характеристики, диаметр – 1 ,393 метра, высота насадки – 3 метра.

Рассчитываем объем насадочной части (46):

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot H = \pi \cdot 0,696^2 \cdot 3 = 4,572 \text{ м}^3 \quad (52)$$

Насадка Кох-Глитча – регулярная насадка, ее разрабатывают относительно колонны.

Насадки кольца Палля и ИнжеХим 2000 нерегулярные насадки засыпаются в пересчете на необходимый объем, в 1 м<sup>2</sup> количество элементов для Палля – 48 000 штук, ИнжеХим 2000 – 65 000 штук.

Тогда (53-54):

$$n_{\text{Палля}} = V \cdot n_{1\text{м}} = 4,572 \cdot 48\,000 = 219\,456 \text{ штук} \quad (53)$$

$$n_{\text{ИнжеХим}} = V \cdot n_{1\text{м}} = 4,572 \cdot 65\,000 = 297\,180 \text{ штук} \quad (54)$$

Для сравнения необходимо посчитать количество колец Рашига (55):

$$n_{\text{Рашига}} = V \cdot n_{1\text{м}} = 4,572 \cdot 55\,000 = 251\,460 \text{ штук} \quad (55)$$

Вывод. Расчеты показали, что для обеспечения объема 4,5 м<sup>3</sup> необходимо 219 456 колец Палля, 297 180 элементов насадок ИнжеХим и 251 460 колец Рашига.

## 2.6. Расчет экономических затрат на замену насадки.

Для замены упаковки необходимо сравнить затраты на загрузку используемыми кольцами Рашига и с предполагаемым вариантом

В таблице 6 представлены цены на выбранные насадки [34].

Посчитаем затраты на покупку насадок для необходимого объема насадки.

Расчет введем по формуле (56):

$$C_{\text{вв}} = C \cdot V \quad (56)$$

В результате, суммы на затраты для покупки насадок, приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Стоимость и цены

Насадка	Цена, руб. за 1 м <sup>3</sup>	Стоимость, руб.
Кольца Рашига	21 981	100 497
Кольца Палля	36 635	167 495
ИнжеХим 2000	45 600	207 483
Кох-Глитча	39 444	39 444

«Расчёт затрат на модернизацию оборудования рассчитывается по формуле (57):

$$K_{\text{мод}} = C_{\text{вв}} + (P_{\text{сб}} + P_{\text{дем}}) \cdot K_{\text{нак}} - C_{\text{дем}} \quad (57)$$

где  $K_{\text{мод}}$  – затраты на модернизацию оборудования;

$C_{\text{вв}}$  – стоимость покупки насадки;

$C_{\text{дем}}$  – стоимость демонтируемых насадок по цене металлолома (20 рублей за кг);

$P_{\text{сб}}$  – расходы на сборочные и монтажные работы;

$P_{\text{дем}}$  – расходы на демонтаж;

$K_{\text{нак}}$  – коэффициент накладных расходов ( $K_{\text{нак}} = 1,5$ )» [29].

«Расходы на сборочные и монтажные работы составляют:

$$\begin{aligned} P_{\text{сб}} &= T_{\text{сб}} \cdot Z_{\text{ср.м.}} \cdot (1 + K_{\text{пр}} + K_{\text{н}} + K_{\text{вн}} + K_{\text{у}} + K_{\text{пф}} + K_{\text{д}} + K_{\text{с}}) = \\ &= 24 \cdot 1\,500 \cdot (1 + 0,25 + 0 + 0,1 + 0,12 + 0,15 + 0,08 + 0,262) = \quad (58) \\ &= 70\,632 \text{ рублей} \end{aligned}$$

где  $T_{\text{сб}}$  – трудоёмкость сборки и монтажа вновь вводимых узлов и приборов в нормо-часах;

$Z_{\text{ср.м.}}$  – средневзвешенная тарифная ставка рабочих бригады, выполняющей модернизацию, руб./час;

$K_{\text{пр}}$  – коэффициент премирования, принимается по данным базового предприятия ( $K_{\text{пр}} = 0,2 \dots 0,45$ );

$K_{\text{н}}$  – коэффициент доплат за работу в ночное время ( $K_{\text{н}} = 0,2$ ), учитывается только для части работ, приходящуюся на ночное время;

$K_{\text{вн}}$  – коэффициент выполнения норм ( $K_{\text{вн}} = 0,1$ );

$K_{\text{у}}$  – коэффициент доплат за условия труда ( $K_{\text{у}} = 0,12$ );

$K_{\text{пф}}$  – коэффициент доплат за профмастерство ( $K_{\text{пф}} = 0,15$ );

$K_{\text{д}}$  – коэффициент доплаты до часового, дневного и месячного фонда ( $K_{\text{д}} = 0,08$ );

$K_{\text{с}}$  – единый социальный налог ( $K_{\text{с}} = 0,262$ )» [29].

Расходы на демонтажные работы составляю:

$$\begin{aligned} P_{\text{дем}} &= T_{\text{дем}} \cdot Z_{\text{ср.м.}} \cdot (1 + K_{\text{пр}} + K_{\text{н}} + K_{\text{вн}} + K_{\text{у}} + K_{\text{пф}} + K_{\text{д}} + K_{\text{с}}) P_{\text{сб}} = \\ &= 40 \cdot 2\,000 \cdot (1 + 0,25 + 0 + 0,1 + 0,12 + 0,15 + 0,08 + 0,262) = \quad (59) \\ &= 156\,960 \text{ рублей} \end{aligned}$$

$C_{\text{дем}}$  – рассчитывается по цене металлолома, 1 м<sup>3</sup> колец Рашига весит 640 кг/м<sup>3</sup>, в случае что насадочная часть почти 5 м<sup>3</sup>, с продажи насадок:



$$C_{\text{дем}} = 640 * 5 * 20 = 64\ 000 \text{ рублей} \quad (60)$$

Тогда затраты на модернизацию, путем обновления насадки, составили:

$$\begin{aligned} K_{\text{мод}} &= C_{\text{вв}} + (P_{\text{сб}} + P_{\text{дем}}) \cdot K_{\text{нак}} - C_{\text{дем}} = \\ &= 100497 + (70\ 632 + 156\ 920) \cdot 1,5 - 64\ 000 = 377\ 825 \text{ рублей} \end{aligned} \quad (61)$$

В случае замены насадочной части на кольца Палля:

$$\begin{aligned} K_{\text{мод } 1} &= C_{\text{вв}} + (P_{\text{сб}} + P_{\text{дем}}) \cdot K_{\text{нак}} - C_{\text{дем}} = \\ &= 167\ 495 + (70\ 632 + 156\ 920) \cdot 1,5 - 64\ 000 = 444\ 823 \text{ рублей} \end{aligned} \quad (62)$$

При внедрении насадки «Инжехим 2000»

$$\begin{aligned} K_{\text{мод } 2} &= C_{\text{вв}} + (P_{\text{сб}} + P_{\text{дем}}) \cdot K_{\text{нак}} - C_{\text{дем}} = \\ &= 207\ 483 + (70\ 632 + 156\ 920) \cdot 1,5 - 64\ 000 = 484\ 811 \text{ рублей} \end{aligned} \quad (63)$$

Для реализации упаковки Кох-Глитча необходимо докупить распределительное устройство, средняя цена устройства – 37 000 рублей.

