

Казанский Федеральный Университет

Кафедра технологии нефти газа и углеродных материалов

Kazan Federal University,

Department of Oil gas and carbon materials technology

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ КЛАУСА. Практикум по

**дисциплине: «Процессы и аппараты нефте- и газохимической
переработки»**

**SIMULATION OF THE KLAUS INSTALLATION. A workshop on the
discipline: "Processes and devices of oil and gas chemical processing".**

Нуруллин Арслан Рафаэлевич, Nurullin Arslan Rafaelevich¹

Кемалов Руслан Алимович, Kemalov Ruslan Alimovich²

Кемалов Алим Фейзрахманович, Kemalov Alim Feizrahmanovich

магистрант кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов¹

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии нефти, газа и углеродных
материалов, Член Экспертного совета Российского газового общества (РГО),

и.о. руководителя группы «Водородная и альтернативная РГО, профессор РАЕ²
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии нефти, газа и
углеродных материалов, академик РАЕН

E-mail: arsil9898@mail.ru, kemalov@mail.ru, alim.kemalov@mail.ru

Аннотация: в материале проанализированы назначение и краткая характеристика и физико-химические основы процессов утилизации сероводородсодержащих газов и производства серы: термическая стадия, каталитическая стадия, очистка хвостовых газов, дегазация серы, грануляция серы. Изучена технологическая эффективность рассматриваемых процессов, проведено в технологической части отчета описание технологической схемы установки производства серы, характеристика готовой продукции, технологический расчет действующей установки Клауса.

Ключевые слова: физико-химические основы процессов утилизации сероводородсодержащих газов и производства серы, термическая стадия, каталитическая стадия, очистка хвостовых газов, дегазация серы, грануляция серы, технологическая эффективность рассматриваемых процессов, описание

технологической схемы установки производства серы, характеристика готовой продукции, технологический расчет действующей установки Клауса.

Abstract: the article analyzes the purpose and brief characteristics and physico-chemical bases of the processes of utilization of hydrogen sulfide-containing gases and sulfur production: thermal stage, catalytic stage, purification of tail gases, sulfur degassing, sulfur granulation. The technological efficiency of the processes under consideration has been studied, a description of the technological scheme of the sulfur production plant, characteristics of finished products, and technological calculation of the current Klaus installation have been carried out in the technological part of the report.

Keywords: physico-chemical bases of the processes of utilization of hydrogen sulfide-containing gases and sulfur production, thermal stage, catalytic stage, purification of tail gases, sulfur degassing, sulfur granulation, technological efficiency of the processes under consideration, description of the technological scheme of the sulfur production plant, characteristics of finished products, technological calculation of the operating Klaus installation.

Введение (Introduction)

В настоящее время основными производителями серы являются газоперерабатывающие заводы (ГПЗ), нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) и нефтегазохимические комплексы (НГХК). Сера на этих предприятиях производится из кислых газов, образующихся при аминовой очистке высокосернистого углеводородного сырья. Подавляющее количество газовой серы выпускается по известному методу Клауса. Этот процесс, основанный на окислении сероводорода до серы, назван по имени известного английского химика Карла Фридриха Клауса, который запатентовал его в 1883 году. Для производства серы используются различные модификации процесса Клауса [1].

Всего за 2016 год в России было произведено 841,3 тыс. т серы из нефтяного сырья и 5213,2 тыс. т из газового. Доля серы, произведенной на ГПЗ, составляет 87–93%, на НПЗ и НГХК – 6–12%, природной серы – 1–2% .

Перечень российских ГПЗ, НПЗ и НГХК, производящих серу, с указанием товарных форм выпускаемой серы и наличия на них методов доочистки отходящих газов представлены в табл.1.

Крупнейшими производителями серы на территории Российской Федерации являются предприятия ПАО

«Газпром» – Астраханский и Оренбургский ГПЗ, чья доля составляет около 89%. Оставшиеся 11% распределены между ПАО «НК «Роснефть», ПАО «ЛУКОЙЛ», ОАО «Сургутнефтегаз» и другими компаниями.

