

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)

18.03.02 «Энерго- ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии
и биотехнологии»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Повышение производительности процесса синтеза карбамида на
ПАО «КуйбышевАзот»

Обучающийся

В.И. Миронов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, В.С. Гончаров

(ученая степень, ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Аннотация

Бакалаврская работа Миронова В.И. посвящена детальному исследованию возможностей оптимизации процесса синтеза карбамида на производственных мощностях ПАО «КуйбышевАзот».

Основной целью исследования является: повышение производительности процесса синтеза карбамида на ПАО «КуйбышевАзот», путем оптимизации технологических параметров и подбора вспомогательного оборудования.

Структура работы отражает последовательность научного поиска и состоит из введения, двух разделов основного содержания, заключения и списка используемой литературы. Во введении акцентируется внимание на необходимости модернизации производства, вызванного глобальными трендами в области повышения производительности, энергоэффективности и экологичности. Здесь же формулируются цель и задачи исследования.

Первый раздел представляет собой анализ литературных источников и включает обзор мировых тенденций в области технологий синтеза карбамида. В ходе анализа особое внимание уделено описанию технологической схемы, применяемой на ПАО «КуйбышевАзот».

Во втором разделе рассматриваются такие параметры, как термодинамическая стабильность реакционной среды, кинетические характеристики процесса и гидродинамические особенности распределения потоков. Проведены расчеты материального и теплового балансов, которые обеспечивают оптимальное использование исходных реагентов и распределение тепловых потоков. Прочностной анализ оборудования позволяет оценить надежность конструктивных элементов при эксплуатации в условиях высоких температур и давлений. Особое внимание уделено расчету и выбору дополнительного теплообменного оборудования.

Объем пояснительной записки составляет 90 страниц, включая 14 графических иллюстраций, 16 таблиц и список из 60 научных и технических источников.

Annotation

Mironov V. I.'s bachelor's thesis probes deep into optimizing urea synthesis at PJSC KuibyshevAzot, seeking to refine technological parameters and carefully select ancillary equipment to boost productivity. Composed of an introduction, two analytical sections, a conclusion, and a reference list, the work mirrors scientific exploration from broad premise to concrete technical detail.

In the introduction, the thesis situates its mission within a global push for heightened output, energy efficiency, and environmental responsibility, establishing clear objectives that emerge from these urgent trends. The first section navigates a global literature landscape, contrasting evolving carbamide technologies with the existing frameworks at PJSC KuibyshevAzot. This comparative view reveals how the plant's current design meets (or falls short of) international benchmarks.

The second section drills into the technical heart of the process: examining thermodynamic stability, kinetic pathways, and fluid distribution patterns that govern reaction efficiency. Here, calculations balance material and heat flows, ensuring each reagent is used optimally. Rigorous equipment stress analyses confirm structural integrity under high-temperature, high-pressure conditions, while careful selection of heat exchange devices underscores the plant's potential for advanced modernization.

Altogether, this 90-page explanatory narrative—enriched by 14 figures, 16 tables, and 60 authoritative sources—provides a structured, data-driven roadmap for elevating urea synthesis to meet contemporary industrial demands.

Содержание

Аннотация	2
Введение.....	7
1 Исследование существующих методов производства и конструктивных особенностей оборудования для синтеза карбамида	9
1.1 Обзор исходных реагентов, промежуточных соединений, добавок и характеристик конечной продукции	9
1.1.1 Аммиачная вода и безводный аммиак	9
1.1.2 Углекислый газ.....	10
1.1.3 Растворы карбамата аммония и двууглекислого аммония, бикарбоната/гидрокарбоната аммония	11
1.1.4 Карбамид.....	13
1.1.5 Азот.....	14
1.1.6 Насыщенный водяной пар среднего и низкого давления	15
1.1.7 Пар и конденсат.....	15
1.1.8 Сжатый технологический воздух	16
1.1.9 Сжатый воздух КИПиА.....	16
1.2 Классификация технологий синтеза карбамида и исследование кинетических закономерностей химических процессов.....	16
1.3 Анализ областей применения карбамида в промышленности и смежных отраслях.....	20
1.4 Комплексный анализ современных промышленных методов синтеза карбамида и изучение динамики развития глобального рынка	24
1.5 Характеристика технологического оборудования: конструктивные особенности, материалы изготовления и эксплуатационные параметры	29
1.5.1 Реактор	29
1.5.2 Отпарная колонна	30
1.5.3 Колонна дистилляции.....	31
1.5.4 Конденсатор.....	32
1.5.5 Промывная колонна.....	32

1.6 Детализация производственного процесса синтеза карбамида	
ПАО «КуйбышевАзот».....	33
1.6.1 Подробности процесса подачи жидкого аммиака	34
1.6.2 Технология синтеза и дистилляции под высоким давлением	35
1.6.3 Технологические процессы дистилляции при среднем и низком давлении.....	35
1.6.4 Процесс вакуум-выпарки	36
1.6.5 Гранулирование и обеспыливание воздуха.....	37
1.6.6 Очистка сточных вод	37
1.6.7 Система контроля и автоматизации технологического процесса	39
2 Инженерные решения и конструктивные доработки для повышения эффективности синтеза карбамида на пао «куйбышевазот»	42
2.1 Расчет оптимальных параметров функционирования реактора синтеза карбамида	42
2.1.1 Аналитический расчет и данные материального баланса	46
2.1.2 Исследование влияния температуры и давления на производительность и степень превращения в реакторе синтеза карбамида.....	51
2.2 Материальный баланс реактора синтеза карбамида: расчет и анализ.....	54
2.3 Тепловой баланс реактора синтеза карбамида: анализ и расчеты	60
2.4 Прочностные расчеты конструкционных элементов реактора	63
2.4.1 Расчет обечайки нагруженной внутренним избыточным давлением.....	65
2.4.2 Определение расчетной толщины стенки	65
2.5 Расчет и подбор дополнительного теплообменного оборудования	68
2.5.1 Расчет межтрубного пространства.....	71
2.5.2 Расчет трубного пространства	73
2.5.3 Расчет поверхности теплообмена.....	77

2.6 Анализ опасных и вредных факторов на объектах химического производства	78
Заключение	81
Список используемой литературы и используемых источников.....	82

Введение

Карбамид, химическая формула которого $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, является одним из самых востребованных азотных удобрений в мире, уступая по объемам производства лишь аммиачной селитре (NH_4NO_3). Интенсивное развитие сельского хозяйства и промышленности приводит к ежегодному увеличению его выпуска, что подтверждает важнейшую роль этого вещества в аграрной отрасли. Благодаря высокой концентрации азота карбамид широко применяется не только в растениеводстве, но и в качестве сырья для производства других химических соединений.

Одним из важных направлений применения карбамида в химической промышленности является его конденсация с формальдегидом для получения карбамидоформальдегидных полимеров (КФП). Эти материалы широко используются в производстве синтетических смол и клеевых составов, свойства которых зависят от параметров синтеза, таких как температура, концентрация реагентов и время реакции. Благодаря универсальности, КФП нашли применение в деревообработке и производстве строительных материалов.

Карбамид также играет значимую роль в фармацевтике, как подтверждают исследования [56], [57]. Он включается в состав снотворных (люминал, бромурал), диуретиков, препаратов для заживления ран, а также используется в косметических и дезинфицирующих средствах. Таким образом, универсальные свойства карбамида обеспечивают его востребованность как в химической, так и в фармацевтической промышленности.

В сельском хозяйстве карбамид зарекомендовал себя как удобрение, легко усваиваемое растениями. Как подробно описано в [13], [51], [52], [59], [60], его трансформация почвенными микроорганизмами сначала в углекислый аммоний ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$), а затем в азотнокислые соединения, делает его чрезвычайно эффективным для стимулирования роста растений.

«Дополнительным преимуществом является то, что карбамид не вызывает химических ожогов, в отличие от аммиачной селитры, что позволяет применять его как для корневого внесения, так и для внекорневых обработок (опрыскивания листьев и стеблей).

Содержание 46,6 % азота делает карбамид экономически выгодным удобрением» [13]. Кроме того, его роль выходит за пределы агрономии: он используется как заменитель в биосинтезе животного белка, что подчеркивает его значимость для пищевой и фармацевтической отраслей.

Рост объемов производства карбамида подчеркивает необходимость совершенствования технологий его выпуска. Использование современных научно-технических разработок, как указано в [13], позволяет улучшать не только производственные показатели, но и снижать экологическое воздействие. Даже небольшие усовершенствования в технологии или аппаратуре способны существенно повысить эффективность процесса, что делает инновации важным фактором развития отрасли. В связи с выше изложенным целью данной работы является: повышение производительности процесса синтеза карбамида на ПАО «КуйбышевАзот», путем оптимизации технологических параметров и подбора вспомогательного оборудования.

Достижение поставленной в работе цели выполняется решением следующих задач:

- провести анализ текущих тенденций в производстве карбамида, а также выявить факторы, способствующие росту объемов его производства;
- предложить технологические и конструктивные решения направленные на повышение производительности синтеза карбамида на ПАО «КуйбышевАзот», с соблюдением необходимых экологических норм производства.

Из выше изложенного следует, что тема данной работы: Повышение производительности процесса синтеза карбамида на ПАО «КуйбышевАзот» является актуальной.

Исследование существующих методов производства и конструктивных особенностей оборудования для синтеза карбамида

1.1 Обзор исходных реагентов, промежуточных соединений, добавок и характеристик конечной продукции

1.1.1 Аммиачная вода и безводный аммиак

Аммиак (NH_3) – важное неорганическое соединение, широко используемое в химической промышленности. Его молекула состоит из одного атома азота, связанного тремя атомами водорода ковалентными связями. Аммиак выполняет двойственную функцию: он ингибирует фермент амидазу и одновременно обладает нейротоксичными свойствами, как отмечено в исследованиях [9], [33], [52].

При стандартных условиях ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$, атмосферное давление) аммиак представляет собой бесцветный газ с резким запахом и плотностью $0,771\text{ кг/м}^3$. «При охлаждении до $-33,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ он переходит в жидкую фазу с плотностью 682 кг/м^3 , а при дальнейшем снижении температуры до $-77,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ кристаллизуется, образуя кубическую структуру.

Критическая температура аммиака составляет $132,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которой давление насыщенных паров достигает $11,3\text{ МПа}$, и граница между жидкостью и паром исчезает, превращая вещество в сверхкритическую жидкость. Это свойство имеет значение для анализа фазовых переходов и применения аммиака в технологических процессах» [9]. Зависимость давления от температуры охватывает диапазон от точки сжижения при атмосферном давлении до критической точки, что позволяет изучать его поведение в различных условиях (рисунок 1).

Такие данные важны для расчета технологических процессов, где жидкость нагревается или испаряется. Например, это может быть применимо в системах охлаждения, испарителях или при изучении жидкостей, находящихся под давлением.

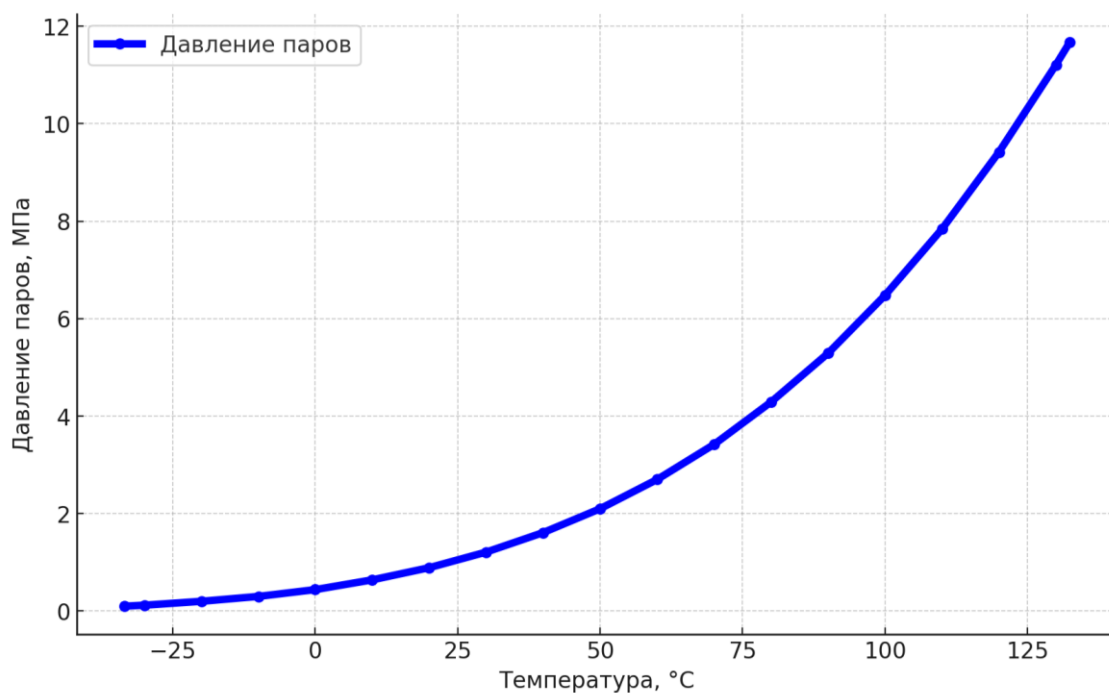


Рисунок 1 – Давление паров аммиака в зависимости от температуры

«Газообразный аммиак хорошо растворяется в воде, образуя аммиачный раствор, известный как аммиачная вода.

Например, при температуре 200 °C и давлении 0,1 МПа один литр воды способен растворить до 700 литров аммиака, а изменение температуры или давления значительно влияет на степень растворимости этого газа» [9].

1.1.2 Углекислый газ

«Углекислый газ (CO_2) – бесцветное вещество с легким запахом и плотностью 1,98 кг/м³, что делает его примерно в полтора раза тяжелее воздуха. Благодаря уникальным физико-химическим свойствам CO_2 широко используется в технологических процессах. Переход из газообразного состояния в жидкое происходит при давлении 3,6 МПа и температуре 0 °C, что открывает возможности для его промышленного применения» [33].

«Особенность CO_2 – образование твердой фазы («сухого льда») при –78,5 °C при резком снижении давления. Для плавления требуется давление свыше 0,54 МПа, а при 10,13 МПа температура плавления достигает –54 °C. Эти свойства имеют решающее значение для управления фазовыми переходами, критическими параметрами которых являются температура

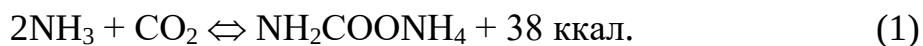
+31 °С и давление 7,64 МПа, важные для процессов сжижения и транспортировки» [52].

Растворимость CO₂ в воде варьируется с температурой: при 20 °С она составляет 0,9 л/л, но увеличивается до 1,71 л/л при понижении температуры. Это делает CO₂ незаменимым в производственных процессах, таких как синтез карбамида, где он взаимодействует с аммиаком.

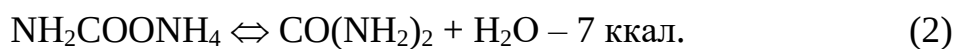
Углекислый газ востребован в производстве удобрений, напитков и в инновационных технологиях, например, сверхкритической экстракции. Его универсальные свойства делают CO₂ незаменимым в современных химико-технологических процессах.

1.1.3 Растворы карбамата аммония и двууглекислого аммония, бикарбоната/гидрокарбоната аммония

«Карбамат аммония (NH₂COONH₄), являясь полупродуктом процесса синтеза карбамида, получается в результате реакции при высоком давлении и температуре:



Дегидратация карбамата приводит к образованию карбамида (CO(NH₂)₂) с выделением воды:



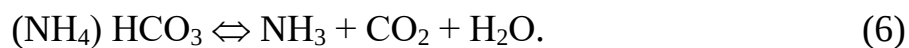
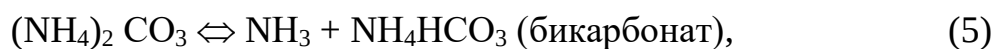
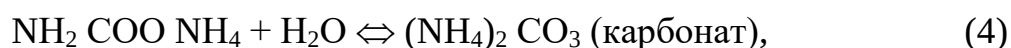
Интересно, что скорость реакции дегидратации заметно увеличивается в жидкой фазе. Так, поскольку чистый карбамат представляет собой твердое вещество с температурой плавления 152 °С, его растворимость вначале невелика, но по мере растворения в выделяющейся воде температура плавления снижается, что способствует увеличению скорости реакции. При содержании воды в растворе в 20 % вес. температура плавления карбамата составляет 120 °С, а при 35% – уже 60 °С. Избыточный аммиак также ускоряет реакцию, поскольку он вступает в взаимодействие с образующимся

карбамидом, а накопление воды в конечном итоге замедляет этот процесс, приводя к установлению равновесного состояния. Интересно, что при наличии избытка аммиака температура плавления карбамата снижается до 118,5 °С» [9].

«В стандартных условиях карбамат аммония – это белое кристаллическое вещество с высокой химической нестабильностью. Оно быстро разлагается с выделением углекислого газа (CO₂) и аммиака (NH₃) по реакции» [41]:



«Что касается водного раствора карбамата, то он также является нестабильным соединением, напоминающим сметану, которое распадается по ряду реакций. Например:



Углеаммонийные соли (УАС), включая карбонат и бикарбонат, являются промежуточными продуктами гидролиза карбамата аммония и образуются при конденсации газов в процессах дистилляции, десорбции и гидролиза» [9]. Подобно карбамату аммония, УАС характеризуются высокой нестабильностью и склонностью к быстрому разложению, что имеет важное значение для проектирования и оптимизации химических процессов [9], [40].

Эта нестабильность требует тщательного контроля при утилизации и рециклинге, позволяя одновременно минимизировать потери сырья и повысить эффективность процессов. Свойства УАС делают их ключевым элементом современных технологий, обеспечивающих устойчивость и производительность химических схем.

1.1.4 Карбамид

«Чистый карбамид, с химической формулой $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, представляет собой уникальное вещество, физико-химические свойства которого обуславливают его широкое применение в химической промышленности» [13]. Его кристаллы имеют форму удлинённых игл или ромбических призм, а плотность при $20\text{ }^\circ\text{C}$ достигает 1335 кг/м^3 , что свидетельствует о его высокой плотности и устойчивости в процессах.

Промышленный гранулированный карбамид отличается от чистого продукта. Его окраска варьируется от беловатой до розовой в зависимости от технологии производства, а насыпная плотность составляет $670\text{--}740\text{ кг/м}^3$. Эта форма облегчает транспортировку, хранение и использование в сельском хозяйстве и других отраслях.

«Карбамид, как известно, отличается высокой гигроскопичностью, что проявляется в его способности поглощать влагу из окружающей среды, а также склонен к слеживаемости. Его растворимость в воде и жидком аммиаке хорошо изучена, и важно отметить, что температура плавления чистого карбамида при атмосферном давлении составляет $132,7\text{ }^\circ\text{C}$, в то время как для водных растворов этого вещества ее значение зависит от концентрации. Так, например, раствор с концентрацией 10% плавится при температуре около $100\text{ }^\circ\text{C}$. Увеличение температуры воды способствует усилению растворимости карбамида, а сам водный раствор карбамида проявляет слабощелочные свойства» [13].



Основные физико-химические свойства карбамида приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические свойства карбамида

Свойство	Значение
1	2
Молекулярная масса	60,06 г/моль
Физическое состояние	Белое кристаллическое вещество

Продолжение таблицы 1

1	2
Структурная формула	$\text{H}_2\text{N}-\text{CO}-\text{NH}_2$
Температура плавления	132,7 °С (с разложением, выделяется аммиак и изоциановая кислота)
Температура разложения	≈135 °С
Плотность	1,33 г/см ³ при 20 °С
Растворимость в воде	Очень высокая (108 г/100 мл при 20 °С, 624 г/л при 80 °С)
Растворимость в органических растворителях	Растворим в метаноле, этаноле; плохо растворим в эфире, хлороформе
Теплота плавления	10,77 кДж/моль
Теплота образования	-333,9 кДж/моль
Коэффициент теплопроводности	0,46 Вт/(м·К)
Давление пара	Практически отсутствует при комнатной температуре
рН водного раствора	Слабощелочной (рН ≈ 7,2–7,5 для 10%-ного раствора)
Гигроскопичность	Высокая; при высокой влажности активно впитывает влагу
Токсичность	Низкая; LD ₅₀ для крыс: ≈14 г/кг
Экологичность	Легко разлагается; безопасен для окружающей среды в умеренных количествах
Прочность кристаллов	Хрупкие кристаллы
Удельная теплоемкость	≈1,3 Дж/(г·К)
Химическая активность	Реагирует с кислотами, спиртами, аммиаком; образует комплексные соединения

Не менее интересным аспектом является его реакция с различными кислотами, в частности с азотной кислотой. «Так, взаимодействие карбамида с азотной кислотой приводит к образованию нитратов мочевины ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2\text{HNO}_3$), которые представляют собой кристаллы, плохо растворимые в воде, а при нагревании способные привести к взрывным реакциям, что представляет собой значительную опасность при работе с данным веществом» [13].