Монтаж оборудования:

$$\begin{aligned} P_{\text{сб}} &= T_{\text{сб}} \cdot Z_{\text{ср.м.}} \cdot (1 + K_{\text{пр}} + K_{\text{н}} + K_{\text{вн}} + K_{\text{у}} + K_{\text{пф}} + K_{\text{д}} + K_{\text{с}}) = \\ &= 24 \cdot 3\ 000 \cdot (1 + 0,25 + 0 + 0,1 + 0,12 + 0,15 + 0,08 + 0,262) = \\ &= 141\ 264 \text{ рублей} \end{aligned} \quad (64)$$

Тогда капитальные затраты на модернизацию составят:

$$\begin{aligned} K_{\text{мод } 3} &= C_{\text{вв}} + (P_{\text{сб}} + P_{\text{дем}}) \cdot K_{\text{нак}} - C_{\text{дем}} = \\ &= 39\ 444 + 37\ 000 + (141\ 264 + 156\ 920) \cdot 1,5 - 64\ 000 = \\ &= 459\ 720 \text{ рублей} \end{aligned} \quad (65)$$

По итогам проведенного расчета капитальных затрат на модернизацию действующей установки путем обновления или замены насадочной части получена следующая диаграмма (рисунок 25).

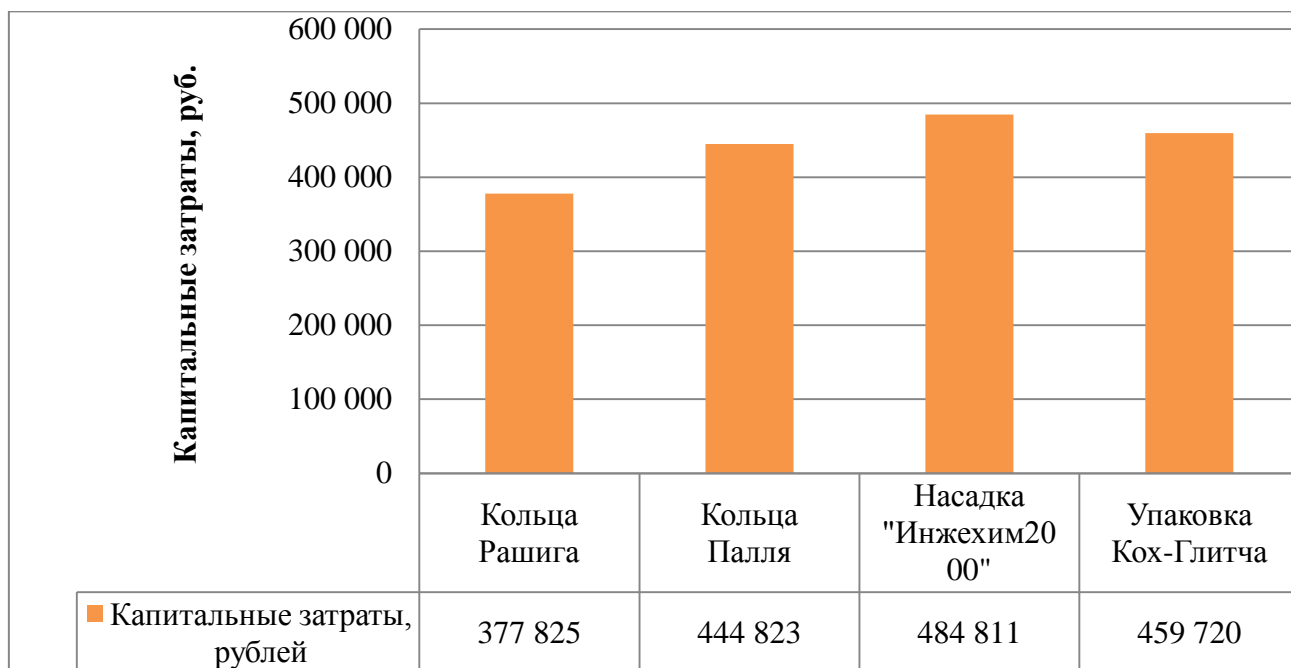


Рисунок 25 – Сравнение капитальных затрат

#### Выводы к главе

В результате расчета гидравлического сопротивления сухой и смоченной насадки видно, что регулярные насадки имеют наименьшее значение гидравлического сопротивления. Реализованная насадка из колец Рашига имеет гидравлическое сопротивление равное 22 230 Па, тогда как более совершенные кольца Палля – 9 216 Па.

Если использовать разработку ИнжеХим, то насадки создает гидравлическое сопротивление 1 328 Па. Самое минимальное гидравлическое сопротивление имеют регулярные установки, например упаковка Кох-Глитча – 244 Па. Капитальные затраты на замену насадочной части в зависимости от конструкционных особенностей составляют от

377 825 рублей до 484 811 рублей. В случае капитального ремонта установки производства карбамида, при необходимости замены насадочной части на аналогичную – кольца Рашига, затраты составят 377 825 рублей.

Если проведем модернизацию и заменим на кольца Палля, затраты составят 444 823 рублей, при замене на эффективную упаковку Кох –Глитча – 459 720 рублей.

Итоги проведенного техно-экономического анализа подтверждают необходимость замены насадочной части для повышения эффективности абсорбции газов дистилляции.

Заменой насадочной части решается ряд конструктивных проблем действующей насадки, таких как: отсутствие постоянных каналов течения жидкости, исключения «мертвых зон», увеличение площади контакта фаз, создания стабильного гидравлического режима работы промывной колонны производства карбамида.

## Глава 3 Конструкционные материалы. Коррозионная стойкость

### 3.1. Конструкционные материалы и коррозионная стойкость

На современном уровне развития техники значение имеют конструкционные материалы, используемые в промышленности. Особенно это относится к химическим производствам, где оборудование эксплуатируется в жестких условиях при одновременном воздействии агрессивной среды, высокой температуры, давления, а также механических нагрузок, истирания и т. п. В таких условиях конструкционные материалы подвержены коррозии и в меньшей степени эрозии, вызываемой только механическим воздействием [2].

Под коррозией принято понимать процесс физико – химического взаимодействия с агрессивной средой. В научной литературе различают 4 вида коррозии: электрохимическая коррозия, водородная, кислородная коррозия и химическая. «Коррозия классифицируется по характеру поражения металла: сплошная или общая и местная;

по условиям протекания: газовая, в жидких металлах, в неэлектролитах, в электролитах, атмосферная, почвенная, биокоррозия, электрокоррозия, под напряжением и при другом воздействии внешних факторов;

по условиям контакта с агрессивной средой: при полном, неполном и периодическом погружении, струйная, щелевая» [36].

В таблице 7 представлены виды коррозии металлов.