Из данных, представленных в табл. 1–3, видно, какие виды товарной серы выпускают сегодня российские предприятия, производящие серу. Астраханский и Оренбургский ГПЗ – основные производители серы в России значительно сократили производство комовой серы, которая в течение многих лет была единственной товарной формой серы этих предприятий, планируется выпуск молотой и модифицированной (СМВ) серы. На других ГПЗ, за исключением Миннибаевского (выпускает гранулированную серу), производят комовую серу. Следует отметить, что эти заводы, входящие в состав ПАО «НК «Роснефть», имеют установки Клауса низкой производительности.

Другая картина наблюдается для российских нефтеперерабатывающих заводов: 7 из 16 НПЗ выпускают гранулированную и жидкую серу наряду с небольшим количеством комовой или без нее, 4 – только гранулированную, 5 – только комовую. И эти различия никак не связаны с производительностью установок Клауса [1].

Таблица 1 - Нефтеперерабатывающие заводы России, производящие серу

Название предприятия (компания)	Процес с Клауса, пр–во серы, тыс. т/год	Процессы доочистки	Товарные формы серы
1. Антипинский НПЗ (Группа компаний «Новый поток» – New Stream Group)	13,2	Аминовая доочистка	Гранулированная
2. Афипский НПЗ	10	СуперКлаус	Жидкая, комовая,

(ООО «НефтеГазИндустрия»)			гранулированная
Ачинский НПЗ (ПАО-НК Роснефть)	7	Аминовая доочистка (45% МДЭА)	Гранулированная
4. Волгоградский НПЗ (ПАО «ЛУКОЙЛ»)	44	Аминовая доочистка	Жидкая, комовая, гранулированная
5. Комсомольский НПЗ	13	Отсутствует	Жидкая, гранулированная
6. Куйбышевский НПЗ	н/д	Отсутствует	Гранулированная
7. Московский НПЗ (ПАО «Газпром»)	94	SCOT	Жидкая, комовая, гранулированная
8. Ново–Уфимский НПЗ	н/д	Блок прямого окисления	Жидкая, комовая, гранулированная
9. Новокуйбышевский НПЗ	н/д	Beavon+S COT	Жидкая, комовая, гранулированная
10. Омский НПЗ (ПАО «Газпром»)	н/д	Аминовая доочистка	Жидкая, комовая, гранулированная
11. Рязанская н/п компания	110	LT–SCOT	Комовая, серная кислота
12. Саратовский НПЗ	70	Отсутствует	Комовая
13. Сызранский НПЗ	90	Аминовая доочистка	Комовая
14. Туапсинский НПЗ	н/д	Отсутствует	Гранулированная
15. Уфимский НПЗ (ПАО «НК «Роснефть»)	н/д	Аминовая доочистка	Комовая
н/д			
16. Ухтинский НПЗ (ПАО «ЛУКОЙЛ»)	н/д	Аминовая доочистка	Комовая

Цель работы – изучить принцип действия установки Клауса

В работе были проанализированы требования к исходному сырью и готовой продукции. Проведен расчет материальных

Сера и ее соединения играют важную роль в природе и хозяйственной деятельности человека. Большая часть серы производится на установках Клауса. При работе установок, работающих по методу Клауса, возникают проблемы: сложно поддерживать процесс на полном уровне конверсии в промышленных условиях, так как эксплуатировать те установки, при работе которых отмечаются пределы выбросов вредных веществ в атмосферу больше допустимого значения, запрещено; на большом количестве установок нет доочистки отходящих газов и технологический режим не соблюдается надлежащим образом; требуется улучшение качества товарного продукта. Именно поэтому процесс Клауса нуждается в постоянной модернизации и поиске новых способов усовершенствования.

1.1 Назначение и краткая характеристика процесса

Процесс Клауса – процесс, состоящий в каталитической окислительной конверсии сероводорода. На сегодняшний день применяются всевозможные видоизменения процесса Клауса, на основе процесса в мире построено около ста установок, их производительность достигает 300 тысяч тонн серы в год. На установках Клауса перерабатывается сероводород с разнообразным содержанием вредных примесей и углеводородов [1].