Таким образом, карбамид благодаря своим физико-химическим свойствам является важным компонентом современных химико-технологических процессов.

1.1.5 Азот

«Азот в стандартных условиях представляет собой бесцветный газ без запаха с плотностью 1,28 кг/м³, лишь немного превышающей плотность

воздуха ($0,97 \text{ кг/м}^3$)» [9]. Его химическая инертность, отсутствие токсичности и взрывоопасности делают его важным компонентом в различных технологических процессах, включая синтез карбамида. Азот также незаменим в противопожарных системах, где используется как эффективное средство подавления огня.

Его физическая и химическая стабильность, подтвержденная исследованиями [9], обеспечивает широкое применение не только в химической технологии, но и в других областях, где требуется надежность и безопасность процессов.

1.1.6 Насыщенный водяной пар среднего и низкого давления

Насыщенный водяной пар является ключевым элементом теплообмена и теплообработки на различных этапах производственного процесса. «Пар среднего давления с параметрами 2,35-2,65 МПа и температурой 225-230 °С используется в узлах синтеза и дистилляции высокого давления, обеспечивая стабильный температурный режим и эффективную перегонку.

Пар низкого давления, образующийся в кожухе конденсатора карбамата, имеет параметры 0,324-0,441 МПа и 145-152 °С» [46]. Он применяется для обогрева трубопроводов, оборудования и пропаривания, что повышает теплообменную эффективность и снижает риск коррозии оборудования [9], [46]. Таким образом, насыщенный пар играет важную роль в повышении надежности и энергоэффективности технологических процессов.

1.1.7 Пар и конденсат

Паровой конденсат образуется при конденсации насыщенного пара среднего и низкого давления, и его температура может быть почти идентична температуре пара. «Используемый в качестве питательной воды для получения пара низкого давления, этот конденсат играет важную роль в системе теплообмена, обеспечивая необходимый тепловой баланс для продолжения процесса. Однако, следует отметить, что паровой конденсат может вызывать термические ожоги, и для предотвращения травм необходимо использовать средства защиты, такие как спецодежда и рукавицы» [46].

1.1.8 Сжатый технологический воздух

«Технологический воздух – это предварительно очищенный и сжатый атмосферный воздух с давлением 0,5-0,7 МПа. Он используется для продувки оборудования и трубопроводов, что предотвращает засоры и обеспечивает оптимальные условия работы» [46]. Также его вводят в углекислоту для пассивации оборудования, защищая поверхности от коррозии и поддерживая стабильность технологических процессов. Эта универсальность делает технологический воздух важным элементом химико-технологических операций.

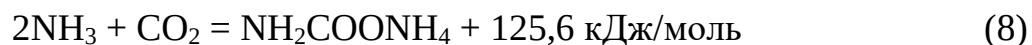
1.1.9 Сжатый воздух КИПиА

Воздух КИП (контрольно-измерительных приборов) – это еще один тип сжатого атмосферного воздуха, который также подвергается фильтрации, сжатию до 0,5-0,7 МПа и осушке до точки росы – 40 °С. Это воздушное средство применяется для обеспечения нормальных условий работы контрольно-измерительных приборов, где высокая степень очистки и сухость воздуха являются критически важными для точности измерений и стабильности работы оборудования.

1.2 Классификация технологий синтеза карбамида и исследование кинетических закономерностей химических процессов

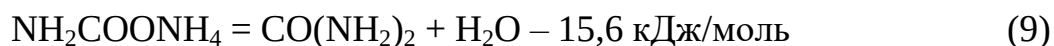
Процесс синтеза карбамида, хотя и имеет множество возможных подходов, в настоящее время реализуется исключительно через прямую реакцию аммиака и углекислого газа. Это метод, ставший основой химической промышленности, берет свои истоки в историческом эксперименте А.И. Базарова, проведенном в далеком 1870 году. Сама реакция состоит из двух ключевых этапов, каждый из которых характеризуется специфической термодинамикой и особенностями равновесия.

На первом этапе образуется карбамат аммония, соединение, которое выступает промежуточным продуктом синтеза:

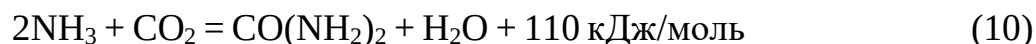


Экзотермичность реакции делает процесс термодинамически выгодным, а выделяемое тепло используется для снижения энергозатрат на следующих стадиях.

На втором этапе происходит дегидратация карбамата аммония с образованием карбамида:



Сложение этих двух стадий дает итоговую суммарную реакцию, где тепловой эффект также остается положительным:



Особенностью обоих этапов является их обратимость, что требует учитывать равновесные концентрации реагентов и продуктов, зависящие от температуры, давления и относительного содержания воды в системе. Именно эти параметры определяют эффективность процесса на каждом этапе [26].

Оптимальные условия для промышленного синтеза были выведены эмпирически и предполагают строгий контроль температуры в пределах 160-200 °С, давления до 20 МПа, а также мольного соотношения реагентов, равного $\text{NH}_3:\text{CO}_2:\text{H}_2\text{O} = (3,2-3,6):1:(0,5-0,7)$. Поддержание данных параметров позволяет достигнуть высокой скорости реакции и максимально возможного выхода карбамида при минимизации побочных продуктов.

Процесс образования карбамата аммония при стандартном атмосферном давлении и комнатной температуре протекает очень медленно и практически незаметно. Однако, исследователи используют повышенные температуры (160-190 °С) и давление (18-20 МПа), как описано в источнике [19], чтобы значительно ускорить эту реакцию. Температура напрямую влияет на

конверсию карбамата аммония в карбамид, что наглядно отображено на графике (рисунок 2).

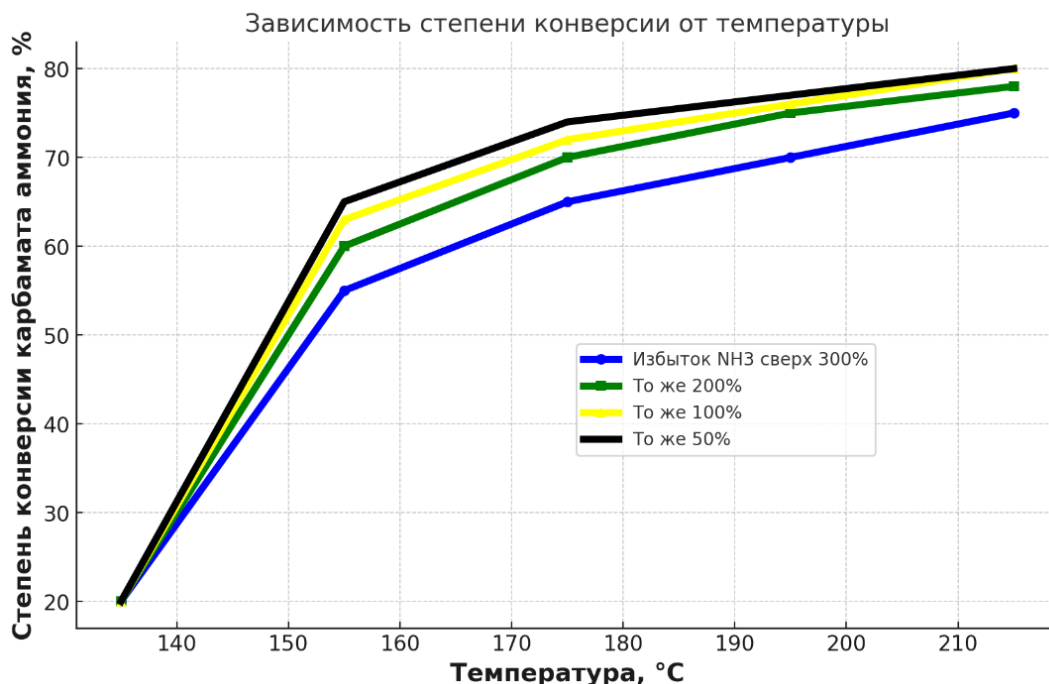


Рисунок 2 – Степень конвертирования карбамата аммония в карбамид в зависимости от температуры

«Аммиак играет ключевую роль в смещении равновесия реакции в сторону образования карбамида, благодаря своей способности связывать реакционную воду. При избытке аммиака, выход карбамида по углекислому газу увеличивается, но выход по аммиаку соответственно уменьшается (рисунок 3). Увеличение давления в реакторе также способствует повышению конверсии карбамата аммония, так как высокое давление подавляет диссоциацию исходных реагентов, как указано в источнике» [1].

Синтез карбамида значительно ускоряется при переходе реакции из твердой фазы в жидкую, благодаря высокой интенсивности химического взаимодействия в жидкой среде. Увеличение объема жидкой фазы способствует активизации процесса, что делает такие условия важными для оптимизации производства. «Присутствие карбамата аммония и карбамида в системе снижает температуру плавления каждого соединения, с наибольшим влиянием со стороны аммиака» [1].

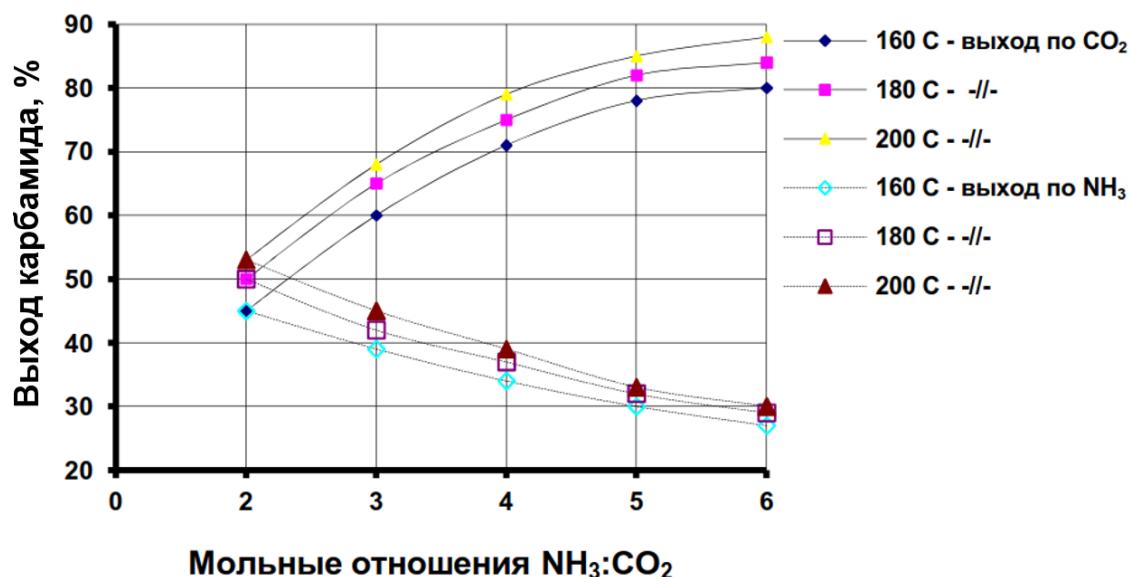


Рисунок 3 – Зависимость равновесного выхода карбамида от избытка аммиака при различных температурах

Диаграмма состояния системы ($\text{NH}_2\text{COONH}_4 - \text{NH}_2\text{CONH}_2 - \text{NH}_3$), представленная в работах [8], [12], [13], [31], показывает, что аммиак упрощает переход компонентов в жидкую фазу. Это ускоряет реакцию и повышает эффективность производственного процесса. «Учет фазовых характеристик компонентов становится важным для оптимизации технологических схем, улучшения энергетической эффективности и увеличения производительности. Аммиак, таким образом, играет ключевую роль в успешности технологического процесса.

Присутствие воды в реакционной смеси дополнительно способствует формированию жидкой фазы, однако накопление воды в системе приводит к установлению равновесного состояния, после которого образование $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ прекращается.

Реакция превращения карбамата аммония в карбамид возможна только в жидкой фазе, поэтому степень заполнения реактора исходными веществами играет решающую роль». [19]. Увеличение заполнения снижает объем газовой фазы, образующейся при разложении карбамата аммония, и создает оптимальные условия для реакции, повышая выход целевого продукта.

Контроль степени заполнения реактора обеспечивает эффективную конверсию сырья и улучшает энергетический и ресурсный баланс процесса, что делает этот параметр ключевым в управлении синтезом карбамида.

Таким образом, процессы температуры, давления, фазовых изменений и состава реакционной смеси оказывают комплексное влияние на кинетику и эффективность реакции образования карбамида.

1.3 Анализ областей применения карбамида в промышленности и смежных отраслях

Обработка карбамида фосфорной кислотой приводит к образованию фосфата карбамида ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2\text{H}_3\text{PO}_4$), который представляет собой водорастворимые ромбические кристаллы. «Этот фосфат карбамида, обладая определенной химической стабильностью и растворимостью, находит широкое применение в производстве сложных удобрений, значительно улучшая их эффективность и усвояемость растениями» [59].

«Смешение карбамида с аммиачной селитрой в строго определенных пропорциях инициирует образование комплексных соединений, которые, благодаря своей химической природе, обладают значительно лучшей растворимостью по сравнению с каждым из компонентов по отдельности. Это, в свою очередь, повышает их доступность для сельскохозяйственных культур, способствуя более эффективному использованию удобрений в агрономии» [13].

«Карбамид играет ключевую роль в нефтяной промышленности, где его уникальные свойства используются для очистки масел. Это основано на его способности взаимодействовать с насыщенными углеводородами, что позволяет выделять и очищать компоненты, улучшая качество продукта» [60].

«Кроме того, карбамид широко применяется в производстве пластмасс. Его реакция с формальдегидом в щелочной среде приводит к образованию высокомолекулярных соединений, которые служат основой для создания

прочных и устойчивых полимерных материалов» [22]. Таким образом, карбамид демонстрирует универсальность в технологических процессах.

Карбамид делится на два типа – «А» и «Б», каждый из которых имеет специфическое применение. «Карбамид типа «А» используется в производстве карбамидоформальдегидных клеев, смол, пластмасс, а также в фармацевтике и косметологии» [15]. «В деревообработке он служит основой для ДСП, МДФ и фанеры, в лакокрасочной отрасли улучшает стойкость лаков, а в текстильной промышленности повышает эластичность и прочность тканей. В бумажной промышленности он улучшает влагостойкость и прочность бумаги, а в кожевенной используется для дубления, придавая коже долговечность» [13], [51], [52].

«Карбамид типа «Б» незаменим в сельском хозяйстве благодаря высокому содержанию азота, что делает его эффективным удобрением для различных культур и типов почв (рисунок 4). Он подходит для внекорневой подкормки, не вызывая ожогов растений. В животноводстве карбамид используется как кормовая добавка, улучшая обмен веществ у животных» [22].

Оба типа карбамида благодаря своим свойствам широко применяются в промышленности и сельском хозяйстве, играя важную роль в технологических процессах.

«Новая сфера применения карбамида – это инновационные технологии в области экологии. Одним из таких направлений является использование карбамида для очистки выбросов тепловых электростанций» [22]. В этой области карбамид служит восстановителем оксидов азота, активно участвуя в процессе термического разложения, что позволяет снизить выбросы вредных веществ в атмосферу. Эта технология находит применение в мусоросжигательных установках, где карбамид используется как в твердой, так и в жидкой форме, успешно очищая выбросы от загрязняющих веществ [20].

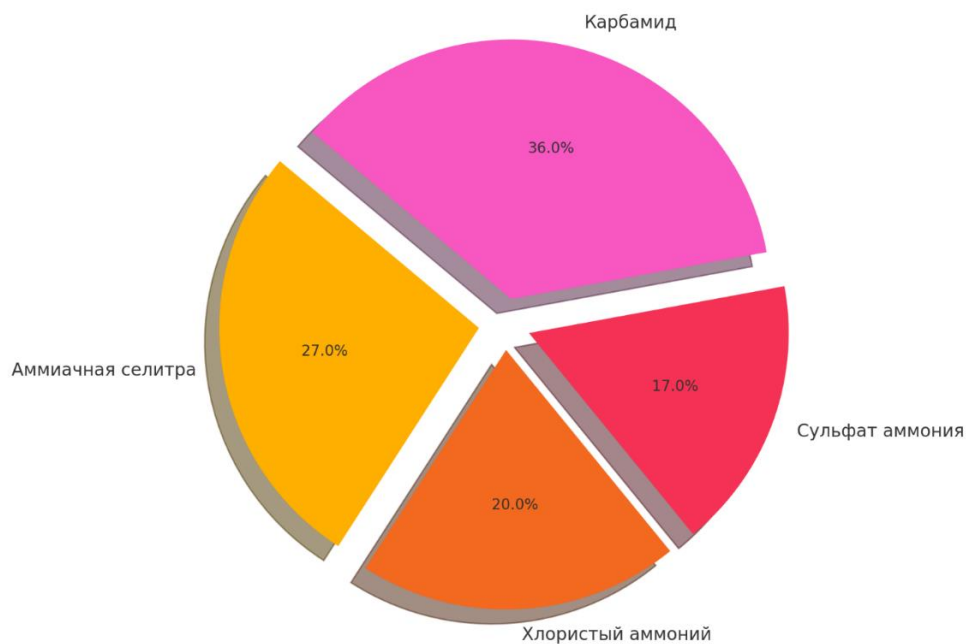


Рисунок 4 – Содержание азота в азотсодержащих удобрениях

С введением стандарта Euro 6 с 1 сентября 2015 года, карбамид обрел новое применение в автомобильной промышленности. «В частности, он стал важной составляющей в производстве жидкости AdBlue®, которая используется в технологии селективного каталитического восстановления (SCR)» [58]. «Жидкость, состоящая на 32,7 % из карбамида, впрыскивается в поток дизельных выхлопных газов, где аммиак, выделяющийся при реакции, эффективно восстанавливает до 80 % оксидов азота, преобразуя их в безопасные азот и воду. Этот процесс позволяет дизельным автомобилям соответствовать строгим экологическим нормам, предъявляемым к выбросам вредных веществ. Технология SCR с использованием AdBlue® широко применяется в коммерческом автотранспорте в Европе, Северной Америке, Японии и других развитых странах» [55]. Рисунок 5 отображает применение карбамида в различных отраслях и сферах сельского хозяйства, здравоохранения, легкой промышленности и т.д.

Таким образом, карбамид, благодаря своей многообразной химической активности и универсальности, продолжает открывать новые горизонты для промышленного и экологического применения, играя ключевую роль в ряде важнейших отраслей современной экономики.

Промышленность и транспорт

Очистка от азотосодержащих
отходящих газов
Очистка нефтепродуктов

Антипирены
Текстильная и бумажная
промышленность
Фанеро-мебельное производство
Пластики, лаки, клеи

Древесно-слоистые пластики
Минора-изоляция

Аппретирование тканей
Получение жестких пен
Связывание песчаных грунтов,
получение линейных стержней в
металлургии
Изготовление пленок мембран

Очистка котлов
Порофоры

Меламин

Карбамидо-
формальдегидные смолы

Полимочевины, поликарбамиды

Гидразин-гидрат

Карбамид

Циануровая кислота

Урилон

Замещение мочевины: моноурон, диурон и др.

Лекарства и косметика
Дезинфицирующие средства
Моющие средства
Эпоксидные смолы

Искусственное
волокно

Гербициды
Кормовая добавка для животных
Удобрения

Пищевые препараты

Здравоохранение и товары народного потребления

Сельское хозяйство

Рисунок 5 – Применение карбамида в различных отраслях и сферах жизнедеятельности человека

1.4 Комплексный анализ современных промышленных методов синтеза карбамида и изучение динамики развития глобального рынка

Процесс производства карбамида, как одного из ключевых направлений химической промышленности, представляет собой сложную технологическую цепочку, включающую высокотемпературную (170-200 °C) и высокобарную (15-25 МПа) реакцию между аммиаком и диоксидом углерода. Данные условия синтеза требуют интеграции с производством аммиака, формируя тесно взаимосвязанные и взаимозависимые технологические комплексы [2].