Таблица 7 – Виды коррозии

Параметр	Вид	Пояснение
1	2	3
По механизму протекания	Химическая	Процесс взаимодействия коррозионной среды с металлом, при котором происходит окислительно-восстановительная реакция. В результате окисляется металл, восстанавливается окислительный компонент среды. Протекает одновременно.

Продолжение таблицы 7

1	2	3
	Электрохимическая	Процесс воздействия металла с коррозионной средой, при котором ионизация атомов металла и восстановление окислительного компонента коррозионной среды протекает в зависимости от электродного потенциала.
По виду коррозионной среды	Газовая	Химическая коррозии протекающая при минимальном содержании влаги (не более 0,1%) или при высоких температурах.
	Атмосферная	Коррозия в атмосфере воздуха или любого влажного газа
	Подземная	Протекает в почвах и грунтах
	Биокоррозия	Коррозия, протекает под влиянием жизнедеятельности микроорганизмов
По условиям протекания	Контактная	Вид коррозии, вызванный контактов металлов, имеющих разные стационарные потенциалы в данном электролите.
	Радиационная	Обусловленная действием радиоактивного излучения.
	Внешним и блуждающим током	Возникает под влиянием тока от внешнего источника или блуждающего тока
	Под напряжением	Возникающая коррозия под влиянием коррозионной среды и механического воздействия.

По характеру изменения поверхности металла или сплава различают: сплошная (рисунок 26 а, б) равномерная и неравномерная; избирательная коррозия (рисунок 26 в) – разрешается одна структурная составляющая или один компонент; местная (локальная) коррозия охватывает отдельные участки поверхности металла (рисунок 26 г, д, е).

Местная коррозия может быть выражена в виде отдельных пятен (рисунок 26 г), язв – разрушений, имеющих вид раковин (рисунок 26 д), или точек, глубоко проникающих в металл (рисунок 26 е). Подповерхностная коррозия (рисунок 26, ж) начинается на поверхности, но затем распространяется в глубине металла. Продукты коррозии оказываются сосредоточенными в полостях металла. Этот вид коррозии вызывает вспучивание и расслоение металлических изделий. Щелевая коррозия

вызывает разрушение металла под прокладками, в зазорах, резьбовых креплениях и т.д.

Межкристаллитная коррозия (рисунок 26, з) характеризуется разрушением металла по границам зерен. Она особенно опасна тем, что внешний вид металла не меняется, но он быстро теряет прочность и пластичность и легко разрушается. Связано это с образованием между зернами рыхлых малопрочных продуктов коррозии. Этому виду разрушений особенно подвержены хромистые и хромоникелевые стали, никелевые и алюминиевые сплавы [36].

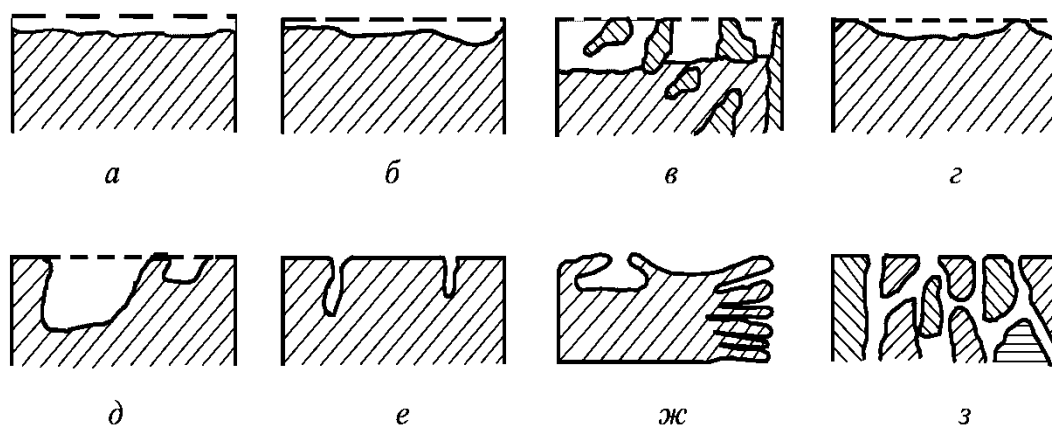


Рисунок 26 – Виды коррозии

Материалы в производстве карбамида подвержены газовой коррозии. Основной газовой компонент – двуокись углерода. Карбонильная коррозия особенно характерна для железа (сталей). Коррозия никеля в окиси углерода протекает с образованием легкокипящего тетракарбонила никеля, полностью распадающегося про 200 °С. Легированные хромистые (типа X13-X17) и хромоникелевые (X18N9) стали подвержены карбонильной коррозии, а высокохромистые (X20-X30) и высоколегированные стали, содержащие 23% Cr и 20% Ni, также марганцовистые бронзы совсем не корродируют в среде CO. Двуокись углерода наименее агрессивна, но ее присутствие, например в

воздухе, усиливает процесс окисления. Действие двуокиси углерода наиболее опасно для железа и нелегированных сталей [2]. Гидродинамические нагрузки в условиях коррозионно-агрессивного действия вызывает явление коррозионной кавитации. Коррозионная кавитация возникает при быстром движении среды и сильном ударном механическом ее действии на металл, что приводит к возникновению трещин [2].

При повышении температуры ускоряются процессы диффузии, соответственно уменьшается перенапряжение катодных процессов и увеличивается интенсивность и скорость коррозии. В то же время растворимость кислорода с увеличением температуры уменьшается. Поэтому скорость коррозии не возрастает непрерывно с температурой, а имеет определенный максимум.

Давление также ускоряет коррозию металлов в электролитах. Оно изменяет растворимость участвующих в процессе коррозии газов и, в первую очередь, кислорода, может вызвать механические напряжения в металле, влияет на разложение продуктов коррозии [2]. Наиболее характерными на стадии синтеза карбамида для емкостного и колонного оборудования являются следующие коррозионные поражения:

- коррозия по зоне термического влияния сварного шва;
- ножевая коррозия по границе сплавления основного металла с металлом шва. Наиболее опасный вид поражения, непосредственно приводящий к возникновению сквозных пропусков по сварным швам;
- язвенная коррозия в сепарационном пространстве;
- конденсационная коррозия.

Для теплообменного оборудования дополнительно появляется:

- утонение стенки трубки в зоне воздействия греющего пара;
- хлоридное растрескивание. Наиболее характерное коррозионное явление для конденсаторов карбамата производства карбамида. Коррозия по линии сплавления шва обварки трубы с наплавкой трубной доски. Язвенная коррозия внутренней поверхности теплообменных труб в месте шва обварки

трубы. На основании ГОСТа 9.908-85 коррозионную стойкость характеризуется количественными показателями, выбор которых определяется видом коррозии и эксплуатационными требованиями. Основной показатель – время достижения заданной (допустимой) степени коррозионного поражения металла в определенных условиях [3]. Показатели коррозионной стойкости могут быть количественными, полуколичественными и качественными. Основные количественные показатели коррозии и коррозионной стойкости металла приведены ниже в таблице 8 [3].