Установки Клауса, именуемые установками получения элементарной серы, являются необходимыми звеньями нефтеперерабатывающего производства, потому как извлечение серы из светлых нефтепродуктов определено экологическими требованиями: по уменьшению токсичности моторных топлив и по понижению выбросов оксидов серы в воздух. Современные проекты реконструкции нефтеперерабатывающих и газоперерабатывающих предприятий не обходятся без строительства или глубокой модернизации установок Клауса, эти установки охватывают типовой процесс Клауса и сравнительно денежно затратные процессы доочистки хвостовых газов, что разрешает проблему с выбросами оксидов серы [2].

Процесс Клауса является наиболее важным процессом десульфурации газа для извлечения элементарной серы из сероводородного газа. Запатентованный впервые в 1883 году Карлом Фридрихом Клаусом процесс Клауса стал промышленным стандартом.

Продуктом установки Клауса является молекулярная сера. Сера – твердое кристаллическое вещество, минерал лимонно-желтого представляет собой молекулярную серу – S, минерал очень хрупкий, твердость 1-2 [3].

Сера и ее соединения существуют в твердом, жидком и газообразном состоянии. Сера образует несколько десятков как кристаллических, так и аморфных модификаций, отличающихся составом молекул и полимерных цепей, способом их упаковки и некоторыми свойствами. Наиболее известны три аллотропных видоизменения серы: сера ромбическая, моноклинная, пластическая.

Основными потребителями серы являются заводы по производству минеральных удобрений и химическая промышленность. Более половины добываемой в мире серы идет на производство серной кислоты, роль которой в химической промышленности огромна – она сравнима с ролью хлеба в нашем питании. Сера входит в состав простых и сложных минеральных удобрений, препаратов для борьбы с вредителями и др. Сера используется на производстве тканей, лекарств, косметики, пластмасс, взрывчатки и красок.

Главными производителями элементарной серы являются газоперерабатывающие заводы (ГПЗ), нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) и нефтегазохимические комплексы (НГХК). Серу на этих предприятиях извлекают из кислых газов, образующихся при абсорбции высокосернистого углеводородного сырья. Значительная доля газовой серы изготавливается по известному методу Клауса [4].

1.2 Физико-химические основы процесса

Суть процесса Клауса заключается в превращении сероводородного газа в серу окислительным методом с применением двух-трех каталитических ступеней.

На производстве используются четыре основных процесса Клауса для производства элементарной серы из кислых компонентов природного газа и нефтезаводских газов:

1. Прямоточный процесс Клауса используется при концентрации сероводорода в кислом газе больше 50 % по объему и концентрации углеводородов менее 2 % по объему. Основан на неполном окислении сероводорода кислого газа сжиганием его в недостаточном для полного сгорания объеме воздуха. В топке термического реактора может образоваться до 75 % серы, содержащейся в сероводороде исходного газа, последующее извлечение серы проводят на катализаторе в каталитических ступенях и, если это необходимо, на установке очистки отходящих газов.

Степень конверсии сероводорода в серу при применении этого метода зависит от концентрации сероводорода в кислом газе и составляет от 95 до 96 % для схемы с двумя каталитическими ступенями, от 97 % до 98 % для трехступенчатой схемы.

2. Извлечение серы методом «1/3 – 2/3». Процесс применяют при концентрации сероводорода в кислом газе от 20 % до 45 %. Сущность процесса состоит в том, что долю кислого газа (до 2/3 от всего количества) байпасируют мимо термического реактора прямо в каталитический реактор, оставшийся кислый газ сжигается в термическом реакторе в условиях, обеспечивающих глубокое сгорание сероводорода, сера образуется исключительно в каталитических ступенях, которых может быть несколько.

3. Разветвленный процесс Клауса («1/3 – 2/3») с предварительным подогревом кислого газа и (или) воздуха. Процесс применяется при содержании сероводорода в кислом газе от 20 % до 30 %, когда при применении предыдущей схемы наименьшая возможная температура в топке печи-реактора (930 °С) не достигается.