Исторические аспекты этого процесса восходят к 1920-м годам, когда первые промышленные агрегаты, ориентированные на синтез карбамида, появились за рубежом, опираясь на исследования химиков из Германии, США и Франции, выполненные еще в начале XX века. «Эти установки функционировали по так называемой «открытой схеме», в рамках которой продукт подвергался дросселированию до атмосферного давления, после чего отделяли непрореагировавшие газы. Выделенный аммиак направляли на синтез аммонийных солей, а карбамид подвергался кристаллизации. Несмотря на инновационность для своего времени, такая схема отличалась высокой энергетической неэффективностью, что стимулировало многочисленные исследования, направленные на повышение эффективности производства в 1930-1940-х годах» [3].

«Промышленное производство карбамида в Советском Союзе началось в 1935 году с запуском установки на Чернореченском химическом заводе в Дзержинске с производительностью 80,4 тонн в год. Этот проект стал основой для дальнейшего развития отрасли.

К 1950-м годам на Новомосковском и Лисичанском комбинатах были запущены установки с общей мощностью 20000 тонн в год, что значительно увеличило объемы выпуска и способствовало совершенствованию технологий синтеза карбамида» [4]. Эти агрегаты базировались на исследованиях

Государственного института высоких давлений (ГИВД) и использовали устаревшую открытую схему, что обуславливало необходимость ее модернизации [3].

Прорыв в развитии технологий произошел в конце 1950-х годов, когда Научно-исследовательский институт карбамида (НИИК) предложил два инновационных метода: двухступенчатую дистилляцию карбамидного раствора с рециркуляцией аммиака и метод селективной абсорбции углекислого газа раствором моноэтаноламина. Эти подходы стали основой для создания первых крупных установок мощностью 35 тыс. тонн в год, в которых применялись частичные или полные рециклы аммиака. Такие агрегаты были запущены в Новомосковске, Салавате, Ангарске и других городах [4], [5].

Одновременно с этим, голландская компания Stamicarbon в 1959 году внедрила процесс полного жидкостного рецикла, при котором непрореагировавшие вещества возвращались в реактор в виде раствора углеаммонийных солей. Процесс гранулирования продукта осуществлялся методом «приллирования», заключающимся в распылении карбамида в восходящем воздушном потоке внутри башни. Эта технология быстро нашла применение и в СССР, где с 1963 по 1965 годы были введены в эксплуатацию агрегаты мощностью до 90 тыс. тонн в год [5].

В 1960-1970-х годах на основе накопленного опыта было построено более 25 установок производительностью 90 тыс. тонн в год. Одновременно с этим переоборудование устаревших производственных мощностей, например, в Щекино, позволило внедрять современные схемы полного жидкостного рецикла. «В 1970-х годах СССР закупил оборудование для установок мощностью 330 тыс. и 450 тыс. тонн в год у ведущих мировых компаний, что стало важным этапом в наращивании производственных мощностей» [5].

«Технологии производства карбамида включают такие процессы, как полный жидкостный рецикл (разработки ТЕС, Япония, и ОАО «НИИК»), а также стриппинг-процессы от компаний Stamicarbon, Snamprogetti и Tecnimont (Италия)» [2]. «Производственные мощности располагаются в семи

странах бывшего СССР, включая Россию, Украину, Беларусь, Узбекистан, Литву, Эстонию и Таджикистан. Наибольшее распространение получили методы полного жидкостного рецикла АК-70 (31 установка) и ТЕС (1 установка), а также стриппинг-процессы Stamicarbon (13 установок), Snamprogetti и Tecnimont (по три установки) (рисунок 6)» [4].

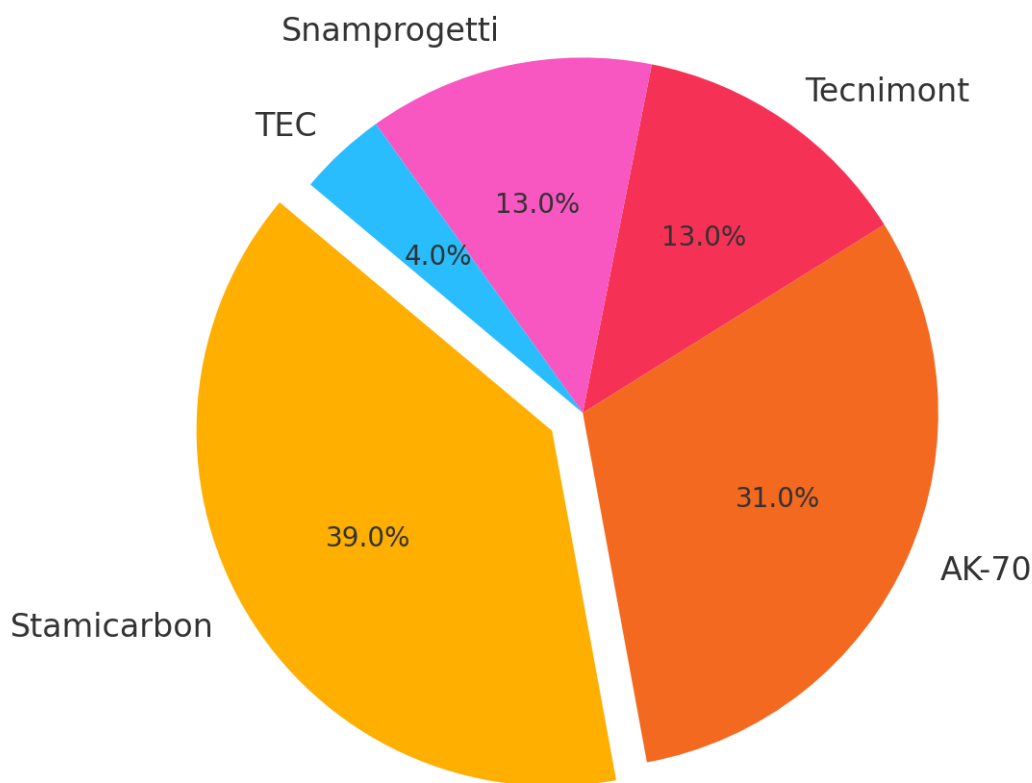


Рисунок 6 – Применяемые технологии по производству карбамида в странах бывшего СССР

Современные технологические подходы, сопоставимые по уровню сырьевого потребления, различаются преимущественно за счет конструктивных решений, выбора применяемых материалов и использования методов, ориентированных на минимизацию энергетических затрат [6]. Рассмотрим более подробно пример технологии стриппинга углекислого газа, разработанной компанией Stamicarbon. Упрощенная схема процесса, представленная на блок-схеме (рисунок 7) [7], демонстрирует ключевые стадии протекания химических реакций.

Аммиак и диоксид углерода вступают в реакцию с образованием карбамида через промежуточный продукт – карбамат аммония. «Процесс проходит при давлении 14 МПа и температуре 180-185 °С, обеспечивая высокую эффективность: конверсия аммиака достигает 41 %, а углекислого газа – 60 %. Эти условия минимизируют потери сырья и обеспечивают стабильность реакционного процесса» [7].

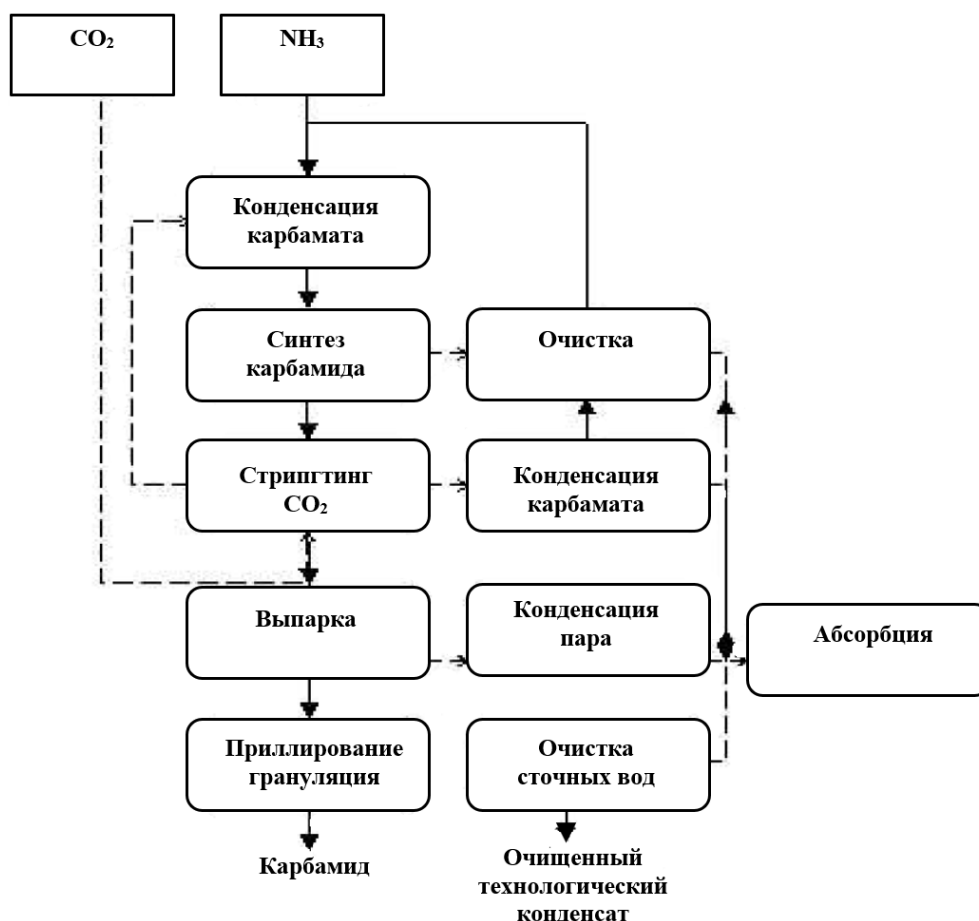


Рисунок 7 – Стриппинг-процесс компании Stamicarbon

Нереагировавшие компоненты, включая аммиак и углекислый газ, подаются в стриппер, где последний выполняет роль стриппинг-агента, способствуя эффективной регенерации системы. На стадии конденсации оба вещества подвергаются охлаждению и возвращаются в производственный цикл через этап рецикла, что обеспечивает их повторное использование в процессе синтеза. Особо следует отметить, что тепловая энергия, выделяемая при конденсации, направляется на выработку пара. Этот пар, в свою очередь,

используется для привода компрессора углекислого газа, что значительно повышает энергетическую эффективность процесса.

Гибкость конструктивных решений позволяет адаптировать процесс под специфические производственные условия. Одним из таких примеров является технология Urea 2000plus™, отличающаяся использованием бассейнового конденсатора (рисунок 8), что делает ее особенно эффективной.

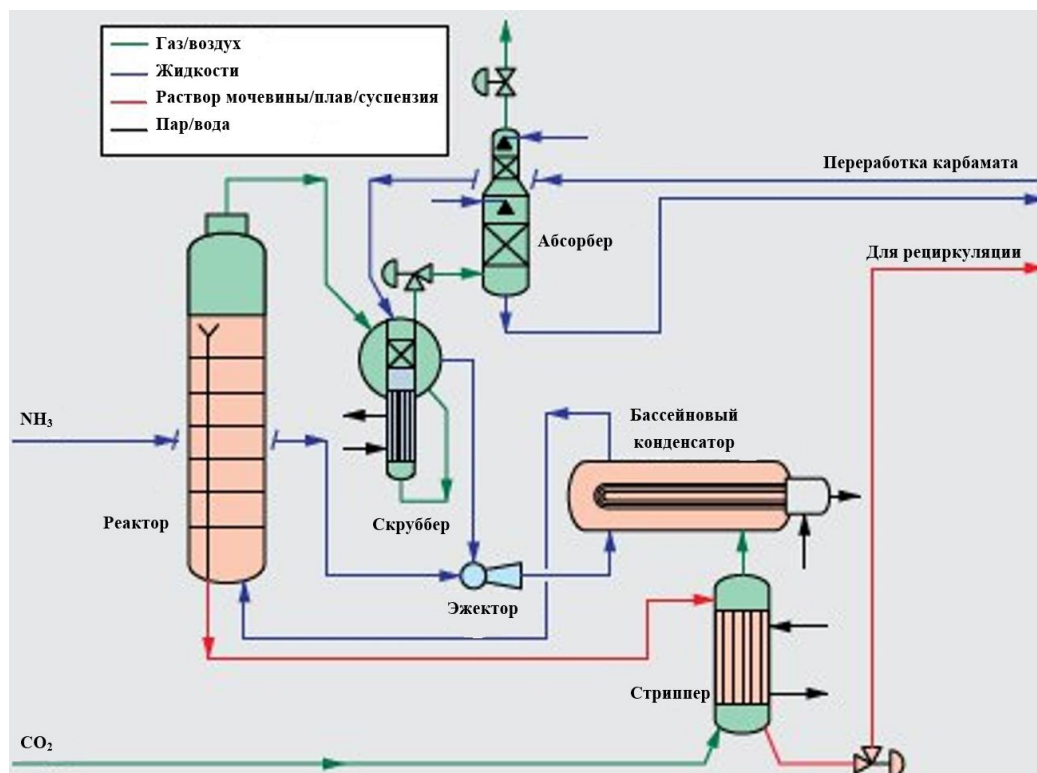


Рисунок 8 – Секция синтеза в процессе Urea 2000Plus™ с использованием бассейнового конденсатора

Эта технология нашла успешное применение на ряде промышленных объектов. «В частности, в Китае на производстве компании CNOOC, запущенном в 2004 году, где мощность составляет 2700 тонн карбамида в сутки. Еще одним показателем успешной реализации служит проект в Катаре (Qafco IV), введенный в эксплуатацию в 2005 году, с производственной мощностью 3200 тонн в сутки» [10]. Данная технология демонстрирует значительную степень надежности, энергоэффективности и способности адаптироваться под современные требования химической промышленности.

За счет оптимизации расхода энергоресурсов и повышения уровня переработки сырья она обеспечивает высокую конкурентоспособность и перспективы для дальнейшего развития.

Таким образом, эволюция технологий синтеза карбамида – от энергоемких открытых схем к современным высокоэффективным процессам полного рецикла и стриппинга – демонстрирует не только прогресс в удовлетворении рыночных потребностей, но и стремление к снижению экологической нагрузки за счет внедрения рециклинговых подходов и энергосберегающих технологий.

Проведенный анализ отчета «Мочевина (карбамид): обзор мирового рынка 2024 г. и прогноз до 2033 г.» [27] предоставляющего всесторонний анализ глобального рынка мочевины, основанного на качественных и количественных данных, а также на экспертных оценках, следует:

- Азиатско-Тихоокеанский регион потребляет около 70 % мировой мочевины, за ним следуют Северная Америка и Европа. Ожидается, что в ближайшие годы Азиатско-Тихоокеанский регион, Северная и Латинская Америка будут лидировать по потреблению мочевины, формируя тенденции развития мирового рынка;

- ожидается, что спрос на мочевины будет расти, особенно в развивающихся регионах, что приведет к увеличению производственных мощностей и усилению конкуренции на рынке. Прогнозируется стабильный рост цен, обусловленный повышением спроса и затрат на производство.

1.5 Характеристика технологического оборудования: конструктивные особенности, материалы изготовления и эксплуатационные параметры

1.5.1 Реактор

«Реактор представляет собой цилиндрический аппарат с внутренними стенками из молибденистой нержавеющей стали, обеспечивающими

стойкость к коррозии. Внутри установлены тарелки, которые равномерно перемешивают реакционную смесь, повышая эффективность процесса.

Реакция проходит при давлении 14-20 МПа и температуре 180-200 °С, что создает оптимальные условия для высокой степени конверсии. Упрощенная схема работы реактора представлена на рисунке 9, демонстрируя ключевые этапы переработки реакционной массы. Эта конструкция делает реактор важным элементом технологической линии производства карбамида» [19].

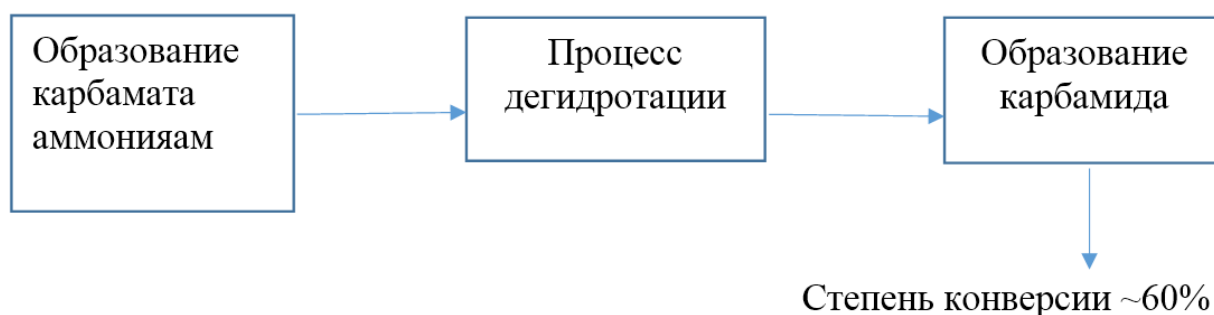


Рисунок 9 – Упрощенная схема работы реактора

1.5.2 Отпарная колонна

Отпарная колонна представляет собой вертикальный теплообменный аппарат пленочного типа, выполненный в конструкции кожухотрубного теплообменника (рисунок 10). «Для повышения устойчивости к воздействию агрессивных химических сред внутреннее трубное пространство колонны облицовано титановыми покрытиями. Конструктивные особенности аппарата включают в себя кольцевой распределитель плава и тангенциально расположенные патрубки, которые обеспечивают равномерное распределение пленки плава по поверхности труб. Такое решение способствует оптимальному протеканию процесса и минимизации гидродинамических отклонений» [19].

На данном этапе технологического процесса ключевые концентрации компонентов составляют: содержание аммиака не превышает 7,5 %, углекислого газа – до 2 %, а содержание карбамида достигает 60 % [19]. Эти

параметры отражают высокую эффективность работы отпарной колонны и её значимость в общей схеме химико-технологического процесса. Такая конструкция обеспечивает надежность, долговечность и высокую производительность, что делает её незаменимой в синтезе карбамида и других сходных химических процессах.

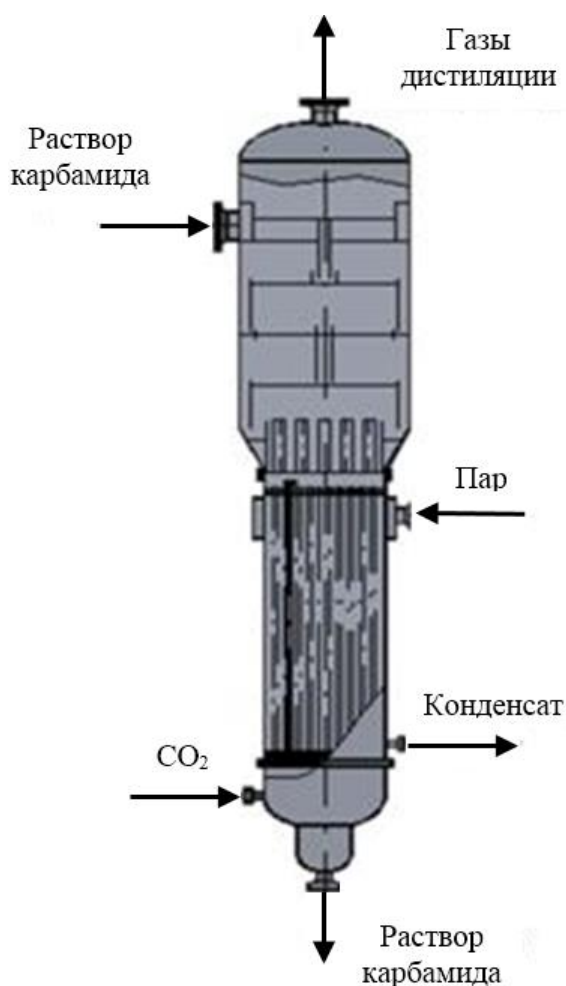


Рисунок 10 – Выпарной пленочный аппарат со свободно стекающей пленкой

1.5.3 Колонна дистилляции

«После отпарной колонны плав карбамида направляется в колонну дистилляции низкого давления через теплообменный конденсатор. Колонна представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат с 55 клапанными тарелками, включая две глухие в нижней и средней частях, что обеспечивает эффективное фазовое разделение» [19].

Для поддержания теплового баланса колонна оснащена выносным кипятильником – горизонтальным двухходовым кожухотрубным теплообменником, который равномерно прогревает и циркулирует жидкие фазы. Такая конструкция обеспечивает надежность и высокую производительность в процессе синтеза карбамида.