Таблица 8 – Количественные показатели коррозии и коррозионной стойкости

Вид коррозии	Основные количественные показатели коррозии и коррозионной стойкости		
	Коррозионный эффект (интегральный показатель коррозии)	Скоростной (дифференциальный) показатель коррозии	Показатель коррозионной стойкости
Сплошная коррозия	Глубина проникновения коррозии Потеря массы на единицу площади	Линейная скорость коррозии Скорость убыли массы	Время проникновения коррозии на допустимую (заданную) глубину* Время до уменьшения массы на допустимую (заданную) величину*
Коррозия пятнами	Степень поражения поверхности		Время достижения допустимой (заданной) степени поражения*
Питтинговая коррозия	Максимальная глубина питтинга	Максимальная скорость проникновения питтинга	Минимальное время проникновения питтингов на допустимую (заданную) глубину*
	Максимальный размер поперечника питтинга в устье Степень поражения поверхности питтингами		Минимальное время достижения допустимого (заданного) размера поперечника питтинга в устье* Время достижения допустимой (заданной) степени поражения*



Продолжение таблицы 7

Вид коррозии	Основные количественные показатели коррозии и коррозионной стойкости		
	Коррозионный эффект (интегральный показатель коррозии)	Скоростной (дифференциальный) показатель коррозии	Показатель коррозионной стойкости
Межкристаллитная коррозия	Глубина проникновения коррозии Снижение механических свойств (относительного удлинения, сужения, ударной вязкости, временного сопротивления разрыву) Снижение механических свойств (относительного удлинения, сужения)	Скорость проникновения коррозии	Время проникновения на допустимую (заданную) глубину* Время снижения механических свойств до допустимого (заданного) уровня*  Пороговый коэффициент интенсивности напряжений при коррозионном растрескивании**
Коррозионная усталость	Глубина (длина) трещин	Скорость роста трещин	Количество циклов до разрушения образца** Условный предел коррозионной усталости** Пороговый коэффициент интенсивности напряжений при коррозионной усталости**
Расслаивающая коррозия	Степень поражения поверхности отслоениями Суммарная длина торцов с трещинами Глубина проникновения коррозии	Скорость проникновения коррозии	-

Показатели коррозионной стойкости, отмеченные в таблице знаком\*, определяют из временной зависимости соответствующего интегрального показателя коррозии графическим способом, приведенным на схеме, или аналитически из его эмпирической временной зависимости  $y = f(\tau)$ , находя

для допустимого (заданного) значения  $u_{\text{доп}}$  соответствующую величину  $t_{\text{доп}}$  [3].

Показатели коррозионной стойкости при воздействии на металл механических факторов, в том числе остаточных напряжений, отмеченные в таблице знаком\*\*, определяют непосредственно при коррозионных испытаниях [3].

Одной из проблем, с которой сталкиваются производители карбамида, является обеспечение долговечности оборудования технологических линий [21].

К конструкционным материалам в узлах синтеза и дистилляции производства карбамида с полным жидкостным рециклом предъявляются наиболее жесткие условия в связи с коррозионной активностью.

Основная причина коррозии – присутствие цианата аммония ( $\text{NH}_4\text{NCO}$ ), являющегося сильным электролитом. Кроме того, коррозионной активностью обладает плав карбамида, коррозия имеет электрический характер [35].

«Карбамат аммония, присутствующий в реакционной массе, является веществом, обладающим высокой коррозионной активностью. Общая скорость коррозии углеродистых сталей может быть более 900 мм/год» [30].

«Узел синтеза работает в среде жидкого плава, двуокиси углерода, аммиака и углеаммонийных солей; узел дистилляции – в водном растворе карбамида при 160 °С и избыточном давлении 17 кгс/см<sup>2</sup>. В колонне синтеза узким местом является смесители. Значительной эрозии подвержены элементы насадки и футеровки в местах ввода  $\text{CO}_2$ . На стадии дистилляции наблюдаются местные локальные очаги коррозии сварных швов и основного металла в местах фланцевых соединений» [35].

Основной причинной коррозии узла синтеза являются: неравномерная подача кислорода в поток  $\text{CO}_2$  для пассивации стали и большая скорость подачи газов. Причинной эрозии в аппаратах узла дистилляции – большая скорость газов, а также образование завихрений потока.

По мере накопления опыта производства карбамида, технологи пришли к использованию высоколегированных сталей аустенитного класса. Основную группу представляют хромо-никелевые стали, легированные молибденом, которые обладают способностью в восстановительных средах.

Согласно ГОСТу 5632-2014 [4] нержавеющие стали в зависимости от структуры подразделяют на классы:

- мартенситный - стали с основной структурой мартенсита;
- мартенсито-ферритный - стали, содержащие в структуре кроме мартенсита не менее 10% феррита;
- ферритный - стали, имеющие структуру феррита (без превращений);
- аустенито-мартенситный - стали, имеющие структуру аустенита и мартенсита, количество которых можно изменять в широких пределах;
- аустенито-ферритный - стали, имеющие структуру аустенита и феррита (феррит более 10%);
- аустенитный - стали, имеющие структуру устойчивого аустенита.

Подразделение стали на классы по структурным признакам является условным, так как предполагает только одну термическую обработку, а именно - охлаждение на воздухе после высокотемпературного нагрева (свыше 900°C) образцов небольших размеров. Поэтому структурные отклонения в стали браковочным признаком не являются [4].

### **3.2. Выбор материала**

Для обеспечения коррозионной стойкости применяются аустенистые хромоникельмолибденовые стали типа 18-22-2, стабилизированные титаном (10X17H13M2T, 10X17H13M3T, 08X17H15M3T) или ниобием. Долгое время использовались стали 316LUG (03X17H14M3 «Карбамидного качества») с вводом кислорода воздуха в узел синтеза карбамида.

«В 1990 –е годы Stamicarbon совместно Sadvik начали работы над гипердуплексом Safereх, основной целью разработок составилось создание

материала, способного к пассивации в условиях синтеза без добавления кислорода в плав» [30].

Другая проблема применения дуплексной нержавеющей стали связана с тем, что исходная микроструктура может меняться после дальнейшей обработки стали, например при сварке.

Из выше сказанного, можно сделать вывод, что сохраняется потребность в дальнейшем совершенствовании материалов из дуплексной нержавеющей стали, которые применяются в установках по производству карбамида [42. 44].

Компанией Sandvik Intellectual Property AB совместно с учёными со всего мира разрабатывают новые сочетания металлов, для создания коррозионно стойкой стали используемой в производстве карбамида.

Низкое качество материала также вызывает коррозию в процессе производства мочевины, что приводит к нарушению сварных швов. Неоднородность материала – ещё одна причина коррозии. Эти факторы показывают, что стабильность является необходимым условием для хорошей коррозионной стойкости.

Что касается состава карбамидных сталей, Cr оказывает благородное влияние на коррозионную стойкость, Ni в аустенитных сталях вреден, когда в технологическом растворе низкое содержание пассивирующего агента – кислорода.