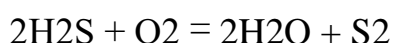
4. Процесс «прямого окисления» сероводорода на катализаторе в элементарную серу. Сущность процесса содержится в проведении реакции взаимодействия сероводорода с кислородом воздуха на специальном катализаторе, процесс используют при концентрации сероводорода в кислом

газе от 0,1 % до 9 %. В случае низких концентраций сероводорода – до 3 % – процесс проводят в 1 стадию, при увеличении концентрации количество ступеней нужно повысить. Обычно, степень конверсии сероводорода в серу на установке прямого окисления без доочистки хвостовых газов не превосходит 86 % [4, 5].

Производство серы на установках Клауса происходит в две стадии: термическую и каталитическую.

1.2.1 Термическая стадия

Процесс термического окисления идет в основной реакционной печи, смонтированной в одном агрегате с котлом-утилизатором. Реакционная печь является главным элементом оборудования в процессе Клауса. На термической ступени установки Клауса, чем больше температура, тем выше степень конверсии сероводорода в серу. В печи-реакторе наилучшая температура от 1100 °С до 1300 °С, в этом температурном интервале степень конверсии максимальна, а объемы образующихся по побочным реакциям COS и CS₂ малы. Термическая стадия заключается в высокотемпературном сжигании сероводорода в топке котлаутилизатора при подаче стехиометрического количества воздуха по реакции [6]:



В топочной части печи протекают целевые реакции [7]:



Продукты сгорания охлаждаются в котле-утилизаторе и конденсаторе серы, пар поднимается на паровой барабан, объединенный с котлом-утилизатором. Более 60 % серы конвертируется в термической секции установки Клауса.

Существенная доля горячего газа из камеры сгорания проходит через трубу охладителя технологического газа и остужается так, что образующаяся на стадии реакции сера конденсируется. Тепло, выделяемое технологическим газом, и выделяющееся тепло конденсации применяется для образования пара среднего или низкого давления, жидкая сера удаляется в секции конденсатора и

самотеком попадает в резервуар для хранения серы. В этом месте она поддерживается в расплавленном состоянии при температуре около 140 °С паровыми змеевиками, далее накопленная сера перекачивается на грузовые или железнодорожные вагоны для отправки потребителю.

1.2.2 Каталитическая стадия

Каталитическое восстановление серы заключается в трех технологических операциях: нагрев, каталитическая реакция, охлаждение и конденсация, эти операции, как правило, повторяются максимум три раза.

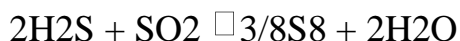
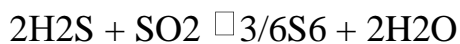
Начальная технологическая стадия в каталитической стадии – это процесс нагрева газа. Нужно предупредить конденсацию серы в слое катализатора, что возможно приведет к его загрязнению. Оптимальной рабочей температуры слоя в некоторых каталитических стадиях добиваются нагреванием технологического газа в печах подогрева до получения требуемой рабочей температуры слоя.

Каталитические реакторы действуют при меньших температурах – от 200 °С до 315 °С. На каталитической ступени отмечается противоположная зависимость от температуры: конверсия увеличивается со снижением температуры, но в интервале небольших температур скорости целевых реакций становятся очень невелики, поэтому для увеличения скорости реакций нужно применять катализаторы. Нижний температурный предел ограничивается точкой росы серы (температура конденсации серы 188 °С), но нижний предел в каталитических конверторах на практике ставят на уровне 220 °С, чтобы исключить возможность конденсации серы в порах катализатора [8]. На каталитической ступени рост давления положительно сказывается на выходе серы, в каталитических конверторах чаще всего держится давление на уровне от 0,12 до 0,17 МПа.

В качестве катализатора используют глинозем или бокситы. Каждая каталитическая ступень восстанавливает от половины до двух третей поступающей серы, в зависимости от желаемого уровня конверсии подбирают

количество каталитических стадий. По оценкам, общее восстановление серы может составить от 95 % до 97 %.