1.5.4 Конденсатор

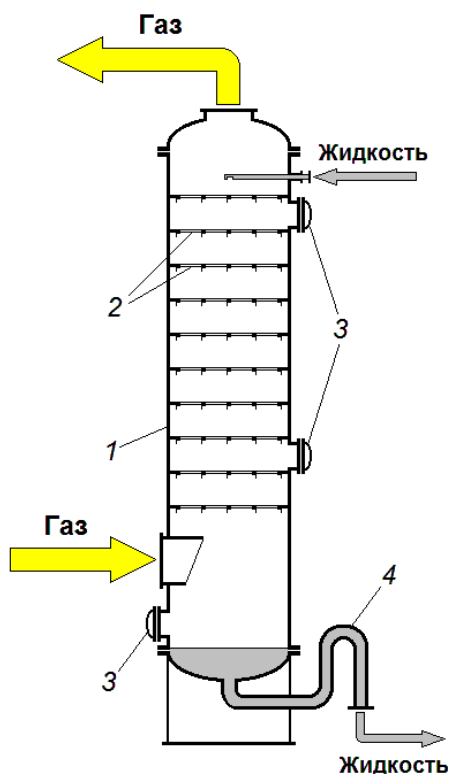
Конденсатор, представляющий собой кожухотрубный теплообменник, используется для абсорбции и конденсации газов дистилляции. «Охлаждающая вода подается в трубки, а в межтрубном пространстве при температуре 70-90 °С раствор углеаммонийных солей (УАС) частично абсорбирует и конденсирует газовую фазу.

Образованная газожидкостная смесь направляется в промывную колонну для дальнейшей обработки. Такая система повышает эффективность процесса, снижает потери сырья и улучшает экологические показатели производства» [19].

1.5.5 Промывная колонна

Промывная колонна (рисунок 11) состоит из корпуса, барботера для распределения газожидкостной смеси и пяти тарелок (четыре колпачковые, одна распределительная). «Барботер находится в нижней части колонны, а тарелки – в верхней. Основная задача устройства – абсорбция углекислого газа из газожидкостной смеси с образованием углеаммонийных солей» [8]. Газообразный аммиак с остатками CO_2 и инертами проходит через тарелки и окончательно очищается аммиачной водой в сборнике.

Производство карбамида включает трехступенчатую дистилляцию плава с полным рециклом непрореагировавших аммиака и CO_2 , а также двухступенчатую вакуумную выпарку раствора [41]. «Плав направляется на узел грануляции, где в грануляционной башне формируются и охлаждаются гранулы восходящим потоком воздуха. Окончательное охлаждение продукта происходит в аппарате кипящего слоя или аэроохладителе» [8].



1 – корпус, 2 – тарелки, 3 – люки для обслуживания, 4 – гидрозатвор

Рисунок 11 – Промывная колонна

Эта технологическая схема обеспечивает эффективную переработку сырья, минимизируя потери и обеспечивая выпуск гранулированного карбамида высокого качества.

1.6 Детализация производственного процесса синтеза карбамида ПАО «КуйбышевАзот»

В представленной работе анализируется применяемая в цехе № 4 ПАО «КуйбышевАзот» технологическая схема производства карбамида, данная схема отличающаяся использованием полного жидкостного рецикла, позволяет замкнуть цикл производства, возвращая газообразные побочные продукты дистилляции в смежные производственные процессы, включая выпуск аммиачной селитры.

Процесс разделен на несколько взаимосвязанных стадий:

- подача жидкого аммиака. Аммиак при температуре $-20...-34\text{ }^{\circ}\text{C}$ подается из изотермических хранилищ. Через теплообменник (позиция К-4) он нагревается до $-15...+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего поступает в сборный резервуар (позиция Е-1);
- реакция синтеза. На этапе высокого давления (14-16 МПа) и температуре $185-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ в реакторе (позиция Р) углекислый газ из компрессора (позиция К1) и смесь аммиака с карбаматом аммония вступают в реакцию. Образуется карбамат аммония, который далее дегидратируется до карбамида;
- дистилляция высокого давления. Раствор карбамида при температуре $180-189\text{ }^{\circ}\text{C}$ поступает в отпарную колонну (позиция КО), где с помощью пара среднего давления ($185-210\text{ }^{\circ}\text{C}$) из него удаляются углекислый газ и аммиак, возвращаемые в цикл;
- среднее и низкое давление. В колоннах дистилляции среднего и низкого давления (позиции КД1 и КД2) остатки карбамата аммония разлагаются при температуре $138-155\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлениях 1,7 и 0,2-0,4 МПа соответственно. Образующиеся газы также перерабатываются;
- вакуум-выпарка. Концентрирование карбамида проводится в два этапа с использованием вакуумных испарителей (позиции И1 и И2) и сепараторов (позиции С2 и С3), что позволяет достичь концентрации готового продукта;
- гранулирование и обеспыливание. Плав карбамида ($134-140\text{ }^{\circ}\text{C}$) подается в гранулятор, где кристаллизуется в виде гранул диаметром 1-4 мм. Для улавливания пыли применяется система обеспыливания воздуха;
- очистка сточных вод.

1.6.1 Подробности процесса подачи жидкого аммиака

Подача аммиака в реакционный блок начинается с его транспортировки из изотермического хранилища к центробежным насосам (позиция Н6-7). Теплообменник (К-4) нагревает аммиак за счет тепловой энергии возвратного потока до $-15...+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем аммиак смешивается с регенерированным потоком в резервуаре (Е-1).

С помощью центробежных насосов (Н4-5) аммиак транспортируется в систему высокого давления. Здесь трехплунжерные насосы (Н1-3) сжимают поток до 16-24 МПа перед подачей в эжектор карбамата (позиция Э). В эжекторе аммиак переносит карбамат аммония из сепаратора (С1) в реактор (Р), обеспечивая замкнутый цикл синтеза [47].

1.6.2 Технология синтеза и дистилляции под высоким давлением

На этапе синтеза углекислый газ из компрессора (К1) смешивается с аммиаком и карбаматом аммония в реакторе (Р). «Здесь, при давлении 14-16 МПа и температуре 185-190 °С, протекают реакции образования карбамата аммония и его дегидратации до карбамида» [47]. Оптимальные мольные соотношения реагентов ($\text{NH}_3 : \text{CO}_2 : \text{H}_2\text{O} = 3,2-3,6 : 1 : 0,5-0,7$) обеспечивают степень конверсии углекислого газа до 60 %.

«Образованный раствор карбамида поступает в отпарную колонну (КО), где при температуре 185-210 °С за счет взаимодействия с насыщенным паром среднего давления происходит разложение карбамата аммония» [47]. Газовая фаза – углекислый газ и аммиак — возвращается в цикл через конденсаторы карбамата (К2 и К3). Оставшийся раствор направляется в колонну среднего давления (КД1) [47].

1.6.3 Технологические процессы дистилляции при среднем и низком давлении

После отпарной колонны раствор карбамида поступает в систему дистилляции среднего давления (позиция КД1). Процесс проходит при снижении давления до 1,7 МПа и температуре 150-155 °С. В конструкцию колонны включены три секции:

- всекция. Она обеспечивает сепарацию газожидкостной смеси, равномерно распределяя потоки благодаря кольцам Рашига и кольцевым распределителям раствора;
- средняя секция. Это кожухотрубный теплообменник пленочного типа, где разложение карбоната аммония достигается за счет тангенциальных отверстий, способствующих равномерной теплопередаче;

– нижняя секция. Она служит сборником раствора и поддерживает необходимый уровень жидкости, соединяясь с газовой фазой, поступающей из сепаратора (С1).

«Газообразные продукты – углекислый газ и аммиак – удаляются с использованием тепла пара из отпарной колонны. Образовавшиеся газы направляются в кожухотрубный конденсатор (позиция К12), где частично абсорбируются раствором углеаммонийных солей (УАС), подаваемым насосами (позиции Н13-14) из емкости Е2.

Раствор карбамида, очищенный на этапе среднего давления, поступает в колонну дистилляции низкого давления (позиция КД2), где давление снижается до 0,2-0,4 МПа, а температура составляет 138-145 °С. В трубках подогревателя, работающего на паре низкого давления (0,33-0,45 МПа), завершается разложение остатков карбамата аммония» [47]. Газовая фаза, включающая аммиак и углекислый газ, конденсируется в кожухотрубном теплообменнике (позиция К8).

Образованный раствор УАС перерабатывается, стабилизируя режим работы реактора (Р) и поддерживая замкнутый цикл технологии. Газы, выделяющиеся на этой стадии, после абсорбции паровым конденсатом направляются в систему барботеров и конденсаторов низкого давления, что обеспечивает минимизацию потерь [47].

1.6.4 Процесс вакуум-выпарки

Раствор карбамида из колонны низкого давления поступает в систему двухступенчатой вакуум-выпарки. Первая ступень включает испаритель (И1) и сепаратор (С2). В испарителе, работающем на насыщенном паре (0,33-0,45 МПа), раствор нагревается до температуры 122-138 °С. Затем в сепараторе при абсолютном давлении 0,03-0,05 МПа происходит разделение на газовую и жидкую фазы.

Вторая ступень включает испаритель (И2) и сепаратор (С3), где карбамид упаривается при более низком давлении (0,003–0,005 МПа). Нагрев достигается за счет пара низкого давления, а конечный плав карбамида

поступает в резервуар, откуда насосами (позиции Н15-16) направляется на гранулирование.

Для улучшения характеристик гранул на этапе выпаривания добавляется карбамидоформальдегидная смола, предотвращающая слеживание продукта. Соковые пары, выделяющиеся в процессе, конденсируются в вакуумных системах и возвращаются в технологический цикл, обеспечивая безотходность производства [47].

1.6.5 Гранулирование и обеспыливание воздуха

Плав карбамида с температурой 134-140 °С подается в корзину гранулятора, где он равномерно распыляется в грануляционной башне. При прохождении через восходящий поток воздуха капли карбамида кристаллизуются, образуя гранулы диаметром 1-4 мм. Готовый продукт охлаждается в аэроохладителе до 30-40 °С и транспортируется на склад или погрузку.

Воздух, используемый для охлаждения гранул, проходит через систему обеспыливания, включающую 123 форсунки-эжекторы. Слабый раствор карбамида, подаваемый насосами (позиции Н24-25), захватывает частицы пыли, которые затем осаждаются в кольцевой ванне. Очищенный воздух, прошедший через кольцевой фильтр, возвращается в атмосферу, соответствуя экологическим нормам.

Пыль, образующаяся на пунктах пересыпки гранул, также улавливается в специализированных циклонах, где раствор карбамида предотвращает выбросы твердых частиц [47].

1.6.6 Очистка сточных вод

Очистка сокового конденсата является неотъемлемой частью производственного процесса, направленной на минимизацию экологического воздействия. Процесс включает в себя несколько этапов, таких как дистилляция для удаления аммиака и гидролиз карбамида [47].

Первичная обработка конденсата

Конденсат, поступающий из вакуумных испарителей, собирается в емкости (позиция Е3). С помощью насосов (позиции Н18-19) он перекачивается через теплообменники (позиции Т1 и Т2) в гидролизер (Г1). «В теплообменниках происходит нагрев конденсата до температуры 170 °С за счет тепла, выделяемого сточной водой из колонны дистилляции (К9) и соковым конденсатом» [47].

Гидролиз карбамида

«В гидролизере (Г1), представляющем собой горизонтальный сосуд с встроенным двухходовым подогревателем, при давлении 1,6-1,9 МПа и температуре 190-210 °С карбамид разлагается на аммиак и углекислый газ» [47]. Этот процесс продолжается около часа с использованием пара высокого давления (2,4-2,7 МПа). В результате содержание карбамида в конденсате снижается до 350 мг/л.

Дистилляция аммиака

После гидролиза конденсат направляется в колонну дистилляции (К9). Поднимаясь по тарелкам (47, 49, 51), поток подвергается тепломассообменным процессам с восходящими газами. Аммиак и углекислый газ выделяются из раствора, а нагретый конденсат (до 197 °С) возвращается в верхние секции колонны.

Газожидкостная смесь в нижней части колонны нагревается в кожухотрубном подогревателе (Т4) до 125-135 °С с использованием пара среднего давления. В результате завершается десорбция аммиака и углекислого газа. Кубовые остатки выводятся в гидрозатвор, обеспечивая стабильность работы системы.

Охлаждение очищенной воды

«Очищенная вода с остаточным содержанием аммиака не более 150 мг/л охлаждается в теплообменниках (Т2) и направляется насосами (Н20-21) либо в аппарат воздушного охлаждения (А2), либо в систему дальнейшей обработки» [47].

Регенерация газовой фазы

«Выделенные аммиак и углекислый газ поднимаются вверх по колонне, дополнительно насыщаясь в процессе взаимодействия с конденсатом. Полученная газовая смесь направляется в конденсатор (K5), где при температуре 30-45 °С она конденсируется» [47], образуя раствор углеаммонийных солей (УАС). Этот раствор возвращается в систему низкого давления, замыкая цикл.

Использование сточных вод

Часть очищенной воды используется для промывки кольцевого фильтра в системе обеспыливания грануляционной башни, а также в оборудовании для обеспыливания транспортеров. Остаток направляется в канализацию либо возвращается в технологический цикл, обеспечивая снижение водозабора и экологических выбросов.

1.6.7 Система контроля и автоматизации технологического процесса

Управление технологическими процессами производства карбамида осуществляется из центрального пункта управления (ЦПУ), оснащенного современными системами мониторинга и автоматизации. Комплекс контрольно-измерительных приборов (КИП) обеспечивает оперативный контроль параметров, таких как давление, температура, расход и концентрация реагентов на всех этапах технологического цикла [47].

1.6.7.1 Автоматизированные системы контроля

Контроль параметров углекислого газа

– «давление на нагнетательной линии компрессора измеряется с использованием манометров и электронных датчиков. Данные передаются на пульт ЦПУ в режиме реального времени, где при снижении давления ниже нормы включается световая и звуковая сигнализация» [47];.

– температура газа фиксируется непрерывно с помощью термопар. Эти данные отображаются на панели КИП, что позволяет своевременно реагировать на отклонения;

- расход углекислого газа регистрируется и анализируется через интегрированную систему управления, что обеспечивает точность подачи в реактор.

При значительных отклонениях система автоматически прекращает подачу углекислого газа, отключает насосы высокого давления для подачи аммиака, а также закрывает клапаны в реакторе и эжекторе. Все отклонения сопровождаются активацией блокировок.

Контроль подачи аммиака

- давление аммиака перед эжектором отслеживается манометрами и передается на пульт управления, где оператор может скорректировать подачу;
- температура аммиака на выходе из пусковой линии контролируется термопарами и отображается на панели управления.

Мониторинг состава смеси

Температура смеси карбамата и аммиака, выходящей из эжектора, проверяется как на панели управления, так и через локальные датчики, обеспечивая надежный контроль синтеза.

Контроль плава карбамида в колоннах

- давление в нижних зонах колонн измеряется датчиками и фиксируется на КИП;
- температура плава контролируется в трех точках: верхней, средней и нижней зонах колонны. Измерения проводятся термопарами и записываются в систему управления.

Благодаря многоуровневому мониторингу оператор может регулировать параметры работы колонн, предотвращая перегрев или снижение эффективности процессов.

1.6.7.2 Предотвращение аварийных ситуаций

Система сигнализации и блокировок автоматически реагирует на критические отклонения параметров, предотвращая аварии. Например:

- при резком повышении давления в системе синтеза автоматически прекращается подача компонентов;

– отклонения температуры или расхода компонентов приводят к остановке насосов и компрессоров с одновременным включением аварийных клапанов.

Встроенные алгоритмы самодиагностики позволяют системе идентифицировать неисправности и уведомлять оператора для своевременного принятия мер.

1.6.7.3 Преимущества автоматизации

Автоматизация производственного процесса значительно повышает стабильность работы и снижает риски человеческого фактора. Она обеспечивает:

- высокую точность управления параметрами;
- оперативное реагирование на изменения в технологическом цикле;
- снижение энергозатрат и увеличение эффективности производства.

Таким образом, комплексная структура производства карбамида в данном цехе демонстрирует высокую степень интеграции процессов и ориентацию на замкнутый цикл, что способствует экономической и экологической устойчивости предприятия.

Выводы по разделу 1

На основании проведенного в первом разделе исследования актуальности рассматриваемой тематики, а также учитывая накопленный практический опыт эксплуатации оборудования на ПАО «КуйбышевАзот», можно уверенно утверждать, что в перспективе спрос на карбамид продолжит демонстрировать устойчивый рост, особенно в регионах с развивающейся экономикой. Этот фактор обуславливает необходимость масштабного увеличения производственных мощностей для удовлетворения прогнозируемого спроса. В связи с этим, в рамках поставленных исследовательских задач, для разработки конструктивных и технологических решений, оказывающих прямое влияние на эффективность процессов синтеза карбамида, представляется целесообразным выполнить комплексные расчеты существующего оборудования, что подробно рассмотрено во втором разделе работы..

Инженерные решения и конструктивные доработки для повышения эффективности синтеза карбамида на ПАО «КуйбышевАзот»

2.1 Расчет оптимальных параметров функционирования реактора синтеза карбамида

Оптимизация функционирования реактора для синтеза карбамида требует учета множества взаимосвязанных факторов, которые оказывают существенное влияние на конечную эффективность процесса. Ключевыми из них являются термодинамические, кинетические и гидродинамические параметры. Важное значение приобретает детальное исследование характера движения потоков и их фазовой структуры, поскольку именно эти аспекты определяют распределение времени пребывания реагентов в реакторе. Это, в свою очередь, существенно влияет на степень конверсии исходных компонентов в целевой продукт – карбамид.

Влияние гидродинамических факторов

Гидродинамика реактора характеризуется отклонениями от идеального режима вытеснения, что влияет на эффективность процесса. Основные причины включают:

- осевое смещение – неравномерное распределение потока по длине реактора, снижая эффективность преобразования реагентов;
- градиенты скорости – неоднородности в скорости потока, возникающие из-за конструктивных особенностей оборудования или неравномерного ввода реагентов;
- градиенты температуры – температурные перепады внутри реакционного объема, уменьшающие степень преобразования сырья.

Важным параметром, влияющим на поведение потока, является отношение площади поперечного сечения реактора к площади ввода реагентов. Этот показатель определяет турбулентность и эффективность

смешивания фаз. Оптимизация гидродинамики реактора позволяет минимизировать отклонения и повысить производительность процесса.

Методология расчета и анализ

Для более глубокого понимания поведения потока в реакторе синтеза карбамида (реактор Р) произведем расчет основных параметров, включая:

- распределение скорости потока по сечению реактора;
- временные характеристики пребывания частиц в реакционном объеме;
- температурные и концентрационные профили, влияющие на кинетику реакции.

Исходные данные для проведения расчетов представлены в таблицах 2-6. Эти данные включают геометрические параметры реактора, физико-химические свойства реагентов, а также основные рабочие условия процесса – давление, температура и расходные характеристики сырья.

Значимость расчетов

Расчеты позволят оценить отклонения режимов работы от идеального вытеснения, выявить зоны неравномерности и предложить рекомендации для повышения эффективности реактора.

Применение таких подходов обеспечивает повышение уровня конверсии сырья и стабильности работы реактора, что особенно важно для масштабного промышленного производства.

«Таблица 2 – Геометрические параметры реактора

Наименование	Размер*, мм
1	2
Диаметр внутренний реактора ($D_{ВН}$), мм	2300
Высота реакционной части (H_C), мм	39000
Диаметр штуцера (входного) аммиака (DN_{H_3}), мм	200
Диаметр штуцера (входного) углекислоты (DCO_2), мм	100

*Размеры варьируются на разных производствах» [17].

Расчет площади поперечного сечения реактора и входных штуцеров

Для оценки гидродинамических характеристик реактора используется следующая формула для расчета площади поперечного сечения реактора:

$$S_{P-PA} = 0,785 \cdot D_{BH}^2. \quad (11)$$

где D_{BH} – диаметр внутренний реактора.

Подставляя известные значения ($D_{BH} = 2300$ мм), получаем:

$$S_{P-PA} = 0,785 \cdot 2300^2 = 4152 \times 10^3 \text{ мм}^2$$

Для расчета площадей поперечных сечений входных штуцеров аммиака и углекислого газа используем ту же формулу:

- для жидкого аммиака ($D = 200$ мм):

$$S_{NH_3} = 0,785 \cdot 200^2 = 31,4 \times 10^3 \text{ мм}^2. \quad (12)$$

- для углекислого газа ($D = 100$ мм):

$$S_{CO_2} = 0,785 \cdot 100^2 = 7,85 \times 10^3 \text{ мм}^2. \quad (13)$$

Суммарная площадь входных штуцеров определяется как:

$$S_0 = S_{NH_3} + S_{CO_2} = 31,4 \times 10^3 + 7,85 \times 10^3 = 39,25 \times 10^3 \text{ мм}^2. \quad (14)$$

«Отношение площади поперечного сечения реактора к площади ввода исходных веществ вычисляется по формуле:

$$S_1 = \frac{S_{P-PA}}{S_0}, \quad (15)$$

где S_{P-PA} – площадь поперечного сечения реактора;

S_0 – суммарная площадь ввода исходных компонентов» [20].