«Ферритно-аустенитные нержавеющие стали предложены, как материал в процессе получения мочевины. Высокая прочность этих сталей обуславливает использования в оборудовании высокого давления, а содержание никеля придает устойчивость к коррозии в бескислородных условиях. Таким образом, ферритно-аустенитная сталь должна иметь высокое содержание Cr и низкое содержание Ni, что бы иметь хорошую стойкость в среде карбамида при бескислородных условиях» [45].

Разработанная супер дуплексная нержавеющая сталь, описанная в патенте WO 95/00674 [45], Safurex компанией Sadvik по заказу Stamicarbon

производит улучшение свойств данной стали. Эффективность использования супер дуплексной нержавеющей стали в производстве карбамида хорошо, но при повышенных температурах, свыше 200 °С, в сочетании с низким содержанием кислорода, повышается коррозия.

Разработка материала китайскими учеными основанного на изменение технологии изготовления стали. Hipped материалы изобретения патента CN 105899706А показывают меньшие потери веса и неселективную эрозию. Соотношение аустенитных зазоров иллюстрирует, что Hipped материалы имеют более изотропную микроструктуру, чем традиционно изготовленные Safurex [43].

«Одной из ведущих компаний по производству карбамида-Stamicarbone в 2014 году была подана заявка на регистрацию патента «Corrosion resistant duplex steel alloy, objects made thereof, and method of making the alloy» на разработку горячего изостатического пресованного ферритно-аустенитного стального сплава. Элементарный состав включающий % массовый: CO – 0,05; Si – 0,8; MnO – 4,0; Cr более 29-35; Ni 3,0-10; MoO – 4,0; N 0,30-0,55; CuO -0,8; WO – 3,0; SO – 0,03; CeO – 0,2; остальное Fe и неизбежные примеси. Сплав HIPed ферритно-аустенитная сталь, описанная в данном патенте, возможно использовать не только на существующих установках, построенных на аустенитных нержавеющей сталях, но также и на установках с использованием высоко реактивных материалов, таких как титан и цирконий» [46].

Для снижения скорости коррозии сталей в производстве карбамида необходимо: поддерживать равномерную подачу кислорода в CO<sub>2</sub> в количестве не менее 0,5%; применять глубокую очистку от сернистых соединений; применять в качестве сварочного материала нужные аустенистые стали типа 10X17H13M3T [35].

На действующей установке производства карбамида используются коррозионно-стойкие стали марки 10X17H13M3T, аппараты на стадии синтеза футерованы молибденистой сталью.

Разработанная максимально коррозионная стойкая сталь для синтеза мочевины в 1996 под названием Safurex. Сегодня более 80 заводов по всему миру включили более 200 единиц оборудования высокого давления в Safurex, уделяя особое внимание безопасности, надежности и производительности. Причиной внедрения Safurex в производстве – устранение риска активной коррозии, чтобы минимизировать кислородную пассивацию, а также устранить конденсационную коррозию, коррозионное растрескивание под напряжением. Основываясь на 20 летний опыт эксплуатации, большинство проблем с коррозии упомянутые выше не существует с использованием Safurex. Это приводит к меньшему количеству обслуживания, ремонтов и инспекции; то есть значительно снизить эксплуатационные расходы завода. Со стороны завода сокращение потребности воздуха для пассивации делаая процесс карбамида более эффективным. Сокращение воздуха повысило безопасность работы завода, сокращение выбросов  $\text{NH}_3$  и увеличение мощности выхода карбамида [38].

В основном Safurex применяется на установках по производству карбамида Stamicarbon, но Safurex® также применяется в оборудовании, используемом на заводах по производству всех других лицензиаров технологий получения карбамида [38].

Чтобы добиться требуемого качества и стабильности, Sandvik придерживается определенных производственных показателей и требования к контролю качества, предназначенные для Safurex®. Помимо требований к качеству Sandvik, компания Stamicarbon также предъявляет строгие требования, касающиеся отношение к коррозионной стойкости Safurex® в карбамате аммония. Об этом говорится в нескольких характеристики Stamicarbon. Кроме того, компания Stamicarbon регулярно посещает производство Sandvik для контрольной проверки.

Наряду с высокими стандартами качества, установленными для основных материалов Safurex®, надежность Safurex® оборудования также зависит от технологии изготовления, например, от сварки. Также в этом

отношении компания Stamicarbon предъявляет строгие требования и активно следит за качеством сварки путем тщательного контроля, осмотров в производственном цехе.

Safurex® оказался самым надежным материалом при любых обстоятельствах для всех производств карбамида. Вместе с опытом и контролем качества Sandvik и Stamicarbon это позволяет предприятиям работать гладко в течение длительного времени даже в непредвиденных условиях. Установленное на данный момент оборудование Safurex® привели к максимальной окупаемости инвестиций для производств карбамида и беспрецедентному достижению в области карбамида. [38].

### **3.3. Экспериментальная часть**

Согласно международному стандарту коррозионное испытание – это испытание для оценки коррозионного поведения металла, загрязнение среды продуктами коррозии, эффективности защиты от коррозионной среды [28].

К качественным показателям коррозии относятся: визуальные наблюдения с описанием, фотографированием и наблюдением за изменением внешнего вида, к количественному – измерение массы.

Скоростью коррозии является количественный показатель – средняя скорость коррозии за единицу времени.

Скорость коррозионного разрушения определяется по изменению веса образца.

Согласно ГОСТу 9.505-85 [6] сущность метода заключается в выдерживании металлических образцов, лишенных окислы и (или) ржавчины, в растворе кислоты, при определенной температуре в течение определенного времени с последующей оценкой защитной способности.

#### **Методы отбора образцов**

Образцами для испытаний служат плоские металлические пластины из листовой стали, например, прямоугольной формы размером с толщиной не

более 2 мм; - прутки катанки длиной -  $(100\pm 2)$  мм; полосы труб - длиной  $(50\pm 5)$  мм, шириной  $(30\pm 5)$  мм, а также другие виды образцов, имитирующих форму конкретных изделий.

Подготовка к испытаниям:

-В сосуд для травления наливают раствор кислоты из расчета  $5-10 \text{ см}^3$  на  $1 \text{ см}^2$  поверхности образца.

-Образцы тщательно промывают в растворителе с помощью тампона или волосяной кисти с последующей промывкой в новой порции того же растворителя. Степень обезжиривания контролируют полным смачиванием водой поверхности образца (растекание капли воды) или по отсутствию на фильтровальной бумаге темного пятна от капли растворителя.

-После обезжиривания образцы сушат в струе горячего воздуха (температура  $40-50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и помещают на 5-6 ч в эксикатор с осушителем. Очищенные образцы берут фильтровальной бумагой или пластмассовым пинцетом.

-При наличии на образцах окалины ее удаляют предварительным травлением в растворе серной кислоты, не содержащей ингибитор, при  $(80\pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ . В сосуд без мешалки образцы погружают, обеспечивая контакт всей поверхности образцов с кислотой [5].

Проведение испытания

Для испытания использовался образец из коррозионно-стойкой марки стали 10X17H13M3T.