На каталитических ступенях процесса протекает реакция H_2S и SO_2 , непрореагировавших на термической ступени, с образованием элементарной серы на катализаторе согласно реакции [9]:



Для удаления серы из газовой фазы технологический газ остужают после каждой ступени конверсии, применяя тепло горячих газов для получения насыщенного водяного пара. Технологический газ нагревается перед каталитическими ступенями смешиванием с продуктами сгорания топливного газа в топках-подогревателях или паровых подогревателях.

С заключительной каталитической ступени, уже после извлечения образовавшейся серы, отходящий газ отправляется на установку доочистки хвостовых газов процесса Клауса [10].

1.2.3 Очистка хвостовых газов

Хвостовой газ из процесса Клауса, все еще включающий в себя горючие компоненты и соединения серы (H_2S , H_2 и CO), или подается на установку для сжигания, или подвергается последующей очистке в установке доочистки хвостового газа.

Все процессы очистки отходящих газов можно разделить на три группы:

1. Процессы, основанные на продолжении реакции Клауса, то есть превращении H_2S и SO_2 в серу, обеспечивая общую степень извлечения серы от 99,0 % до 99,7 %. Процессы возможно проводить в слое твердого катализатора или в жидкой среде, содержащей катализатор [11].

2. Процессы, основанные на восстановлении всех соединений серы до сероводорода с дальнейшим его извлечением. Процессы отличаются друг от друга способ извлечения образовавшегося сероводорода из продуктов гидрирования и источник водорода.

3. Процессы, основанные на окислении всех соединений серы до SO_2 или до элементарной серы с дальнейшим их извлечением. Процессы отличаются

друг от друга, в первую очередь, способом извлечения образовавшихся продуктов (серы или диоксида серы) [12].

1.2.4 Дегазация серы

Извлеченная на установках Клауса сера имеет в своем составе растворенный сероводород в виде свободного сероводорода и химически связанного полисульфида водорода, который при перемешивании и понижении температуры разлагается с выделением сероводорода [4].

1.2.5 Грануляция серы

Главным условием потребителей серы является поставка ее в виде прочных малопористых гранул. Гранулированная сера не слеживается, сохраняет сыпучесть и не образует пыли при хранении и перевозках, легко транспортируется и дозируется. Суть известных способов получения гранулированной серы сводят к истечению расплава серы через отверстия в виде отдельных капель, которые в процессе свободного падения остужаются воздухом, водяным паром или струями воды [13].

2 Технологическая эффективность

Установки Клауса по объемам и качеству сбрасываемых вредоносных веществ в атмосферу входят в десятку наиболее опасных для окружающей среды источников загрязнения атмосферного воздуха. Выбросы в атмосферу соединений серы с установок Клауса на сегодняшний день остаются значительными, что требует непрерывного модернизирования технологии получения серы.

Технологическая эффективность работы установок Клауса оценивается степенью конверсии сероводорода в серу. На мировом уровне конверсия сероводорода в серу выше 99,8 %, но на действующих установках Клауса России реальная степень конверсии меньше 99,6 %. Экологическая результативность установок Клауса определяется остаточным содержанием соединений серы в дымовых газах.

За рубежом при эксплуатации установок получения газовой серы на выходе дымовой трубы содержание соединений серы не более 300 ppm, в России указанное содержание соединений серы в дымовых газах не обеспечивается.

На данный момент значительный интерес уделяется совершенствованию технологии, в основном, за счет разработки и введения усовершенствованных процессов Клауса и доочистки.

Эти разработки обладают преимуществами перед существующими установками Клауса. Но потребуются полная реконструкция имеющихся процессов и эти разработки по денежным затратам превышают от 50 % до 100 % стоимости функционирующих установок. Для установок производства серы методом Клауса, эксплуатируемых длительное время, требуются непрерывный поиск, разработка, проведение соответствующих исследований и практическая реализация эффективных мероприятий [14].

3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ (THE TECHNOLOGICAL PART)

3.1 Описание технологической схемы установки

Технологическая схема установки Клауса на Астраханском ГПЗ представлена на рисунке 1.