Подставляя значения, получаем:

$$S_1 = \frac{4152 \times 10^3}{39,25 \times 10^3} = 105,79 \text{ мм}^2 > 3.$$

Согласно литературным данным [20], [25], [45], [36], [37] если $S_1 > 3$, распределение скорости потоков внутри реактора становится неравномерным, что может приводить к отклонениям от идеального режима перемешивания. Такие отклонения ухудшают эффективность массопереноса и снижают степень превращения реагентов.

«Для анализа гидродинамического режима воспользуемся критерием температурного профиля по высоте используемого реактора, представленного на графике (рисунок 12). Из графика видно, что при высоте реактора более 20 метров температурный максимум достигается на высоте 6-10 метров» [45]. Это свидетельствует о наличии значительных температурных градиентов, вызванных недостаточной скоростью осевого перемешивания. Образование промежуточного продукта – карбамата аммония – протекает быстрее, чем перемешивание потоков, что создает зону локального перегрева.

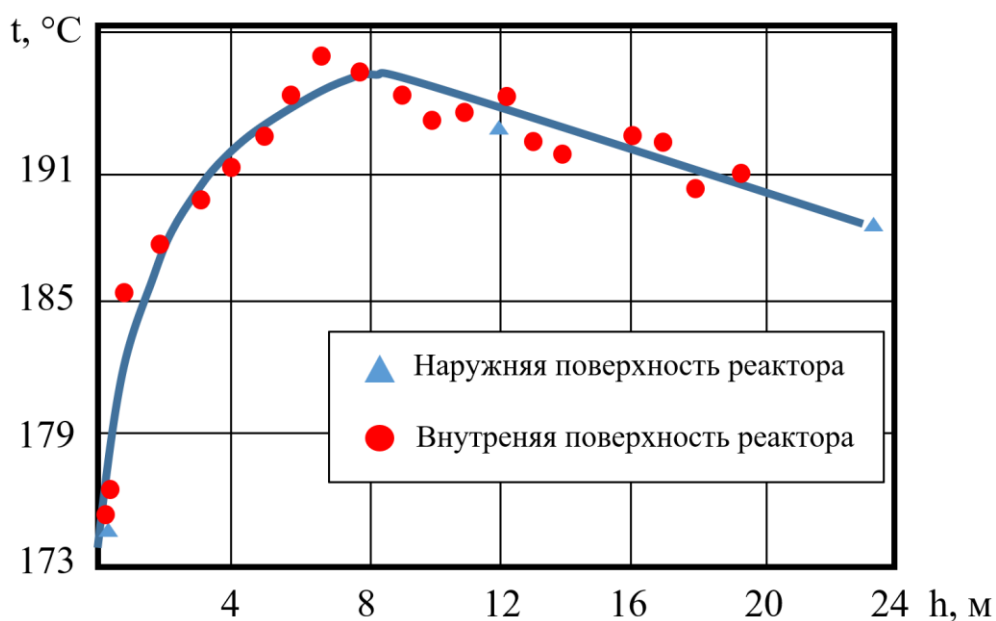


Рисунок 12 – Распределение температур в зависимости от высоты реактора

Кривая температурного распределения также указывает на то, что образование карбамида занимает значительное время. Неравномерность температурного режима снижает общую производительность реактора и требует корректировки гидродинамических условий для улучшения эффективности. Следовательно, изучение процессов, связанных с

тепломассообменными характеристиками внутри реактора, а также поиск эффективных методов и средств для улучшения температурного режима его функционирования представляют собой приоритетные задачи настоящего исследования. Оптимизация теплового режима не только способствует повышению производительности реактора, но и оказывает прямое влияние на степень конверсии сырья, снижая энергетические и материальные затраты.

2.1.1 Аналитический расчет и данные материального баланса

Для дальнейшего анализа был проведен расчет материального баланса реактора, работающего в соответствии с технологической схемой цеха №4 ПАО «КуйбышевАзот». Параметры производительности аппарата по расходу сырья, представлены в таблицах 3 и 4. Эти данные используются для моделирования и оценки эффективности работы реактора в условиях промышленного производства мощностью 480 тыс. тонн в год.

Таблица 3 – Вход компонентов

Наименование	Формула	Молярная масса, кг/моль	Поток, кг/ч
1	2	3	4
Аммиак	NH_3	17	35238,82
Углекислый газ	CO_2	44	78954,2

Таблица 4 – Выход продуктов

Наименование	Формула	Молярная масса, кг/моль	Поток, кг/ч
1	2	3	4
Карбамид	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	60	59668,87
Вода	H_2O	18	18782,486
Углекислый газ	CO_2	44	32827,68
Аммиак	NH_3	17	2502,79

Эффективное функционирование реактора синтеза карбамида требует точных расчетов ключевых параметров, включая плотность смеси, степень превращения реагентов, давление, рабочий объем и производительность. Эти показатели влияют на оптимизацию процесса и стабильность работы оборудования.

Расчет средней плотности смеси

«Средняя плотность реакционной смеси ($\rho_{\text{см}}$) определяется по формуле» [36]:

$$\rho_{\text{см}} = \gamma_1 \cdot \rho_1 + \gamma_2 \cdot \rho_2, \quad (16)$$

где γ_1 и γ_2 – объемные доли компонентов потока №1 и №2, соответственно [36], [37];

ρ_1 и ρ_2 – плотности компонентов потока №1 и №2 [36], [37].

Подставляя значения ($\gamma_1 = 0,391$, $\gamma_2 = 0,601$, $\rho_1 = 239 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 784 \text{ кг/м}^3$) [36], [37] получаем:

$$\rho_{\text{см}} = 0,391 \cdot 239 + 0,601 \cdot 784 = 564,633 \text{ кг/м}^3 = 0,564633 \text{ г/см}^3.$$

Определение минимального количества молей аммиака

«Минимальное количество молей аммиака (L_{MIN}) рассчитывается по формуле» [24]:

$$\begin{aligned} L_{\text{MIN}} = & -0,11742t + 10^{-4} \cdot 3,6705t^2 - 3,9041\rho_{\text{см}} - 0,10326\rho_{\text{см}}^{-1} + \\ & + 1,9738\rho_{\text{см}}^2 + 0,9072W - 0,20309W^2 + 13,665, \end{aligned} \quad (17)$$

«где t – температура смеси, равная 190°C ;

W – количество молей воды, на основании аналитических данных, $W = 0,5$ » [37].

Подставляя значения, получаем:

$$\begin{aligned} L_{\text{MIN}} = & -22,3117 + 13,2541 - 2,2 - 0,1831 + \\ & + 0,6162 + 0,4535 - 0,0507675 + 13,665 = 3,248 \text{ моль}. \end{aligned}$$

Степень превращения CO_2 в карбамид

Степень превращения (x^*) рассчитывается по формуле [36], [37]:

$$\begin{aligned} x^* = & 0,0412t - 14,05\rho_{\text{см}} - 11,205L - 16,32W + \\ & 0,02375Lt - 6,216\rho_{\text{см}}^{-1} + 44,49\ln L + 7,341L\rho_{\text{см}} + 30,6, \end{aligned} \quad (18)$$

«где L – количество молей NH_3 , в диапазоне 2-5 и принятое равным 3,50 на основании неравенства $L > L_{\text{MIN}}$, $3,50 > 3,248$ » [37].

Подставляя значения, получаем:

$$x^* = 7,809 - 7,8844 - 39,193 - 8,145 + \\ 15,7871 - 11,0154 + 55,7604 + 14,5946 + 30,60 = 58,15 \, \%.$$

Давление и рабочий объем реактора

«Значение константы скорости (K) в зависимости от температуры, определяем по графику [37], для этого определяем значение коэффициента $\frac{1}{t} \cdot 10^3$, $K^{-1} = \frac{1}{t} \cdot 10^{-3}$, $K = \frac{1}{273+190} \cdot 10^{-3} = 2,308$ » [37].

Согласно графику $Lg\kappa_c = 1,258$, откуда $\kappa_c = 18,154$.

Равновесное давление (P) определяется по формуле [36], [37]:

$$P = -1,5805t + 10^{-3} \cdot 5,1729t^2 + 3,5025\rho_{\text{CM}} + 1,668L - \\ - 0,4564W - 0,98163W^2 + 120,8. \quad (19)$$

Подставляя значения, получаем:

$$P = -300,181 + 186,7272 + 1,9798 + 5,9535 - \\ - 0,2282 - 0,2452 + 120,8 = 14,7853 \text{ МПа}.$$

«Рабочий объем реактора (V_P) вычисляется по формуле:

$$V_P = 0,785 \cdot D_{\text{BH}}^2 \cdot H_C \gg [36]. \quad (20)$$

где $D_{\text{BH}} = 2300 \text{ мм}$, $H_C = 39000 \text{ мм}$.

Подставляя значения, получаем:

$$V_P = 0,785 \cdot 2300^2 \cdot 39000 = 1619 \times 10^8 \text{ мм}^3 = 160,7 \text{ м}^3.$$

Удельная производительность и общая производительность

Удельная нагрузка по CO_2 :

$$q_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{V_p}. \quad (21)$$

где m_{CO_2} – расход углекислоты по материальному балансу с учетом конверсии на производительность 480 тыс. т/год равен, $m_{\text{CO}_2} = 78954,2$ кг/час.

$$q_{\text{CO}_2} = \frac{78954,2}{160,7} = 487,673 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{ч}.$$

«Время протекания реакции в реакторе ($\tau_{\text{П}}$) вычисляется по формуле:

$$\tau_{\text{П}} = \frac{\rho_{\text{см}}}{\left(q_{\text{CO}_2} \left(1 + \frac{17L}{44} + \frac{18W}{44} \right) \right)} \gg [37]. \quad (22)$$

Подставляя значения, получаем:

$$\tau_{\text{П}} = \frac{0,564633}{\left(487,673 \cdot \left(1 + \frac{59,5}{44} + \frac{9}{44} \right) \right)} = 0,446 \text{ часа}.$$

«Степень превращения исходных веществ в карбамид ($x_{\text{В}}$) вычисляется по формуле:

$$x_{\text{В}} = \frac{(-1 - Z_1)}{(2AZ_1) + \left(\left(\frac{(1+Z_1)^2}{4A^2Z_1^2} \right) + \frac{1}{A} \right)^{0,5}}, \quad (23)$$

где коэффициенты Z_1 и A рассчитываются по формулам» [37]:

$$Z_1 = \frac{k_c \rho_{\text{см}} P_c}{q_{\text{CO}_2} (1 + 0,386L) P}. \quad (24)$$

«где P_c – давление в реакторе, согласно регламенту» [37], $P_c = 16$ МПа.

$$A = \frac{1-x^*}{x^{*2}}. \quad (25)$$

Подставляя значения, получаем:

$$Z_1 = \frac{18,154 \cdot 0,564633 \cdot 16}{487,673 \cdot (1+1,351) \cdot 14,7853} = 9,72.$$

$$A = \frac{1 - 0,5815}{0,5815^2} = 1,388.$$

$$x_B = \frac{(-1-9,72)}{(2 \cdot 1,388 \cdot 9,72) + \left(\left(\frac{(1+9,72)^2}{4 \cdot 1,388^2 \cdot 9,72^2} \right) + \frac{1}{1,388} \right)^{0,5}} = 0,5588 \text{ (долей), что}$$

составляет $0,5588 \cdot 100 = 55,88 \%$.

«Удельная производительность реактора ($\Pi_{уд}$) по карбамиду равна:

$$\Pi_{уд} = 0,01364 \cdot x_B \cdot q_{CO_2} \text{ [19]}. \quad (26)$$

$$\Pi_{уд} = 0,01364 \cdot 55,88 \cdot 487,673 = 371,306 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{ч)}.$$

«Производительность реактора синтеза ($\Pi_{КС}$) карбамида равна:

$$\Pi_{КС} = \Pi_{уд} \cdot V_P \text{ [37]}. \quad (27)$$

$$\Pi_{КС} = 371,306 \cdot 160,7 = 59668,87 \text{ кг/час.}$$

Соответственно $59668,87 \text{ кг/час} \cdot 24 \text{ (часа)} \cdot 335 \text{ (суток/год)} / 1000 = 479738 \text{ т/год.}$

2.1.2 Исследование влияния температуры и давления на производительность и степень превращения в реакторе синтеза карбамида

Температура и давление являются ключевыми параметрами, влияющими на производительность реактора и степень конверсии исходных компонентов в карбамид. Эти показатели определяют кинетическую скорость реакции, равновесие продуктов и фазовое состояние реагентов.

Анализ взаимосвязи между температурно-давленческими условиями, производительностью реактора ($P_{\text{КС}}$, т/ч) и степенью превращения ($x_{\text{В}}$, %) позволяет выявить оптимальные параметры, обеспечивающие максимальную эффективность процесса при минимальных потерях. Такой подход повышает производительность и энергоэффективность технологической схемы синтеза карбамида.

Влияние температуры на работу реактора

Проведем анализ эффективности работы реактора в диапазоне температур от 100 до 240 °С. Используя расчетные формулы, подставим значения температуры с шагом 20 °С. Расчетные данные по производительности и степени превращения сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Сводные данные

t, °С	$P_{\text{КС}}$, т/ч	$x_{\text{В}}$, %
1	2	3
100	58,757	44,33
120	60,025	47,73
140	60,804	50,77
160	60,888	53,26
180	60,275	55,13
200	58,953	56,25
220	56,968	56,63
240	54,394	56,27

На основании расчетов построим график зависимости производительности и степени превращения от температурного режима (рисунок 13). График демонстрирует, что оптимальным значением

температуры для процессов синтеза является 170 °С. При этой температуре достигается наилучший баланс параметров:

- производительность реактора ($\Pi_{\text{КС}}$): 60,574 т/ч;
- степень превращения ($x_{\text{В}}$): 54,34 %.

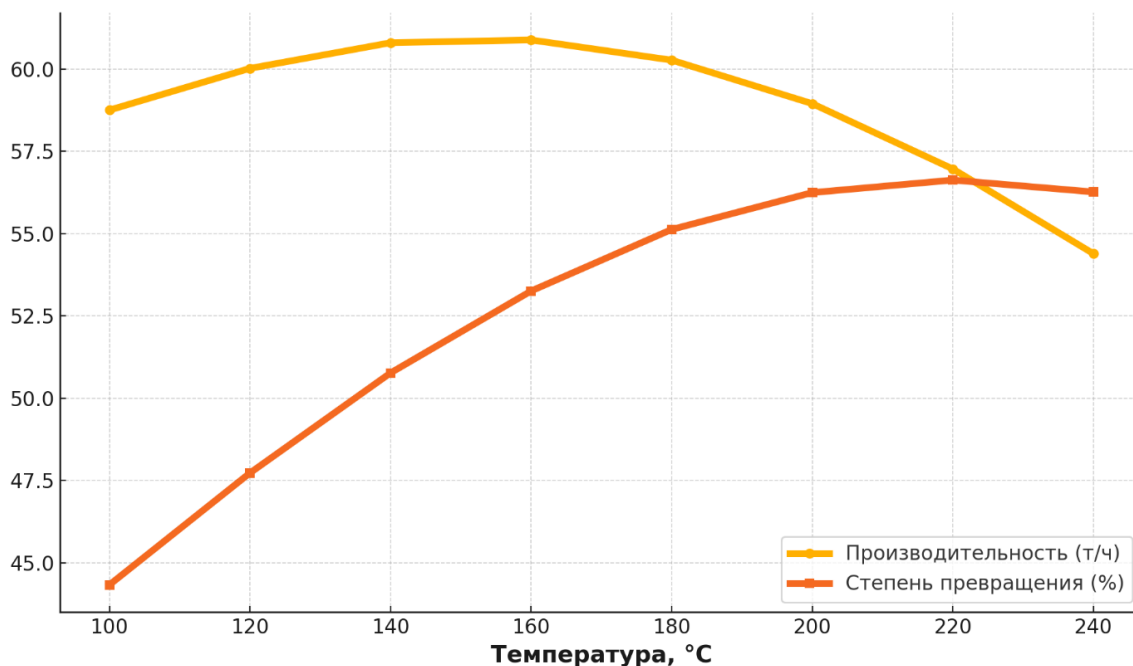


Рисунок 13 – Зависимость производительности и степени превращения исходного вещества от температуры

Влияние давления на работу реактора

Для исследования влияния давления на работу реактора был выбран диапазон 14–22 МПа. На основе подстановки значений давления в расчетные формулы были определены показатели производительности ($\Pi_{\text{КС}}$, т/ч) и степени превращения ($x_{\text{В}}$, %), представленные в таблице 6.

Графический анализ зависимости производительности и степени конверсии от давления (рисунок 14) выявляет, что увеличение давления до 20 МПа приводит к значительному росту выхода карбамида и эффективности конверсии.

Таблица 6 – Производительность реактора синтеза карбамида

Р _с , МПа	П _{КС} , т/ч	хв, %
1	2	3
14	59,354	55,46
15	59,537	55,63
16	59,702	55,88
17	59,844	55,96
18	59,973	56,04
19	60,088	56,15
20	60,212	56,25
21	60,229	56,28
22	60,253	56,30

Однако при дальнейшем повышении давления прирост этих показателей замедляется, что свидетельствует о снижении эффективности процесса. Это делает дальнейшее увеличение давления экономически и энергетически неоправданным, подчеркивая важность оптимального выбора рабочих параметров для повышения производительности и минимизации затрат.

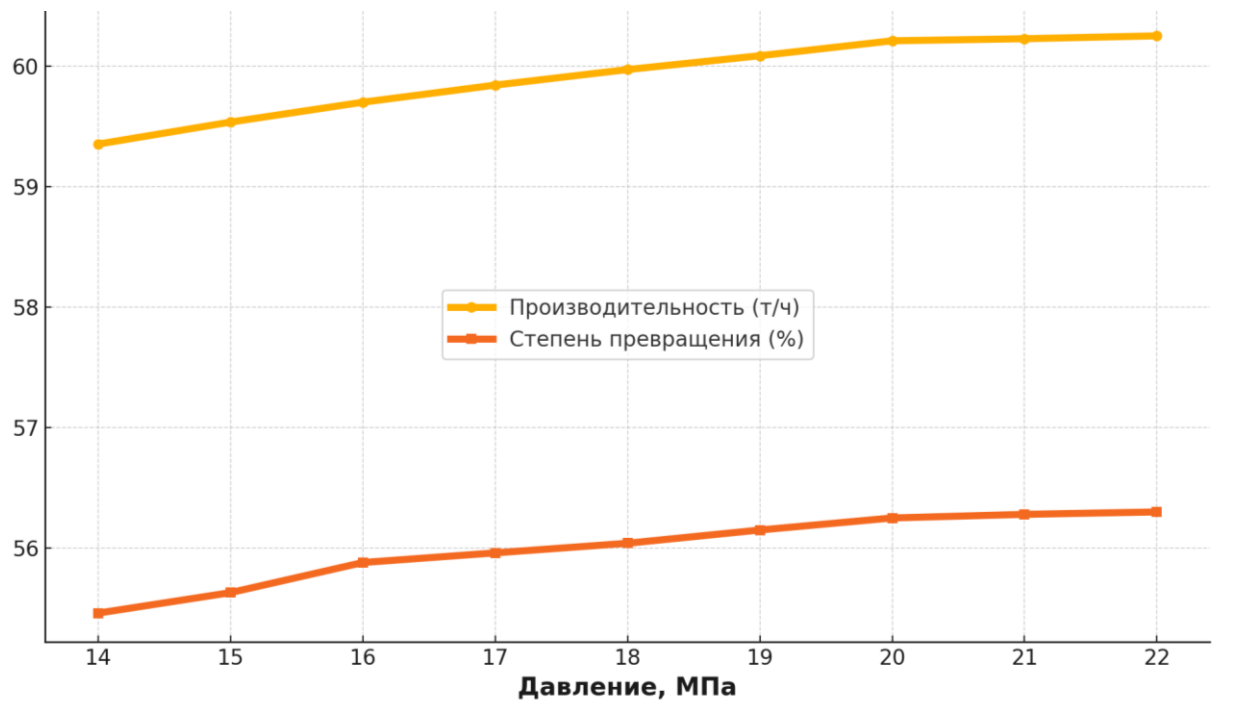


Рисунок 14 – Зависимость производительности и степени превращения исходного вещества от давления

Оптимальные параметры при давлении 20 МПа:

- производительность реактора (P_{KC}): 60,212 т/ч;
- степень превращения (x_B): 56,25 %.