Растворы для травления:

Сталь марки 10X17H13M3T с: 20% HCl; раствор карбамида.

Температура  $(20\pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ .

Время травления – 72 часа.

После травления образцы промывают в течение 30 мин в проточной воде, затем последовательно в бензине, ацетоне, эфире. Затем высушивают в эксикаторе в течение 30 мин и взвешивают. Результат взвешивания в граммах записывают с точностью до четвертого десятичного знака.



Образцы перед испытанием были очищены механически от сажи и нагара, путем обработки наждачной бумагой. Обезжирены этиловым спиртом. Определена масса образцов. Данные приведены в таблице 8.

После помещения образцов в испытательные растворы, в стакане с раствором соляной кислоты наблюдалось выделение газа. Немного позднее раствор стал желтого цвета. На момент окончания испытания раствор был темно-зеленого цвета, на дне стакана был темный осадок. В стакане с раствором карбамида никаких визуальных изменений не происходило, представлено на рисунке 27.



Рисунок 27 - Образцы в коррозионной среде

После испытания образцы были вымыты под водопроводной водой, промыты дистиллированной водой, высушены в сушильном шкафу, и повторно измерена масса. Образцы после осушки представлены на рисунке 28.

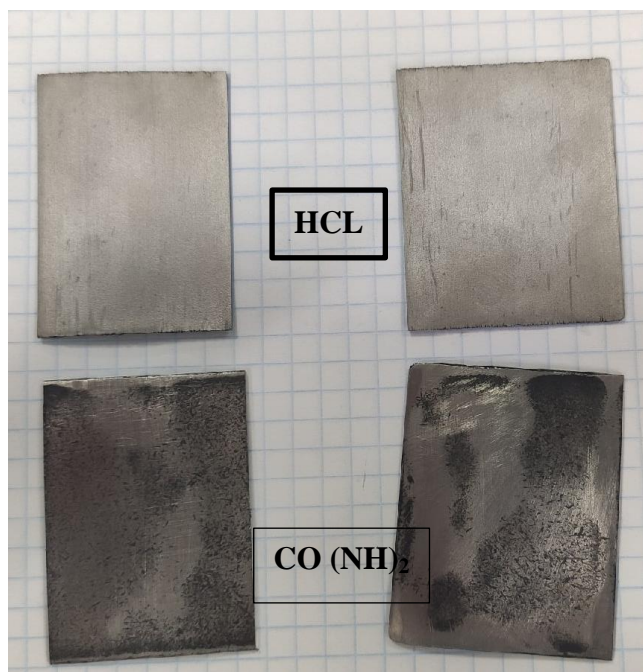


Рисунок 28 - образцы после воздействия агрессивной среды

#### Обработка результатов испытаний

Удельную потерю массы каждого образца ( $M$ ),  $\text{г}/\text{м}^2$ , вычисляют по формуле:

$$M = \frac{m_1 - m_2}{S} \quad (66)$$

где  $m_1$ - масса образца до травления, г;

$m_2$ - масса образца после травления, г;

$S$ - площадь протравленной поверхности образца,  $\text{м}^2$ .

Скорость коррозии ( $v$ ),  $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ , для каждой серии образцов вычисляют по формуле:

$$v = \frac{M}{\tau} \quad (67)$$

где  $M$ - удельная потеря массы для каждой серии образцов,  $\text{г}/\text{м}^2$ ;

$\tau$ - продолжительность травления серии образцов, ч.

Образец 1.

Удельную потерю массы:

$$M = \frac{m_1 - m_2}{S} = \frac{12,8785 - 12,8769}{0,026079} = 0,06135 \text{ г}/\text{м}^2 \quad (68)$$

Скорость коррозии:

$$v = \frac{M}{\tau} = \frac{0,06135}{72} = 0,0008521 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}} \quad (69)$$

Образец 2.

Удельную потерю массы:

$$M = \frac{m_1 - m_2}{S} = \frac{13,8076 - 13,8056}{0,032394} = 0,06174 \text{ г}/\text{м}^2 \quad (70)$$

Скорость коррозии:

$$v = \frac{M}{\tau} = \frac{0,06174}{72} = 0,0008575 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}} \quad (71)$$

Проверочный расчет при травлении в карбамидной среде проведен с помощью программы РТС Mathcad версия 15 (рисунок 29):

Образец 1

$$m_{1д} := 12.8785$$

$$m_{1п} := 12.8769$$

$$S_1 := 0.026079$$

$$\tau := 72$$

$$M_1 := \frac{m_{1д} - m_{1п}}{S_1} = 0.061$$

$$v_1 := \frac{M_1}{\tau} = 8.521 \times 10^{-4}$$

Образец 2

$$m_{2д} := 13.8076$$

$$m_{2п} := 13.8056$$

$$S_2 := 0.032394$$

$$M_2 := \frac{m_{2д} - m_{2п}}{S_2} = 0.062$$

$$v_2 := \frac{M_2}{\tau} = 8.575 \times 10^{-4}$$

Рисунок 29 – Поверочный расчет образцов 1 и 2

Образец 3.

Удельную потерю массы:

$$M = \frac{m_1 - m_2}{S} = \frac{12,6857 - 8,1423}{0,025312} = 179,4959 \text{ г/м}^2 \quad (72)$$

Скорость коррозии:

$$v = \frac{M}{\tau} = \frac{179,4959}{72} = 2,492998 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}} \quad (73)$$

Образец 4.

Удельную потерю массы:

$$M = \frac{m_1 - m_2}{S} = \frac{14,5272 - 9,2735}{0,03327} = 157,911 \text{ г/м}^2 \quad (74)$$

Скорость коррозии:

$$v = \frac{M}{\tau} = \frac{179,4959}{72} = 2,1932 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}} \quad (75)$$

Проверочный расчет при травлении в среде соляной кислоты проведен с помощью программы РТС Mathcad версия 15 (рисунок 30):

Образец 3

$$m_{3Д} := 12.6857$$

$$m_{3П} := 8.1423$$

$$S_3 := 0.025312$$

$$M_3 := \frac{m_{3Д} - m_{3П}}{S_3} = 179.496$$

$$v_3 := \frac{M_3}{\tau} = 2.493$$

Образец 4

$$m_{4Д} := 14.5272$$

$$m_{4П} := 9.2735$$

$$S_4 := 0.03327$$

$$M_4 := \frac{m_{4Д} - m_{4П}}{S_4} = 157.911$$

$$v_4 := \frac{M_4}{\tau} = 2.193$$

Рисунок 30 – Проверочный расчет образцов 3 и 4

Результаты проведенных испытаний представлены в таблице 9.