Достижение этих параметров связано с максимальным использованием возможностей термодинамической и кинетической модели процесса.

На основании проведенного исследования термодинамических, кинетических и гидродинамических характеристик реактора синтеза карбамида можно сделать следующие выводы:

- температура – оптимальное значение составляет 170 °С. Снижение температуры до этого уровня может быть достигнуто за счет подачи углекислого газа с более низкой температурой, что обеспечит улучшение теплового баланса внутри реактора;
- давление – оптимальное значение составляет 20 МПа. Дальнейшее повышение давления возможно только при установке высокопроизводительного компрессора, но такие изменения требуют оценки экономической целесообразности.

Таким образом, температура и давление являются ключевыми параметрами, определяющими производительность и степень превращения в реакторе синтеза карбамида. Их оптимизация позволяет повысить эффективность без значительных конструктивных модификаций реакционного оборудования.

2.2 Материальный баланс реактора синтеза карбамида: расчет и анализ

В данном исследовании мы проводим детальный анализ материального баланса процесса производства карбамида с производительностью 62,2033 т/ч. «Расчеты основываются на суммарной реакции (10) и оптимальных параметрах температуры и давления, установленных в пункте 2.1.2: температура $t = 170$ °С и давление $P_C = 20$. Исходные Молярные массы веществ приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Молярные массы входящих в реакции веществ

Формула	Молярная масса, кг/моль
1	2
M_{NH_3}	17
M_{CO_2}	44
$M_{CO(NH_2)_2}$	60
M_{H_2O}	18

Для определения стехиометрических расходов аммиака и углекислого газа, необходимых для синтеза указанного количества карбамида, используем суммарное уравнение реакции (10).

Количество аммиака рассчитывается по формуле:

$$m_{1NH_3} = n \frac{M_{NH_3} \cdot m_{CO(NH_2)_2}}{M_{CO(NH_2)_2}} \quad (28)$$

где $n = 2$ – стехиометрический коэффициент;

M_{NH_3} – молярная масса аммиака;

$m_{CO(NH_2)_2}$ – массовый расход карбамида;

$M_{CO(NH_2)_2}$ – молярная масса карбамида» [25].

Подставляя известные значения, получаем:

$$m_{1NH_3} = 2 \frac{17 \cdot 622033}{60} = 35238,82 \text{ кг/ч.}$$

Аналогично определяем количество углекислого газа и воды:

$$m_{1CO_2} = \frac{44 \cdot 622033}{60} = 45616,653 \text{ кг/ч.}$$

$$m_{1H_2O} = \frac{18 \cdot 622033}{60} = 18782,486 \text{ кг/ч.}$$

Средняя плотность реакционной смеси в реакторе, согласно уравнению (16) и данным из источников [25], [37], составляет:

$$\rho_{см} = 0,391 \cdot 246 + 0,601 \cdot 789 = 572,65 \text{ кг/м}^3$$

что эквивалентно $0,573 \text{ г/см}^3$.

Определяем степень превращения исходного углекислого газа в карбамид по выражению (18) [25], [37]:

$$\begin{aligned} x^* = & 0,0412 \cdot 170 - 14,05 \cdot 0,573 - 11,205 \cdot 3,5 - 16,32 \cdot 0,5 + \\ & + 0,02374 \cdot 3,5 \cdot 170 - 6,208 \cdot 0,573^{-1} + 44,51 \ln 3,5 + 7,399 \cdot 3,5 \cdot 0,573 + \\ & + 30,6 = 55,88 \% \end{aligned}$$

Это соответствует $x^* = 0,5588$ долей.

Параметр L выбираем исходя из условия $L > L_{\text{MIN}}$. Рассчитываем минимальное значение L по формуле:

$$\begin{aligned} L_{\text{MIN}} = & -0,11742 \cdot 170 + 10^{-4} \cdot 3,6705 \cdot 170^2 - 3,9041 \cdot 0,573 - 0,10326 \cdot \\ & \cdot 0,573^{-1} + 1,9738 \cdot 0,573^2 + 0,9072 \cdot 0,5 - 0,20309 \cdot 0,5^2 + 13,665 = 2,943. \end{aligned}$$

Принимаем $L = 3,5$, что удовлетворяет условию $3,50 > 2,943$ [25], [37].

Таким образом, $55,88 \%$ углекислого газа участвует в реакции синтеза карбамида. Общее необходимое количество CO_2 с учетом степени превращения (x^*) составляет:

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{m_{1\text{CO}_2}}{x^*} \cdot 100. \quad (29)$$

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{45616,6}{55,88} \cdot 100 = 81654,36 \text{ кг/ч.}$$

Количество углекислоты вступившей в реакцию:

$$m_{\text{P}} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{100} \cdot x^*. \quad (30)$$

$$m_{\text{P}} = \frac{81654,36}{100} \cdot 55,88 = 45620,62 \text{ кг/ч.}$$

Количество не прореагировавшей углекислоты:

$$m_H = m_{CO_2} - m_P. \quad (31)$$

$$m_H = 81654,36 - 45620,62 = 36398,02 \text{ кг/ч.}$$

«Суммарный поток веществ на входе в реактор:

$$m_{BX} = m_{NH_3} + m_{CO_2} \text{» [25].} \quad (32)$$

$$m_{BX} = 35238,82 + 81654,36 = 116893,18 \text{ кг/ч.}$$

Для определения константы скорости реакции при заданной температуре используем данные графика из [25, с. 45]. Рассчитываем коэффициент: $\frac{1}{t} \cdot 10^3, K^{-1} = \frac{1}{t} \cdot 10^{-3}, K = \frac{1}{273+170} \cdot 10^{-3} = 2,259$.

«По графику находим $Lg\kappa_c = 1,254$, откуда $\kappa_c = 17,91$.

Равновесное давление рассчитываем по уравнению (19)» [37]:

$$P = -268,583 + 149,485 + 1,996 + 5,953 - 0,228 - 0,245 + 120,9 = 9,177 \text{ МПа.}$$

Удельная нагрузка реактора по углекислому газу (21):

$$q_{CO_2} = \frac{81654,36}{160,7} = 508,114 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{ч.}$$

Время пребывания реакционной смеси в реакторе (21) [25], [37]:

$$\tau_{II} = \frac{0,573}{\left(508,114 \cdot \left(1 + \frac{59,5}{44} + \frac{9}{44}\right)\right)} = 0,443 \text{ часа.}$$

Для расчета степени превращения используем коэффициенты Z_1 и A (24) и (25):

$$Z_1 = \frac{17,91 \cdot 0,573 \cdot 20}{508,114 \cdot (1 + 0,386 \cdot 3,5) \cdot 9,177} = 18,995.$$

$$A = \frac{1 - 0,5588}{0,5588^2} = 1,4131.$$

Степень превращения исходных веществ:

$$x_B = \frac{(-1 - 18,995)}{(2 \cdot 1,4131 \cdot 18,995) + \left(\left(\frac{(1 + 18,995)^2}{4 \cdot 1,4131^2 \cdot 18,995^2} \right) + \frac{1}{1,4131} \right)^{0,5}} = 0,5483 \text{ (долей),}$$

что соответствует 54,83 %.

Производительность реактора по карбамиду (26):

$$П_{уд} = 0,01364 \cdot 54,83 \cdot 508,114 = 380,009 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{ч)}.$$

Общая производительность реактора (27):

$$П_{КС} = 380,009 \cdot 160,7 = 61067,446 \text{ кг/час,}$$

что в годовом исчислении составляет:

$$П_{год} = 61067,446 \cdot 24 \cdot 335 / 1000 = 490982 \text{ т/год.}$$

«Расход аммиака, с учетом выхода карбамида:

$$m_{2\text{NH}_3} = n \frac{M_{\text{NH}_3} \cdot П_{КС}}{M_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2}} \text{ [25].} \quad (33)$$

$$m_{2\text{NH}_3} = 2 \frac{17 \cdot 61067,446}{60} = 34604,886 \text{ кг/час.}$$

«Количество непрореагировавшего аммиака:

$$m_{\text{NH}_3} = m_{1\text{NH}_3} - m_{2\text{NH}_3} \text{ [25].} \quad (34)$$

$$m_{\text{NH}_3} = 35238,82 - 34604,886 = 644,914 \text{ кг/час.}$$

«Суммарный расход веществ на выходе из реактора:

$$m_{\text{вых}} = m_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{H}} + m_{\text{NH}_3} \text{ [25].} \quad (35)$$

$$m_{\text{вых}} = 61067,446 + 18782,486 + 36398,02 + 644,914 = 116893,18 \text{ кг/ч.}$$

«Так как количество воды, поступающее из эжектора в реактор, незначительно, материальный баланс проводим по двухкомпонентной системе $\text{NH}_3^{\Sigma} - \text{CO}_2^{\Sigma}$, где вода образуется исключительно в результате реакции синтеза карбамида» [36].

Процентное содержание компонентов на входе:

– аммиак: $x_1 = \frac{35238,82}{116893,18} \cdot 100 = 30,14 \text{ \%}$.

– углекислый газ: $x_2 = \frac{81654,36}{116893,18} \cdot 100 = 69,86 \text{ \%}$.

На выходе:

– карбамид: $x_3 = \frac{61067,446}{116893,18} \cdot 100 = 52,2 \text{ \%}$.

– вода: $x_4 = \frac{18782,486}{116893,18} \cdot 100 = 16,1 \text{ \%}$

– непрореагировавший CO_2 : $x_5 = \frac{36398,02}{116893,18} \cdot 100 = 31,15 \text{ \%}$.

– непрореагировавший NH_3 : $x_6 = \frac{644,914}{116893,18} \cdot 100 = 0,55 \text{ \%}$.

Сводные результаты представлены в таблицах 8 и 9.

Таблица 8 – Вход веществ

Наименование	Формула	Молярная масса, кг/моль	Состав, % (вес.)	Поток, кг/ч
1	2	3	4	5
Аммиак	NH_3	17	30,14	35238,82
Углекислый газ	CO_2	44	69,86	81654,36
Суммарный расход ($m_{\text{вх}}$)	–	–	100	116893,18

Таблица 9 – Выход продукта

Наименование	Формула	Молярная масса, кг/моль	Состав, % (вес.)	Поток, кг/ч
1	2	3	4	5
Карбамид	CO(NH ₂) ₂	60	52,2	61067,45
Вода	H ₂ O	18	16,1	18782,48
Углекислый газ (непрореагировавший)	CO ₂	44	31,15	36398,02
Аммиак (непрореагировавший)	NH ₃	17	0,55	644,91
Суммарный выход ($m_{\text{ВЫХ}}$)	—	—	100	116893,18

Отклонение в материальном балансе синтеза CO(NH₂)₂:

$$\mathcal{E} = \frac{m_{\text{ВХ}} - m_{\text{ВЫХ}}}{m_{\text{ВХ}}} \cdot 100 \% . \quad (36)$$

$$\mathcal{E} = \frac{116893,18 - 116893,18}{116893,18} \cdot 100 = 0 \% .$$

2.3 Тепловой баланс реактора синтеза карбамида: анализ и расчеты

В продолжение нашего исследования, рассмотрим детальный расчет теплового баланса процесса синтеза карбамида. Для этого используем фундаментальное уравнение теплотехники, связывающее количество теплоты с основными параметрами вещества:

$$Q = c \cdot T \cdot m , \quad (37)$$

«где Q – количество теплоты, кДж/ч;

c – удельная теплоемкость вещества, кДж/кг·°K

T – абсолютная температура, °K;

m – массовый расход вещества, кг/ч» [25].

Температура исходной смеси на входе в реактор составляет 160 °C, что соответствует $T_{\text{ВХ}} = 160 + 273 = 433$ °K.

Рассмотрим термодинамические свойства реагентов при данной температуре и давлении $P_C = 20$ МПа:

- «удельная теплоемкость аммиака (C_{NH_3}) равна 2,1158 кДж/кг·°К» [8];
- «удельная теплоемкость углекислоты (C_{CO_2}) составляет 1,845 кДж/кг·°К» [8].

Рассчитаем количество теплоты, поступающее с аммиаком:

$$Q_{NH_3} = 2,1158 \cdot 433 \cdot 35238,82 = 32295177,17 \text{ кДж/ч.}$$

Аналогично определим теплоту, вносимую углекислым газом:

$$Q_{CO_2} = 1,845 \cdot 433 \cdot 81654,36 = 67303540,96 \text{ кДж/ч.}$$

«Суммарное количество теплоты, поступающее в реактор с реагентами, составляет:

$$Q_{BX} = Q_{NH_3} + Q_{CO_2} \text{» [25].} \quad (38)$$

$$Q_{BX} = 32295177,17 + 65303540,96 = 99598718,13 \text{ кДж/ч.}$$

Далее, перейдем к анализу продуктов реакции на выходе из реактора, где температура составляет 170 °С или $T_{\text{вых}} = 170 + 273 = 443$ °К. Термодинамические свойства веществ при этой температуре и давлении ($P_C = 20$ МПа) остаются ключевыми для точности расчета:

- «удельная теплоемкость карбамида ($C_{CO(NH_2)_2}$) – 2,134 кДж/кг·°К;
- удельная теплоемкость воды (C_{H_2O}) – 1,674 кДж/кг·°К;
- удельная теплоемкость углекислоты (C_{CO_2}) – 1,881 кДж/кг·°К;
- удельная теплоемкость аммиака (C_{NH_3}) – 2,126 кДж/кг·°К» [8].

Вычислим количество теплоты, уносимое карбамидом:

$$Q_{CO(NH_2)_2} = 2,134 \cdot 443 \cdot 61067,45 = 58068095,58 \text{ кДж/ч.}$$

Количество теплоты, уносимое водой:

$$Q_{H_2O} = 1,674 \cdot 443 \cdot 18782,486 = 13839739,96 \text{ кДж/ч.}$$

Теплота, уносимая углекислым газом:

$$Q_{\text{CO}_2} = 1,881 \cdot 443 \cdot 36398,02 = 30101535,09 \text{ кДж/ч.}$$

Количество теплоты, уносимое непрореагировавшим аммиаком:

$$Q_{\text{NH}_3} = 2,126 \cdot 443 \cdot 644,91 = 607387,85 \text{ кДж/ч.}$$

Поскольку реакция синтеза карбамида является экзотермической и сопровождается выделением теплоты в количестве 110 кДж/моль, вычислим общее количество теплоты, выделенное в реакции:

$$Q_p = 110 \cdot n_{\text{CO(NH}_2)_2}, \quad (39)$$

где $n_{\text{CO(NH}_2)_2}$ – количество молей карбамида, моль/ч и равно:

$$n_{\text{CO(NH}_2)_2} = \frac{m_{\text{CO(NH}_2)_2}}{M_{\text{CO(NH}_2)_2}}. \quad (40)$$

$$n_{\text{CO(NH}_2)_2} = \frac{61067,45}{60} = 1017,79 \text{ моль/ч.}$$

$$Q_p = 110 \cdot 1017,79 = 111956,9 \text{ кДж/ч.}$$

Суммарное количество теплоты, уносимое с продуктами реакции, составляет:

$$Q_{\text{ВЫХ}} = Q_{\text{CO(NH}_2)_2} + Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{CO}_2} + Q_{\text{NH}_3} + Q_p. \quad (41)$$

$$Q_{\text{ВЫХ}} = 57730846,667 + 13828753,533 + 30129851,300 + 607387,846 + 111956,9 \\ = 100540395,12 \text{ кДж/ч.}$$

Результаты проведенных расчетов сведены в сводных таблицах 10 и 11.

Таблица 10 – Вход веществ

Наименование	Формула	Температура, °С	уд. тепл. кДж/кг·°К	Поток, кг/ч	Количество теплоты, кДж
1	2	3	4	5	6
Аммиак	NH ₃	160	2,1158	35238,82	32295177,17
Углекислый газ	CO ₂	160	1,845	81654,36	67303540,96
Сумма	–	–	–	–	99598718,13

Таблица 11 – Выход продуктов

Наименование	Формула	Температура, °С	уд. тепл. кДж/кг·°К	Поток, кг/ч	Количество теплоты, кДж
1	2	3	4	5	6
Карбамид	CO(NH ₂) ₂	170	2,134	61067,45	58068095,58
Вода	H ₂ O	170	1,674	18782,48	13839739,96
Углекислый газ	CO ₂	170	1,881	36398,02	30101535,09
Аммиак	NH ₃	170	2,126	644,91	607387,85
Теплота реакции	–	–	–	–	111956,9
Сумма	–	–	–	–	100540395,12

Для оценки согласованности теплового баланса процесса синтеза карбамида рассчитаем относительное отклонение:

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{ВЫХ}} - Q_{\text{ВХ}}}{Q_{\text{ВЫХ}}} \cdot 100 \% . \quad (42)$$

$$\varepsilon = \frac{100540395,12 - 99598718,13}{100540395,12} \cdot 100 = 0,937 \% .$$

2.4 Прочностные расчеты конструктивных элементов реактора

Для обеспечения безопасной эксплуатации реактора при рабочем давлении 20 МПа, превышающем исходное расчетное значение 16 МПа, проведен детальный расчет прочности. Реактор изготавливается из стали марки 12Х18Н10Т, обладающей высокой механической прочностью и стойкостью к коррозии.

«Характеристики материалов и конструктивных элементов реактора представлены в таблицах 12 и 13. Эти расчеты подтверждают надежность аппарата и его соответствие требованиям безопасности при эксплуатации в условиях повышенного давления.

Таблица 12 – Характеристики конструктивных элементов рассчитываемого реактора

Материал	Конструктивные элементы	Допускаемые напряжения, МПа	
		$[\sigma]_{20}$	$[\sigma]_t$
1	2	3	4
Сталь 12Х18Н10Т	обечайка корпуса, днища, люки, фланцы, патрубки	182	170
Сталь 12Х18Н10Т	болты, гайки	182	170

Таблица 13 – Технические характеристики рассчитываемого реактора

Параметр	Значение
1	2
Давление: – $P_{\text{РАСЧ.}}$ – $P_{\text{ПР}}$	22 МПа 29,5 МПа
Расчетная температура среды, $T_{\text{РАСЧ.}}$	170 °С
Внутренний диаметр аппарата, $D_{\text{ВН}}$	2300 мм
Допускаемое напряжение [14]: – $[\sigma]_{20}$ – $[\sigma]_t$	183 МПа 171 МПа
Коэффициент прочности цилиндрической стенки в продольном направлении, ϕ	1

Прежде всего, определим величину пробного давления, основываясь на методиках, изложенных в работе. Пробное давление $P_{\text{ПР}}$ рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{ПР}} = 1,25P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t}, \quad (43)$$

где P – рабочее давление, 22 МПа; $[\sigma]_{20}$ – допускаемое напряжение материала при температуре 20 °С; $[\sigma]_t$ – допускаемое напряжение при рабочей температуре; 1,25 – коэффициент запаса прочности» [14].

Подставляя известные значения, получаем:

$$P_{\text{ПР}} = 1,25 \cdot 22 \cdot \frac{183}{171} = 29,5 \text{ МПа.}$$

2.4.1 Расчет обечайки нагруженной внутренним избыточным давлением

Для обеспечения долговечности и надежности реактора необходимо учесть суммарную прибавку к толщине стенки, учитывающую коррозионные и эрозионные процессы, а также технологические допуски. «Суммарная прибавка ν определяется как:

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 + \nu_3, \quad (44)$$

где ν_1 – прибавка на коррозию, учитывающая скорость разъедания материала и срок службы аппарата. Для нашего случая $\nu_1 = 1$ мм;
 ν_2 – прибавка на эрозию при наличии таковой в процессе эксплуатации, $\nu_2 = 0,8$ мм;
 ν_3 – прибавка на минусовой допуск по толщине листа, из которого изготовлена обечайка, $\nu_3 = 0,0$ мм» [14].

Таким образом, суммарная прибавка составляет:

$$\nu = 1 + 0,8 = 1,8 \text{ мм}.$$

2.4.2 Определение расчетной толщины стенки

«Расчетная толщина цилиндрической стенки $\delta_{\text{расч.}}$, подверженной внутреннему избыточному давлению $P_{\text{расч.}}$, вычисляется по формуле:

$$\delta_{\text{расч.}} = \frac{P_{\text{расч.}} \cdot D_{\text{расч.}}}{2 \cdot [\sigma]_t \cdot \varphi - P_{\text{расч.}}}. \quad (45)$$

где $P_{\text{расч.}}$ – расчетное давление, 22 МПа; $D_{\text{расч.}}$ – внутренний диаметр реактора, 2300 мм; $[\sigma]_t$ – допускаемое напряжение материала при рабочей температуре, 170 МПа; φ – коэффициент прочности сварного шва, для бесшовных конструкций $\varphi = 1$ » [14].

Подставляя значения, получаем:

$$\delta_{\text{расч.}} = \frac{22 \cdot 2300}{2 \cdot 170 \cdot 1 - 22} = 159,119 \text{ мм}.$$

Проверка на испытательное давление

Согласно стандартам [14]-[18], [48], если выполняется условие:

$$P_{\text{пр}} < P_{\text{расч.}} \cdot 1,35 \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t} - \text{то дополнительный расчет на испытательное}$$

давление не требуется. Подставляя значения:

$$29,5 \text{ МПа} < 22 \text{ МПа} \cdot 1,35 \cdot \frac{183}{171} \approx 31,3 \text{ МПа, условие выполняется.}$$

Определение конструктивной толщины стенки

Конструктивная толщина стенки $\delta_{\text{исп}}$ с учетом прибавок определяется как:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{исп.}} &= S_{\text{расч.}} + v. \\ \delta_{\text{исп.}} &= 159,119 + 1,8 = 160,919 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (46)$$

С учетом стандартных размеров и технологических требований, принимаем фактическую толщину стенки реактора [14]-[18]: $\delta_{\text{исп.}} = 230 \text{ мм}$.

Расчет внутреннего избыточного давления

Внутреннее избыточное давление, которое может выдержать реактор с данной толщиной стенки, рассчитывается по формуле [14]:

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma]_t \cdot \varphi(\delta_{\text{исп.}} - v)}{D_{\text{вн}} + (\delta_{\text{исп.}} - v)}. \quad (47)$$

где $D_{\text{вн}} = 2300 \text{ мм}$ – внутренний диаметр реактора.

Подставляя значения:

$$[P] = \frac{2 \cdot 171 \cdot (230 - 1,8)}{2300 + (230 - 1,8)} = 30,87 \text{ МПа.}$$

Полученное значение внутреннего избыточного давления превышает требуемое рабочее давление, что подтверждает достаточную прочность конструкции.

Проверка условий применения формул

Убедимся в корректности применения используемых формул для расчета обечаек и труб диаметром $D \geq 200$ мм [42]. Необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$\frac{\delta_{\text{исп.}} - \nu}{D_{\text{вн}}} \leq 0,1. \quad (48)$$

Подставляя значения:

$$\frac{230 - 1,8}{2300} = 0,098 \leq 0,1.$$

Условие выполняется, следовательно, выбранные формулы применимы.

Расчет диаметра одиночного отверстия

Для определения максимального диаметра допустимого одиночного отверстия в стенке реактора используем формулу [11], [42], [43]:

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{\delta_{\text{исп.}} - \nu}{\delta_{\text{расч.}}} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_{\text{вн}} \cdot (\delta_{\text{исп.}} - \nu)}. \quad (49)$$

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{230 - 1,8}{159,119} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{2300 \cdot (230 - 1,8)} = 918,843 \text{ мм.}$$

Таким образом, максимальный диаметр одиночного отверстия, не требующий дополнительного усиления, составляет 918,843 мм.

Все результаты расчетов и принятые значения сведены в таблице 14.

Таблица 14 – Технические характеристики рассчитываемого реактора

Наименование	Ед. изм.	Значение
1	2	3
Материал обечайки	–	сталь 12Х18Н10Т
Внутренний диаметр реактора, $D_{\text{вн}}$	мм	2300
Допускаемое напряжение, $[\sigma]_t$ [14]	МПа	171
Давление расчетное, $P_{\text{расч.}}$	МПа	22
Прибавка на коррозию и эрозию, ν	мм	1,8
Коэффициент прочности цилиндрической стенки в продольном направлении, ϕ	–	1,0
Толщина стенки, $\delta_{\text{исп.}}$	мм	230

Результаты расчетов показывают, что реактор выдерживает рабочее давление 20 МПа с запасом прочности. Толщина стенки в 230 мм соответствует требованиям прочности, а условие внутреннего избыточного давления выполняется, что подтверждает соответствие конструкции реактора требованиям прочности и безопасности при оптимальном рабочем давлении.

2.5 Расчет и подбор дополнительного теплообменного оборудования

Для обеспечения подачи диоксида углерода в реактор синтеза карбамида при пониженной температуре был произведен инженерный расчет вспомогательного теплообменника. Этот аппарат предназначен для охлаждения дополнительного объема углекислоты, подаваемого в реактор синтеза карбамида, с использованием в качестве теплоносителя теплофикационной воды [21], [28], [32], [39], [49].

Исходные данные для проведения расчета представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Исходные данные для расчета теплообменника

Параметры CO ₂			
Расход продукта	G ₁	3198,988	кг/ч
Начальная температура	t _{1Н}	5	°С
Конечная температура	t _{1К}	45	°С
Давление	P ₁	2,5	ат
Коэффициент загрязнения	κ ₁	2800	Вт/м ² · К
Параметры конденсата			
Начальная температура	T _{2Н}	90	°С
Конечная температура	T _{2К}	80	°С
Давление	P ₂	3,5	ат
Коэффициент загрязнения	κ ₂	2400	Вт/м ² · К

Согласно схеме процесса теплопередачи [39]:

$$\frac{\begin{matrix} 5 \rightarrow 45 \\ 90 \rightarrow 80 \end{matrix}}{\Delta t_{\text{Б}}=85 \quad \Delta t_{\text{М}}=35}, \quad (50)$$

где: $\Delta t_{\text{Б}}$, $\Delta t_{\text{М}}$ – наибольшая и наименьшая разности температур в системе соответственно.

Вычислим среднюю логарифмическую разность температур [39]:

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{2,3 \cdot \lg\left(\frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}\right)}. \quad (51)$$

$$\Delta t_{CP} = \frac{85 - 35}{2,3 \cdot \lg\left(\frac{85}{35}\right)} = 56,412 \text{ }^{\circ}\text{C} = 329,412 \text{ }^{\circ}\text{K}.$$

Далее определим среднюю температуру углекислого газа [39]:

$$t_1 = \frac{t_{1K} + t_{1H}}{2}. \quad (52)$$

$$t_1 = \frac{45 + 5}{2} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C} = 298 \text{ }^{\circ}\text{K}.$$

Средняя температура теплоносителя рассчитывается как [28], [39]:

$$t_2 = t_1 + \Delta t_{CP}. \quad (53)$$

$$t_2 = 25 + 56,412 = 81,412 \text{ }^{\circ}\text{C} = 354,412 \text{ }^{\circ}\text{K}.$$

Теперь вычислим количество теплоты, необходимое для нагрева углекислого газа [39]:

$$Q_{CO_2} = \frac{G_1}{3600} \cdot C_1(t_{1K} - t_{1H}), \quad (54)$$

где $G_1 = 3198,988 \text{ кг/ч}$ – массовый расход CO_2 ; $C_1 = 2569 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$ – удельная теплоемкость CO_2 при t_1 [39]; $t_{1K} = 318 \text{ K}$; $t_{1H} = 278 \text{ K}$.

Подставляя значения, получаем:

$$Q_{CO_2} = \frac{3198,988}{3600} \cdot 2569 \cdot (318 - 278) = 91313,335 \text{ Вт}.$$

Далее рассчитываем расход теплоносителя [39]:

$$G_2 = \frac{Q_{CO_2}}{C_2 \cdot (t_{2H} - t_{2K})}, \quad (55)$$

где: $C_2 = 4230 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ – удельная теплоемкость теплоносителя при t_1 ;
 $t_{2H} = 363 \text{ К}$; $t_{2K} = 353 \text{ К}$ [39].

Получаем:

$$G_2 = \frac{91313,335}{4230 \cdot (363 - 353)} = 2,16 \text{ кг/сек.}$$

Максимальная площадь поверхности теплообмена определяется по формуле:

$$F_{MAX} = \frac{Q_{CO_2}}{K_{MIN} \cdot \Delta t_{CP}}, \quad (56)$$

где: $K_{MIN} = 70 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ – минимальный коэффициент теплопередачи при поперечном обтекании пучка труб воздухом [39].

$$F_{MAX} = \frac{91313,335}{70 \cdot 56,412} = 23,124 \text{ м}^2.$$

«Для данных условий подходит одноходовой кожухотрубчатый теплообменник с характеристиками, представленными в таблице 16.

Таблица 16 – Характеристика подбираемого теплообменника

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Диаметр кожуха аппарата, мм	D_A	426
Число труб, шт.	n	110
Площадь поперечного сечения в вырезе перегородки, м^2	$S_{СЖ}$	0,0246
Расстояние от диагонали до хорды сегмента, мм	h_1	66
Внутренний диаметр труб, м	$d_{ВН}$	0,018
Наружный диаметр труб, м	d_H	0,020
Шаг труб в трубной решетке, м	t	0,032
Длина труб, м	L	3
Толщина стенки труб, м	s	0,002
Коэффициент теплопроводности стали, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$	$\lambda_{СТ}$	46,5
Исполнение по материалу	—	M8

Площадь проходного сечения по трубам вычисляется следующим образом» [39], [59]:

$$S_T = n \cdot 0,785 \cdot d_H^2 . \quad (57)$$

где: $n = 110$ – число труб; $d_H = 0,02$ м – диаметр труб.

Получаем:

$$S_T = 110 \cdot 0,785 \cdot 0,02^2 = 0,0418 \text{ м}^2.$$

2.5.1 Расчет межтрубного пространства

«Размер стрелки сегмента определяется по формуле» [50]:

$$b = \frac{D_A}{2} - h_1 . \quad (58)$$

где $D_A = 426$ мм – внутренний диаметр аппарата; $h_1 = 6$ мм – высота сегмента.

$$b = \frac{426}{2} - 66 = 0,134 \text{ м}.$$

Расстояние между перегородками вычисляется по формуле [39]:

$$I = \frac{b}{1,415 \cdot \psi} , \quad (9)$$

где ψ – коэффициент, зависящий от диаметра и шага труб, рассчитывается как [28], [39]:

$$\psi = \frac{1 - \left(\frac{d_H}{t}\right)}{1 - 0,9 \cdot \left(\frac{d_H}{t}\right)^2} . \quad (60)$$

при $t = 32$ мм – шаг труб.

Подставляя значения:

$$\psi = \frac{1 - \left(\frac{0,02}{0,032}\right)}{1 - 0,9 \cdot \left(\frac{0,02}{0,032}\right)^2} = 0,544.$$

Тогда:

$$I = \frac{0,134}{1,415 \cdot 0,544} = 0,174 \text{ м.}$$

Объемный расход CO_2 в межтрубном пространстве определяется по формуле [28], [39]:

$$V_1 = \frac{G_1}{3600 \cdot \rho_1}, \quad (61)$$

где: $\rho_1 = 1,48 \text{ кг/м}^3$ – плотность CO_2 при рабочих условиях

$$V_1 = \frac{3198,988}{3600 \cdot 1,48} = 0,6 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Скорость движения CO_2 в межтрубном пространстве:

$$\omega_1 = \frac{V_1}{S_{\text{сж}}}. \quad (62)$$

где: $S_{\text{сж}} = 0,0246 \text{ м}^2$ – площадь сечения.

Тогда:

$$\omega_1 = \frac{0,6}{0,0246} = 24,39 \text{ м/с.}$$

Критерий Рейнольдса для CO_2 [28], [39]:

$$Re_1 = \frac{\omega_1 \cdot d_{\text{н}} \cdot \rho_1}{\mu_1}, \quad (63)$$

где $\mu_1 = 0,0000165 \text{ Па} \cdot \text{с}$ – динамическая вязкость CO_2 [39].

$$Re_1 = \frac{24,39 \cdot 0,02 \cdot 1,48}{0,0000165} = 43754,182.$$

Так как $Re_1 > 1000$, число Нуссельта для газа рассчитывается по формуле [39]:

$$N_{u_1} = 0,356 \cdot \varepsilon_\phi \cdot Re_1^{0,6}, \quad (64)$$

где $\varepsilon_\phi = 1$ – коэффициент, учитывающий угол атаки [39].

$$N_{u_1} = 0,356 \cdot 43754,182^{0,6} = 216,801.$$

Коэффициент теплоотдачи: [28], [39]:

$$a_1 = \frac{N_{u_1} \cdot \lambda_1}{d_H}, \quad (65)$$

где $\lambda_1 = 0,014$ Вт/м·К – теплопроводность CO₂ [28], [39].

$$a_1 = \frac{216,801 \cdot 0,014}{0,02} = 151,761 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

2.5.2 Расчет трубного пространства

Критерий Рейнольдса для теплоносителя:

$$Re_2 = \frac{\omega_2 \cdot d_{BH}}{\nu_2}, \quad (66)$$

$$\text{где: } \omega_2 = \frac{G_2}{S_T \cdot \rho_2} \text{ – скорость движения теплоносителя, м/с;} \quad (67)$$

$\rho_2 = 951$ кг/м³ – плотность теплоносителя [39];

$\nu_2 = 2,68 \cdot 10^{-7}$ м²/с – кинематическая вязкость.

Вычисляем скорость:

$$\omega_2 = \frac{2,16}{0,0418 \cdot 951} = 0,054 \text{ м/с.}$$

Тогда:

$$Re_2 = \frac{0,054 \cdot 0,018}{2,68 \cdot 10^{-7}} = 3626,866 < 10\,000.$$

Рассчитываем произведение $G_{r2} \cdot Pr_2$:

$$(Gr_2P_2) = \frac{d_{\text{ВН}}^3 \cdot \rho_2^2 \cdot \beta_2 \cdot \Delta t_2 \cdot 9,81}{\mu_2^2}, \quad (68)$$

где $\beta_2 = 6,95 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ – коэффициент объемного расширения;

« Δt_2 – разность температур. Так как при теплопередаче от жидкости к газу, коэффициент теплоотдачи от жидкости к стенке выше, чем от стенки к газу, Δt_2 рассчитывается по формуле» [38]:

$$\Delta t_2 = 0,15 \cdot \Delta t_{\text{СР}}. \quad (69)$$

$$\Delta t_2 = 0,15 \cdot 329,412 = 49,412 \text{ }^\circ\text{К}.$$

$\mu_2 = 0,000236 \text{ Па} \cdot \text{с}$ – динамическая вязкость.

$$(Gr_2P_2) = \frac{0,018^3 \cdot 951^2 \cdot 6,95 \cdot 10^{-4} \cdot 49,412 \cdot 9,81}{0,000236^2} = 31903680,541$$

Поскольку $Re_2 < 10000$, определяющая температура:

$$t = 0,5 \cdot (t_{\text{СТ.2}} + t_2), \quad (70)$$

где $\Delta t_{\text{СТ.2}}$ вычисляется:

$$\Delta t_{\text{СТ.2}} = t_2 + \Delta t_2. \quad (71)$$

$$\Delta t_{\text{СТ.2}} = 354,412 + 49,412 = 403,824 \text{ }^\circ\text{К}.$$

Учитывая, что температура теплоносителя $t_{\text{СТ.}}$ будет определена на завершающем этапе расчёта, предварительно примем значение Δt_2 , вычисленное согласно формуле (70).

Средняя температура определяется как:

$$t = 0,5 \cdot (403,824 + 354,412) = 379,118 \text{ }^\circ\text{К}.$$

Расчёт критериального числа осуществляется по выражению:

$$\left(Re_2 \cdot \frac{d_{BH}}{L} \right) = Re_2 \cdot Pr_2 \cdot \frac{d_{BH}}{L}, \quad (72)$$

где Pr_2 – число Прандтля для теплоносителя, равное 1,95 [54].

Подставляя значения, получаем:

$$\left(Re_2 \cdot \frac{d_{BH}}{L} \right) = 3626,866 \cdot 1,95 \cdot \frac{0,018}{3} = 42,434.$$

При $Re_2 > 3500$ и $(Gr_2 Pr_2) > 8 \cdot 10^5$ число Нуссельта для газов вычисляется по формуле [39]:

$$N_{u_2} = 0,37 \cdot Re_2^{0,75} \cdot Pr_2^{0,4} \cdot \left(\frac{\mu_2}{\mu_{CT,2}} \right)^{0,25}, \quad (73)$$

где $\mu_{CT,2} = 0,00029$ Па·с – динамическая вязкость теплоносителя при температуре $t_{CT,2} = 403,833$ °К.

Расчёт даёт:

$$N_{u_2} = 0,37 \cdot 3626,866^{0,75} \cdot 1,95^{0,4} \cdot \left(\frac{0,000236}{0,00029} \right)^{0,25} = 214,5328$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны теплоносителя вычисляется по аналогии с формулой (65):

$$a_2 = \frac{N_{u_2} \cdot \lambda_2}{d_{BH}}, \quad (74)$$

где $\lambda_2 = 0,685$ Вт/м·К – теплопроводность теплоносителя при $t = 379,126$ °К, [39].

Таким образом:

$$a_2 = \frac{21,45 \cdot 0,685}{0,018} = 816,416 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Коэффициент теплопередачи системы рассчитывается по формуле [39]:

$$\frac{1}{\sum r_{CT}} = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{s}{\lambda_{CT}} + \frac{1}{k_2}}. \quad (75)$$

Подставляя известные значения:

$$\frac{1}{\sum r_{CT}} = \frac{1}{\frac{1}{2800} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{1}{2400}} = 1223,979 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Общий коэффициент теплопередачи системы определяется выражением [39]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{\frac{1}{\sum r_{CT}}} + \frac{1}{a_2}}. \quad (76)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{151,761} + \frac{1}{1223,979} + \frac{1}{8164,165}} = 132,823 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Поверхностная плотность теплового потока определяется по формуле [39]:

$$q = K \cdot \Delta t_{CP}. \quad (77)$$

$$q = 132,823 \cdot 56,412 = 7492,811 \text{ Вт/м}^2.$$

Для корректировки значения Δt_2 используем формулу:

$$\Delta t_2 = \frac{q}{a_2}. \quad (78)$$

$$\Delta t_2 = \frac{7492,811}{816,416} = 9,178 \text{ }^\circ\text{К}.$$

После корректировки значение произведения $(Gr_2 P_2)$ согласно формуле (68) составляет:

$$(Gr_2 P_2) = \frac{0,018^3 \cdot 951^2 \cdot 6,95 \cdot 10^{-4} \cdot 5,359 \cdot 9,81}{0,000236^2} = 3460127,581$$

Определяющая температура вычисляется по формуле [39]:

$$t = t_2 + \frac{\Delta t}{2}. \quad (79)$$

$$t = 354,412 + \frac{5,359}{2} = 357,092^{\circ} \text{ К.}$$

Так как ранее было принято $t = 379,118^{\circ} \text{ К}$, можно сделать вывод о корректности выполненных расчётов для q .

2.5.3 Расчет поверхности теплообмена

Площадь поверхности теплообмена определяется по формуле [39]:

$$F = \frac{Q}{q}. \quad (80)$$

$$F = \frac{91313,335}{7492,811} = 12,187 \text{ м}^2.$$

Средний диаметр труб рассчитывается как:

$$d_{\text{CP}} = \frac{d_{\text{H}} + d_{\text{BH}}}{2}. \quad (81)$$

$$d_{\text{CP}} = \frac{0,02 + 0,018}{2} = 0,02 \text{ м.}$$

Поверхность теплообмена определяется по формуле [39]:

$$F = \pi \cdot d_{\text{CP}} \cdot n \cdot L. \quad (82)$$

где n – количество труб, L – их длина.

$$F = 3,14 \cdot 0,02 \cdot 110 \cdot 3 = 20,733 \text{ м}^2.$$

Запас площади поверхности теплообмена составляет:

$$\frac{20,733 - 12,187}{12,187} \cdot 100 \% = 70,124\% \%,$$

Таким образом, имеющийся запас поверхности является достаточным для эффективного теплообмена в технологическом оборудовании химического производства.

Учитывая превышение разности температур между кожухом и трубами более чем на 20 °С, целесообразно использовать теплообменник с U-образным трубным пучком типа ТУ. На основании данных из каталога «Аппараты теплообменные кожухотрубчатые с неподвижными трубными решётками и кожухотрубчатые с температурным компенсатором на кожухе» [59], был выбран вертикальный теплообменный аппарат типа 426ТУВ-2,5-2,5-М8/20-3-1, характеристики которого представлены ранее в таблице 16.

Таким образом, проведённые расчёты подтверждают эффективность выбранного оборудования для обеспечения оптимальных условий процесса синтеза карбамида.