Таблица 9 - Результаты испытания

Образца	Масса до испытания, г	Масса после испытаний, г	Разница, г	Изменение %	Площадь, м <sup>2</sup>	Время, ч	Удельная потеря массы, г/м <sup>2</sup>	Скорость коррозии, г/(м <sup>2</sup> ·ч)	Скорость коррозии Mathcad, г/(м <sup>2</sup> ·ч)
Карбамид 30%	12,8785	12,8769	0,0016	0,01	0,026079	72	0,06135	0,0008521	0,0008521
Карбамид 30%	13,8076	13,8056	0,0020	0,01	0,032394	72	0,6174	0,0008575	0,0008575
HCl 20%	12,6857	8,1423	4,5434	35,82	0,025312	72	179,4959	2,492998	2,4930
HCl 20%	14,5272	9,2735	5,2537	36,16	0,03327	72	157,9110	2,1932	2,1930

Вывод:

По результатам испытания выявлено, что в среде карбамида коррозия очень незначительная (0,1 %) или 7,46г/м<sup>2</sup>·год. Для сравнения данный материал помещен в среду соляной кислоты, изменение массы составило - 35,82 %. Отсюда следует, что данная марка стали подвергается коррозии в кислой среде, а в среде карбамида устойчива.

## Вывод к главе

В производство получения карбамида сырье и полупродукты получения обладают коррозионной активностью. Основным компонентом вызывающей газовую коррозию – углекислый газ. В получаемом растворе карбамат аммония и цианат аммония обладают коррозионной активностью в реакционной среде.

В ходе развития применяемых металлов, сформировалась отдельная группа сталей, называемых «карбамидные». В России основное развитие направлено на модернизацию аустенистых хромоникельмолибденовых сталей типа 18-22-2, стабилизированных титаном (10X17H13M2T, 10X17H13M3T, 08X17H15M3T). Тогда как зарубежные коллеги, лицензиат производства карбамида – Stamicarbon, совместно с Sadvik создали марку стали, выпускаемую под именем Safurex. Данная сталь имеет высокую коррозионную стойкость, в результате чего улучшается эффективность производства, снижаются затраты на ремонты.

В результате исследования на коррозионную стойкость в среде карбамида сталь 10X17H13M3T выдерживалась 72 часа в растворе карбамида, по результатам показала  $0,0008 \text{ г/ м}^2 \text{ час}$ , по шкале устойчивости – «весьма стойкая – скорость коррозии  $<0,0009-0,0045 \text{ г/ м}^2 \text{ час}$ ). Данная сталь обладает коррозионной стойкостью к воздействиям реакционной среды, а значит ее применение в производстве карбамида возможно.

## Заключение

Производство карбамида в Российской Федерации занимает второе место по сравнению с другими удобрениями, что обусловлено широким использованием его не только для производства продуктов сельскохозяйственной отрасли, но и для промышленности, транспорта, фармацевтики, медицины.

Историческое развитие производства карбамида пришло к использованию замкнутой системы, с полной рециркуляции аммиака и диоксида углерода. Технологические схемы с полузамкнутой системой используются в Российской Федерации, где реализована частичная рециркуляция аммиака и диоксида углерода. В результате модернизации действующих производств, совместно с научно-исследовательскими институтами или компаниями лицензиатами производства карбамида, постепенно заводы, находящиеся на территории России, приходят к замкнутой системе рециркуляции аммиака и диоксид углерода.

В процессе анализа действующего производства карбамида было выявлено, что узел промывочной колонны является неэффективным.

Были выделены следующие проблемы:

- увеличиваются затраты на сырье и энергоресурсы в результате высокого гидравлического сопротивления насадочной части промывной колонны;
- низкая эффективность насадки;
- малая полезная площадь использования насадки.

Было установлено, что из-за конструкционной особенности колец Рашига невозможно провести упорядоченную укладку, что приводит к образованию «мертвых зон», в которых не происходит смачивание, то есть образуются постоянные каналы течения жидкости.

Рассмотрены различные виды насадок и рассчитано их гидравлическое сопротивление.



В результате расчета гидравлического сопротивления сухой и смоченной насадки видно, что регулярные насадки имеют наименьшее значение гидравлического сопротивления. Реализованная насадка из колец Рашига имеет гидравлическое сопротивление равное 22 230 Па, тогда как более совершенные кольца Палля – 9 216 Па. Если использовать разработку ИнжеХим, то насадки создает гидравлическое сопротивление 1 328 Па. Самое минимальное гидравлическое сопротивление имеют регулярные установки, например упаковка Кох-Гличта – 244 Па.

Оценена коррозионная стойкость материала насадки в условиях работы промывочной колонны. Показано, что сталь марки 10Х17Н13М3Т проявляет стойкость в условиях работы колонны (скорость коррозии равна 0,0008 г/м<sup>2</sup> г), по шкале устойчивости – «весьма устойчива».

Предложена в качестве насадочного устройства регулярная насадка, обладающая высокой эффективностью, коррозионной стойкостью и малой удерживающей способностью.

Рассчитаны экономические затраты на модернизацию промывной колонны. Капитальные затраты на замену насадочной части в зависимости от конструктивных особенностей составляют от 377 825 рублей до 484 811 рублей. При проведении модернизации и замены на кольца Палля, затраты составят 444 823 рублей, при замене на эффективную упаковку Кох –Глитча – 459 720 рублей.

Предлагаемая модернизация промывной колонны увеличивает эффективность очистки и снижает потери целевых продуктов

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Антрощенко В. И., Алексеев А. М. Технология связанного азота – под ред. акад. АН УССР В.И. Антрощенко – К. : Вища шк. Головное из-во, 1985 г. 327 с.
2. Воробьева Г.Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств. Изд. 2-е пер. и доп. М., «Химия», 1975 – 816с.
3. ГОСТ 2081 – 2010. Карбамид. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2011 – 27с.
4. ГОСТ 5632-2014. Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. М., Издательство стандартов, 2015 – 38 с.
5. ГОСТ 9.505-86. Единая система защиты от коррозии и старения. Ингибиторы кислотной коррозии. М., Издательство стандартов, 1987 – 16 с.
6. ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. М.: Издательство стандартов, 1987 – 17с.
7. Жаворонков Н. В.. Справочник азотчика. М.: Книга по Требованию, 2014 г. – 457 с.
8. Журнал «ПроНПЗ»/ Нефтепереработка [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://pronpz.ru/kolonny/nasadochnye-tarelchatye-kolonny.html>, (Дата обращения: 15.09.2020 г).
9. Иваняков С.В., Коньгин С.Б.. Гидродинамика насадочных аппаратов: метод. указ. Самара; Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 44с
10. Каган А.М.. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов. Под ред. Лаптева А.Г. Казань: Отечество, 2013, - 454 с.