2.6 Анализ опасных и вредных факторов на объектах химического производства

Аммиак, представляющий собой бесцветный газ с резким характерным запахом, является одним из ключевых веществ, используемых в химической промышленности. Его физико-химические параметры включают температуру плавления $-77,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, кипения $-38,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и плотность $0,59\text{ г/м}^3$. Несмотря на свою широкую распространённость, аммиак обладает высокой токсичностью, оказывая раздражающее воздействие преимущественно на верхние дыхательные пути. В высоких концентрациях он способен вызывать возбуждение центральной нервной системы, судорожные состояния, обильное слезотечение, болевые ощущения в области глаз, желудка, а также симптомы удушья. При попадании на кожу наблюдаются покраснение и раздражение, а контакт с глазами может привести к серьёзным травмам, вплоть до потери зрения. Согласно установленным нормам, предельно допустимая концентрация аммиака в воздухе рабочих зон составляет 20 мг/м^3 .

В случае контакта с аммиачной водой необходимо оперативное промывание глаз чистой водой и нанесение защитных средств, таких как вазелиновое или оливковое масло. «При попадании аммиака на кожу

рекомендуется ее тщательное обмывание водой. В ситуациях отравления аммиаком через дыхательные пути необходимо обеспечить пострадавшему доступ к свежему воздуху, ингаляцию теплого пара (желательно с добавлением уксуса) и прием теплого молока с содой. Средства индивидуальной защиты включают фильтрующие противогазы марок К или КДМ, специальную защитную одежду, резиновые перчатки и герметичные очки. Для предотвращения утечек требуется герметизация аппаратуры, а емкости с аммиаком должны подвергаться тщательной очистке и проветриванию перед осмотром или ремонтом» [29].

Двуокись углерода – инертный, бесцветный и без запаха газ, обладающий наркотическим воздействием при высоких концентрациях из-за вытеснения кислорода из дыхательной среды. Для защиты используются изолирующие противогазы. Азот, также являющийся физиологически инертным газом, может вызывать асфиксию при недостатке кислорода, что требует применения аналогичных средств защиты.

Карбамид представляет собой твердое вещество, не обладающее запахом и относящееся к нетоксичным веществам, но способное вызывать раздражение кожи. «Для работы с ним рекомендуется использование хлопчатобумажной спецодежды, закрытых защитных очков, брезентовых рукавиц и респираторов типа У-2К» [30]. Карбамидо-формальдегидная смола в жидком виде может выделять пары, раздражающие слизистые оболочки и кожу, что требует использования противогазов марки А, резиновых перчаток и защитной одежды [35], [44].

Экологические меры при производстве карбамида

Технологический процесс получения карбамида представляет собой многоступенчатую цепочку, включающую сложные системы агрегатов, аппаратов и вспомогательных узлов. «В ходе производства образуются газообразные выбросы, сточные воды и твердые отходы, что требует внедрения комплекса мероприятий по снижению их воздействия на окружающую среду» [35].

Для минимизации выбросов аммиака и карбамида в атмосферу используется система мокрой очистки воздуха из грануляционных башен. «В аварийных ситуациях выбросы предотвращаются посредством санитарных свеч высотой 80 метров, а также наличием аварийных сборников жидкого аммиака. Очистка сточных вод производится локальными установками, которые обеспечивают эффективное удаление загрязняющих веществ как в штатном режиме работы оборудования, так и в процессе его ремонта» [44].

Твердые отходы производства включают отработанный силикагель с систем осушки воздуха и некондиционный карбамид. «Последний перерабатывается и может быть использован в качестве минеральных удобрений, реализуемых по сниженной стоимости. Таким образом, комплексный подход к природоохранным мероприятиям позволяет не только минимизировать экологический след, но и повысить экономическую эффективность производства» [30].

Выводы по разделу 2

Анализ работы реактора синтеза карбамида выявил оптимальные значения температуры и давления, обеспечивающие максимальную производительность. Расчеты материального баланса подтвердили стабильность процесса и высокую конверсию CO_2 (55,88 %) с нулевым отклонением. Тепловой баланс продемонстрировал корректность расчетов и сбалансированность тепловых потоков, что позволяет минимизировать потери энергии.

Прочностной анализ показал, что реактор выдерживает рабочее давление 20 МПа при толщине стенки 230 мм, полностью соответствуя требованиям безопасности. Для охлаждения дополнительного CO_2 был подобран вспомогательный теплообменник, что вместе с технологическими усовершенствованиями позволяет увеличить производительность на 33,6 т/сутки. Эти решения повышают эффективность и надежность производства карбамида.

Заключение

В результате проведенного исследования, основанного на анализе термодинамических, кинетических и гидродинамических характеристик действующего реактора установлено, что температура 170 °С и давление 20 МПа являются наиболее подходящими для достижения высокой производительности реактора.

Расчеты материального баланса подтвердили стабильность его работы при указанных параметрах, обеспечивая высокий уровень конверсии углекислого газа (55,88 %) и точность расчетных данных без отклонений. Эти результаты предоставляют возможность оптимизации технологического процесса, направленной на минимизацию потерь реагентов и повышение производительности.

На основе выявленных значений давления был выполнен прочностной анализ существующего реактора. Расчеты подтвердили его способность надежно функционировать при повышенном расчетном давлении до 22 МПа, что соответствует современным требованиям безопасности и эксплуатационной надежности.

Для обеспечения эффективного охлаждения дополнительного объема углекислого газа, вводимого в реактор, был проведен расчет и выбран вспомогательный теплообменник, адаптированный для интеграции в текущую технологическую схему синтеза карбамида.

Предложенные технологические и конструктивные решения, основанные на выполненных расчетах, позволяют увеличить производительность технологической линии на 11244 тонны карбамида в год, что повышают экономическую эффективность производства за счет сокращения энерго- и ресурсозатрат на единицу продукции, при соответствии установленным экологическим нормам производства.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Ануфриенко, А.Л. Процессы и аппараты химической технологии. Массообменные процессы : учебное пособие / А.Л. Ануфриенко, В.С. Калекин. – Омск : ОмГТУ, 2017. – 105 с. – ISBN 978-5-8149-2378-3. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/149055> (дата обращения: 29.04.2022).
2. Арис, Р. Анализ процессов в химических реакторах [Текст] : научное издание / Р. Арис ; пер. Л. М. Письмен ; ред. пер И. И. Иоффе. Ленинград : Химия, 1967. 328 с. : ил.
3. Афанасьев, Н.Д. Процессы и аппараты химической технологии : лаб. практикум / Н.Д. Афанасьев; ТГУ ; каф. «Машины и аппараты хим. и пищевых производств и предприятий строит. материалов». – ТГУ. – Тольятти : ТГУ, 2007. - 66 с. : ил.
4. Афанасьев, Н.Д. Процессы и аппараты химической технологии : учеб.-метод. пособие по выполнению курсового проекта / Н. Д. Афанасьев; ТГУ ; каф. «Машины и аппараты химических и пищевых производств и предприятий строит. материалов». - ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2007. - 20 с.
5. Брайнес, Я.М. Введение в теорию и расчеты химических и нефтехимических реакторов / Я.М. Брайнес – Л.: Химия, 1976, - 231с.
6. Борисов Г. С., Брыков В. П., Дытнерский Ю. И. и др. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию. Под ред. Ю. И. Дытнерского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1991. 496 с.: ил.
7. Беремжанов Б.А., Нурахметов Н.Н., Нурлыбаев И.Н. //Журн. Прикладной и теоретической химии. Алма-Ата, 1971. Вып. 3.
8. Баранов, Д.А. Процессы и аппараты химической технологии : учебное пособие / Д.А. Баранов. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 408 с. – ISBN 978-5-8114-4984-2. – Текст : электронный // Лань :

электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/130186> (дата обращения: 05.05.2022).

9. Белозерова, О.В. Химия нефти и газа : учебное пособие / О.В. Белозерова. – Иркутск : ИРНИТУ, 2019. – 126 с. – ISBN 978-5-8038-1416-0. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/216995> (дата обращения: 29.03.2022).

10. Виriskун Н.В. Исследование некоторых физико-химических свойств сложных удобрений типа НК (карбамид - калий хлор): Сб. трудов общероссийской научно-технич. конф. «Новые технологии в азотной промышленности», 2003.

11. Вязьмин, А.В. Расчеты химико-технологических процессов: теория и практика : учебно-методическое пособие / А.В. Вязьмин, Ю.Г. Пикулин. – Москва : РТУ МИРЭА, 2019. – 77 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/171501> (дата обращения: 13.04.2022).

12. Гужель, Ю.А. Процессы и аппараты химической технологии. Ч. 3. Массообменные процессы и аппараты : учебное пособие для СПО / Ю.А. Гужель. – Саратов : Профобразование, 2021. – 144 с. – ISBN 978-5-4488-1148-7 (ч. 3), 978-5-4488-1167-8. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/105154.html> (дата обращения: 10.04.2022).

13. ГОСТ 2081-2010 Карбамид. Технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 2081-92; Введ. с 01.03.2011. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 19 с.

14. ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность [Текст]. – Взамен ГОСТ 14249-80; Введ. с 01.01.1990. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 53 с.

15. ГОСТ 22161-76. Машины, механизмы, паровые котлы, сосуды и аппараты судовые. Нормы и правила гидравлических и воздушных испытаний. [Текст]. – Переизд. Март 1986 с изм. 1,2,3,4. – Взамен ГОСТ 1999-

60, ГОСТ 2029-70, ГОСТ 7718-55 кроме двигателей внутреннего сгорания ;
введ. 01.01.78. – М : Изд-во стандартов, 1986. – 16 с.

16. ГОСТ 25822-83 (СТ СЭВ 3649-82) Сосуды и аппараты. Аппараты
воздушного охлаждения. Нормы и методы расчета на прочность [Текст]. –
Введ. 01.01.84. – М : Изд-во стандартов, 1983. – 19 с.

17. ГОСТ 26303-84 (СТ СЭВ 4350-83). Сосуды и аппараты. высокого
давления. Шпильки. Методы расчета на прочность [Текст]. – Введ. 01.07.85. –
М : Изд-во стандартов, 1985. – 10 с.

18. ГОСТ 25859-83 (СТ СЭВ 3648-82), Сосуды и аппараты стальные.
Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках [Текст].
– Введ. с 01.07.1984. – М : Изд-во стандартов, 2008. – 30 с.

19. Громов, П.Б. Процессы и аппараты химической технологии. Краткий
курс : учебное пособие / П.Б. Громов. – Мурманск : МГТУ, 2017. – 222 с. –
ISBN 978-5-86185-924-0. – Текст : электронный // Лань : электронно-
библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/142674> (дата
обращения: 29.04.2022).

20. Дюкова, И.Н. Термодинамический цикл теплофикационной
паросиловой установки : учебное пособие / И.Н. Дюкова. – Санкт-Петербург :
СПбГЛТУ, 2018. – 80 с. – ISBN 978-5-9239-1040-7. – Текст : электронный //
Лань : электронно-библиотечная система. – URL:
<https://e.lanbook.com/book/111125> (дата обращения: 13.04.2022).

21. Золотоносов, Я.Д. Трубчатые теплообменники. Моделирование,
расчет : монография / Я.Д. Золотоносов, А.Г. Багоутдинова, А.Я. Золотоносов.
– Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 272 с. – ISBN 978-5-8114-3411-4. – Текст :
электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL:
<https://e.lanbook.com/book/213233> (дата обращения: 29.03.2022).

22. Исляйкин, М.К. Теория химико-технологических процессов
органического синтеза. Материальные расчеты, термодинамика, кинетика и
катализ органических реакций : учебное пособие / М.К. Исляйкин. – Иваново
: ИГХТУ, 2018. – 137 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-

библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/127515> (дата обращения: 11.05.2022).

23. Корытцева, А.К. Химические реакторы. Введение в теорию и практику : учебное пособие / А.К. Корытцева, В.И. Петьков. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 112 с. – ISBN 978-5-8114-3501-2. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/206207> (дата обращения: 10.04.2022).

24. Классификация и конструкция реакторов, применяемых в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности : учебно-методическое пособие / Х.Х. Ахмадова, Ж.Т. Хадисова, Э.У. Идрисова [и др.]. – Грозный : ГГНТУ, 2021. – 208 с. – ISBN 978-5-6047711-4-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/222851> (дата обращения: 02.03.2022).

25. Козадерова, О.А. Расчеты материальных и тепловых балансов в технологии минеральных удобрений : учебное пособие / О.А. Козадерова, С.И. Нифталиев. – Воронеж : ВГУИТ, 2018. – 55 с. – ISBN 978-5-00032-318-2. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/106901> (дата обращения: 13.04.2022).

26. Лащинский А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры : справочник / А. А. Лащинский, А. Р. Толчинский; под ред. Н. Н. Логинова. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - Ленинград : Машиностроение, 1970. - 752 с.

27. Мочевина (карбамид): обзор мирового рынка 2024 г. и прогноз до 2033 г. / MarketPublishers.ru. — М.: Market Publishers, 2024. — 240 с. — ISBN 978-5-00000-000-0.

28. Некрасов, Д.А. Тепловые процессы. Теплопроводность материалов : учебное пособие / Д.А. Некрасов, Н.С. Захаров. – Москва : РТУ МИРЭА, 2021. – 70 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/226595> (дата обращения: 29.03.2022).

29. Нормы пожарной безопасности : Пожарная техника. Огнетушители. Требования к эксплуатации : НПБ 166-97 : дата введения 01.03.98. - Москва : ВЦОПТ, 1999. - 16 с.

30. НПБ 10105-2003 Нормы пожарной безопасности. Определение категорий наружных установок по пожарной опасности.

31. Орлов, Ю.Н. Процессы и аппараты в химической технологии и биотехнологии: практикум : учебное пособие / Ю.Н. Орлов. – Тольятти : ТГУ, 2021. – 94 с. – ISBN 978-5-8259-1514-2. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/172629> (дата обращения: 11.05.2022).

32. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – Л.: Химия, 1987, – 576 с.

33. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник / В.М. Потехин, В.В. Потехин. – 3-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 896 с. – ISBN 978-5-8114-1662-2. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/211751> (дата обращения: 13.04.2022).

34. Попов, Ю.В. Химические реакторы (теория химических процессов и расчет реакторов) : учебное пособие / Ю.В. Попов, Т.К. Корчагина, В.С. Лобасенко. – 2-е изд., перераб. и доп. — Волгоград : ВолгГТУ, 2017. – 240 с. – ISBN 978-5-9948-2027-8. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/157211> (дата обращения: 11.05.2022).

35. ПБ 09 –540-03. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожарных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств, – М.: Госгортехнадзор России, 2003. - 108 с.

36. Постоянный технологический регламент ТР-4 производства гранулированного карбамида цеха №4. Том 1.

37. Постоянный технологический регламент ТР-4 производства гранулированного карбамида цеха №4. Том 2.

38. Разинов, А.И. Процессы и аппараты химической технологии / А.И. Разинов, А.В. Клинов, Г.С. Дьяконов. – 3-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 688 с. – ISBN 978-5-507-44090-0. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/214823> (дата обращения: 05.05.2022).

39. Расчет и проектирование теплообменников : учебное пособие для вузов / А.Н. Остриков, И.Н. Болгова, Е.Ю. Желтоухова [и др.] ; Под редакцией профессора А. Н. Острикова. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 372 с. – ISBN 978-5-8114-7769-2. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/180777> (дата обращения: 02.03.2022).

40. Расчет основных процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие / О.П. Банных, Е.И. Борисова, В.А. Константинов [и др.]. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2017. – 82 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/110440> (дата обращения: 13.05.2022).

41. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии : учебное пособие / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. – Санкт-Петербург : ХИМИЗДАТ, 2020. – 440 с. – ISBN 978-5-93808-289-2. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/67361.html> (дата обращения: 13.04.2022).

42. РД 26-15-88. Нормы и методы расчета на прочность и герметичность фланцевых соединений. [Текст]. – Взамен ОСТ 26-373-78, ОСТ 26-01-396-78, ОСТ 26-01-54-77; Введ. с 07.01.1989. – Москва: ВНИИНефтеМаш, 1988. – 72 с.

43. РД 26-14-88. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Элементы теплообменных аппаратов. [Текст]. – Взамен ОСТ 26-1185-81; Введ. с 07.01.1989. – Москва: ВНИИНефтеМаш, 1988. – 68 с.

44. Розловский А. И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами / А. И. Розловский. - Москва : Химия, 1972. - 364 с. : ил.

45. Соловьева, Е.Б. Методы расчета процессов массо- и теплообмена : учебно-методическое пособие / Е.Б. Соловьева, А.А. Малышева. – Москва : МИСИ-МГСУ, ЭБС АСВ, 2020. – 42 с. – ISBN 978-5-7264-2138-4. – Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/99739.html> (дата обращения: 29.04.2022).

46. Сахин, В.В. Теплообмен при фазовых превращениях теплоносителей (теплопередача) : учебное пособие / В.В. Сахин. – Санкт-Петербург : БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2018. – 123 с. – ISBN 978-5-906920-95-9. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/122089> (дата обращения: 29.04.2022).

47. Справочник азотчика / [авт. коллектив М. М. Караваев и др.]. - 2-е изд., перераб. - Москва : Химия, 1987. - 455 с. : ил.

48. Семакина, О.К. Технология химического машиностроения : учебное пособие / О.К. Семакина. – Томск : ТПУ, 2017. – 144 с. – ISBN 978-5-4387-0766-0. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/106771> (дата обращения: 14.04.2022).

49. Теоретические основы теплотехники : методические указания / составители Е.Е. Корочкина [и др.] ; под редакцией Т.Е. Созиновой. – Иваново : ИГЭУ, 2020. – 40 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/183947> (дата обращения: 13.04.2022).

50. Теплообмен: теория и практика : учебник / В.В. Карнаух, А.Б. Бирюков, С.И. Гинкул [и др.]. – Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 332 с. – ISBN 978-5-9729-0702-1. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/114977.html> (дата обращения: 29.03.2022).

51. Технология основного органического и нефтехимического синтеза : учебное пособие : в 3 частях / Р.Б. Султанова, Р.Р. Рахматуллин, В.М. Бабаев, В.Ф. Николаев. – Казань : КНИТУ, [б. г.]. – Часть 3 – 2017. – 128 с. – ISBN 978-5-7882-1609-6. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/102106> (дата обращения: 02.03.2022).

52. Теория химико-технологических процессов органического синтеза. Определение констант ионизации органических соединений и констант скорости химических реакций : учебное пособие / А.С. Косицына, П.О. Краснов, А.А. Кукушкин, М.С. Товбис. – Красноярск : СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева, 2018. – 80 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/147470> (дата обращения: 13.04.2022).

53. ТУ 3612-024-00220302-02. Аппараты теплообменные кожухотрубчатые с неподвижными трубными решетками и кожухотрубчатые с температурным компенсатором на кожухе. [Текст]. – Взамен ТУ 26-02-925-81, ТУ 26-02-1090-88 ; Введ. с 01.01.2003. – Москва: ВНИИНефтеМаш, 2002. – 112 с.

54. Химические реакторы : учебное пособие / В.Ю. Долуда, А.В. Быков, М.Е. Григорьев [и др.]. – Тверь : ТвГТУ, 2019. – 160 с. – ISBN 978-5-7995-1061-9. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/171336> (дата обращения: 29.04.2022).(40)

55. Bornhorst, M. Advances and challenges of ammonia delivery by urea-water sprays in SCR systems / M. Bornhorst, O. Deutschmann // Progress in Energy and Combustion Science. – 87 (2021) 100949 – P. 1-36.

56. Carmen Llana. The application of casein phosphopeptide and amorphous calcium phosphate with fluoride (CPP-ACPF) for restoring mineral loss after dental bleaching with hydrogen or carbamide peroxide: An in vitro study / Llana Carmen [et al.] // Annals of Anatomy-Anatomischer Anzeiger. – Volume 225, September 2019, Pages 48-53.

57. Fadi, A. Effect of carbamide peroxide bleaching on enamel characteristics and susceptibility to further discoloration / A. Fadi [et al.] // The Journal of Prosthetic Dentistry. – Volume 121, Issue 2, February 2019, Pages 340-346.

58. Lieber C, Koch R, Bauer H-J. Microscopic Imaging Spray Diagnostics under High Temperature Conditions: Application to Urea–Water Sprays. Applied Sciences 2019;9(20):4403.

59. Sarma, P. Adoption and impact of super granulated urea (guti urea) technology on farm productivity in Bangladesh: A Heckman two-stage model approach / P. Sarma // Environmental Challenges. – Volume 5, December 2021, 100228.

60. Tengfei Lyu. Hybrid rice yield response to potted-seedling machine transplanting and slow-release nitrogen fertilizer application combined with urea topdressing / Lyu Tengfei [et al.] // The Crop Journal. – Volume 9, Issue 4, August 2021, Pages 915-923.