11. Карбамид: технология производства. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=773](http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=773), (Дата обращения: 20.10.2019)
12. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов /. – 14-е изд., стер. – М.: Альянс, 2008. 753 с.
13. Кафаров В.В. Принципы создания безотходных химических производств. М.: Химия, 1982 г. 288с.
14. Кирьянов Д.В. Mathcad 15/ Mathcad Prime 1.0. СПб, : Петербург, 2012 г. – 432 с.
15. Колонное оборудование / [Инженерно-внедренческий центр ИНЖЕХИМ – г. Казань [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ingehim.ru/files/kolonnoe-oborudovanie.pdf>, свободный. (Дата обращения: 05.02.2021)
16. Кузеев И.Р. Основное оборудование технологических установок НПЗ: учебное пособие. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. 129 с.
17. Кучерявый В. И., Лебедев В. В.. Синтез и применение карбамида. Изд-во «Химия»: 1970 г. 448 с.
18. Лебедев Ю.Н., Зайцева Т.М., Чекменёв В.Г.. Структурированная насадка ВАКУПАК / // Химия и технология топлив и масел. – 2002. -№1. -С. 29-31.
19. Лебедев Ю.Н., Чекменёв В.Г., Зайцева Т.М.. Насадка ВАКУПАК для вакуумных колонн // Химия и технология топлив и масел. – 2004. -№1. -С. 48-53.
20. Обзор технологий производства карбамида UNDE.[ Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.newchemistry.ru/printletter.php?n\\_id=8051](https://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=8051), (Дата обращения: 20.10.2019)
21. Панченко С.В., Степанов В.Н., Катышева Г.В., Масякин С.Л., Дьяков С.В. О причинах ускоренного выхода отвода трубопровода производства карбамида. Химическая техника № 12/2015

22. Патент 2188706 РФ, МПК7 В01J19/32/ Регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов / Г.К. Зиберт; заявитель и патентообладатель Дочернее ОАО “Центральное конструкторское бюро нефтеаппаратуры” ОАО “Газпром”. – № 2001101106/12; заявл. 15.01.01; опубл. 10.09.02. (Дата обращения: 15.05.2020)

23. Патент 2224591 РФ, МПК7 В01J19/32. Регулярная насадка для тепломассообменных аппаратов / Р.Н. Зиберт; заявитель и патентообладатель Р.Н. Зиберт. – № 2003102360/15; заявл. 29.01.03; опубл. 27.02.04. (Дата обращения: 10.05.2020)

24. Патент EA201990748/ Method for united production of carbamide for liquid for cleaning exhaust gases of diesel engines and carbamido-ammonia mixture/ Стамикарбон Б.В Иобретатели Юй Меннен Йоханнес Хенрикус. – № 201990748; заяв. 29.03.2016; опубл. 30.08.2019 (Дата обращения: 20.05.2020)

25. Применение химических веществ в животноводстве: Под ред. проф. Н.А. Шманенкова, изд. Колос, 1964 г. – 223 с.

26. Разработка справочника «Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот», раздел 8 «Производство карбамида и КАС» к.т.н., главный специалист по карбамиду ОАО НИИК Сергеев Ю.А. : III Московский Международный Химический Форум, 2015

27. Ратовский Ю.Ю., Лебедев Ю.Н., Чекменёв В.Г.. Насадки ВАКУПАК и КЕДР для вакуумных колонн установок АВТ // Химия и технология топлив и масел. –2004. -№1. -С. 55-57.

28. Россина Н.Г., Попов Н.А., Жилиякова М.А., Корелин А.В. Коррозия и защита металлов. в 2ч.Ч. 1. Методы исследований коррозионных процессов: учебно-методическое пособие /. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 108 с.

29. Сергеев А.В. Методические указания к выпускной квалификационной работе (экономическое обоснование проекта) для студентов всех форм обучения специальностей 240801 Машины и аппараты

химических производств, 240401 Химическая технология органических веществ. – Тольятти.: Тольяттинский государственный университет, – 29 с.

30. Сергеев Ю.А., Кузнецов Н.М., Чирков А.В.. Карбамид: свойства, производство, применение/ Монография. Нижний Новгород: Кварц, 2015 – 554 с.

31. Соколовский А. А. Унанянц Т. П.. Краткий справочник по минеральным удобрениям. М. : «Химия», 1977г. – 376 с.

32. Устранение газовых выбросов производства карбамида путем их утилизации в технологическом процессе /А. В. Панин ОАО «Научно-исследовательский и проектный институт карбамида», E-mail: panin@niik.ru. – промышленный сервис №2 2015г.

33. Химические волокна. Словарь справочник. Под ред. проф. Конкина А.А.М.: «Химия», 1973г. – 192 с.

34. Цены на насадки. [Электронный ресурс]. Режим доступа – <https://russian.alibaba.com> (Дата обращения: 03.03.2021)

35. Черняк Я.С., Дуров В.С. Ремонтные работы на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях. М., «Химия», 1976 – 264с.

36. Экилак В.В. Теория коррозии и защиты металлов. Методическое пособие по спецкурсу, Ростов-на Дону, 2004 г. – 67 с.

37. AdBlue Market Research Report - Global Forecast to 2027; [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/ad-blue-market-790> (Дата обращения: 10.10.2019)

38. Alex Scheerder, Barinder Ghai/ 1,5 million years off added value using Safurex/ Nitrogen + Syngas 2021 – 24 pages

39. AMACS Woven Gauze Structured Packing. [Электронный ресурс]. – режим доступа <https://www.amacs.com/> (Дата обращения: 10.05.2020)

40. How green is the urea sector? [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://www.downtoearth.org.in/news/agriculture/how-green-is-the-urea-sector--64836> (Дата обращения: 10.11.2019)

41. INTALOX® STRUCTURED PACKING: U.S. Patents No. 4,670,196 & 4,740,334 (Дата обращения: 10.05.2020)

42. Lahiri A.K. Advance in material for the fertilizer industry / FAI Training Programme for Senior maintenance engineers in the fertilizer industry, 12-22 December 2010, Muscat, Oman.

43. Patent CN 105899706A/ Corrosion resistant duplex steel alloy, objects made thereof, and method of making the alloy/Патентообладатель: Sandvik Intellectual Property AB/ начало действия 02.07.2015; публикация 24.08.2016; Подача 23.12.2014 (Дата обращения: 15.02.2021)

44. Patent EA 036426 B1/ Duplex stainless steel and its applicationю/ Гуллбер Даниель, Харальдссон Кристина, Вильсон Андерс и другие; Патентообладатель Stamicarbhone B.V./Подачи заявки 20.07.2016; Публикации и начала действия 10.11.2020 (Дата обращения: 15.02.2021)

45. Patent WO 1995000674A1/ Ferritic-austenitic stainless steel and use of the steel/ Kangas Pasi, N. Slottsgatan; Патентообладатель Sandvik AB; Подачи заявки 21.06.1996; Публикации и начала действия 20.06.1994 (Дата обращения: 20.02.2021)

46. Patent WO 2015099530A1. Corrosion resistant duplex steel alloy, objects made thereof, and method of making the alloy/ Larsson Linn, Gullberg Daniel; Патентообладатель Stamicarbhone B.V.; Подачи заявки 27.12.2013; Публикации и начала действия 02.07.2015 (Дата обращения: 25.02.2021)

47. Urea production.[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nawabi.de/chemical/urea.asp> (Дата обращения: 15.02.2020)

48. Zero emission urea process and plant/ Пат. EA026551B1/ Стамикарбон Б.В заявитель и патентообладатель: Стамикарбон Б.В – № 201391430; заяв. 2012.03.30; опубл. 2017.04.28. (Дата обращения: 15.10.2019)