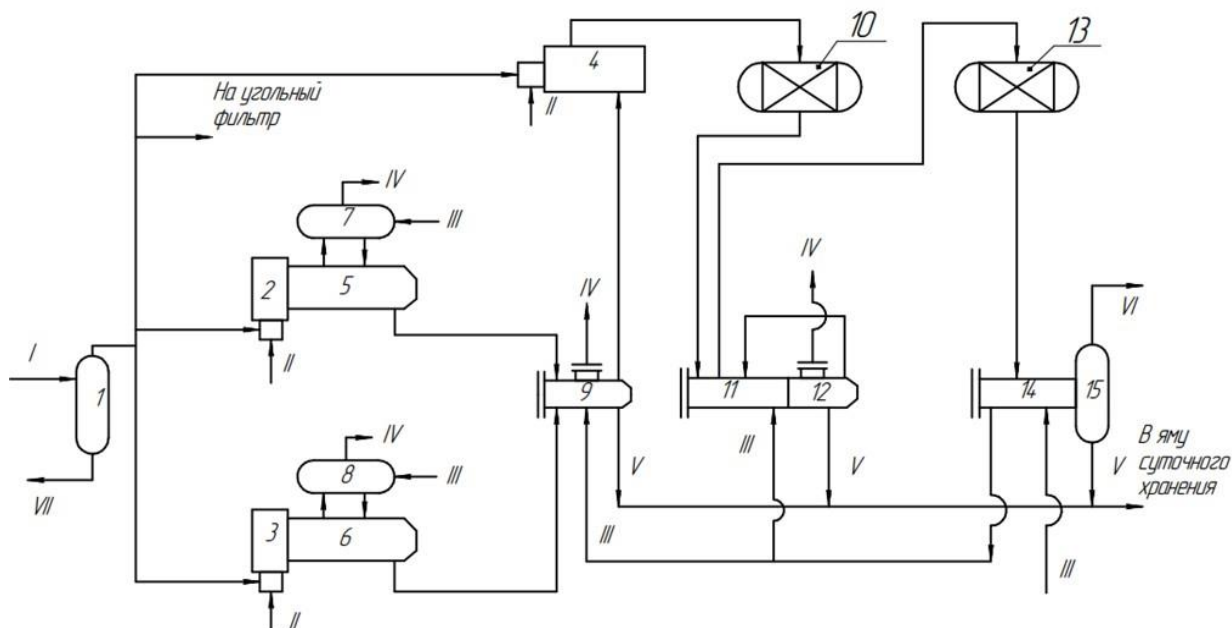


Рисунок 1 – Технологическая схема установки Клауса

1 – сепаратор, 2, 3, 4 – печь, 5, 6 – котел, 7, 8 – барабан котла, 9, 12 – конденсатор-генератор, 10, 13 – конвертор, 11 – теплообменник, 14 – конденсатор-экономайзер, 15 – коагулятор.

Весь кислый газ при температуре до 60 °С и давлении 83 кПа поступает в сепаратор 1, где происходит удаление влаги из газа. Далее кислый газ разделяется на три потока: первые два поступают в печи 2 и 3 термической ступени процесса, а третий – в печь 4 перед каталитической ступенью. В печь 4 направляется 3 % газа от общего количества. Оставшаяся часть направляется в печи- реакторы 2 и 3 термической ступени равными порциями. Температуру в этих печах поддерживают в интервале от 900 °С до 1300 °С. Из воздуходувок поступает технологический воздух, который необходим для сжигания поступившего газа. После печей-реакторов образовавшаяся смесь уходит в трубное пространство котлов 5 и 6 и там охлаждается до температурного интервала от 250 °С до 300 °С. В результате охлаждения этой смеси образуется пар среднего давления (2,4 МПа), получаемый при нагреве питательной воды, поступающей в барабаны 7 и 8 котлов 5 и 6 соответственно. Образовавшиеся продукты термической ступени выходят из котлов 5 и 6 и поступают в трубное пространство конденсатора 9. Там происходит дальнейшее охлаждение смеси до

интервала температур от 160 °С до 200 °С. Сконденсированная сера по серопроводу направляется в серную яму. Для охлаждения газа в конденсаторе-генераторе 9 используется питательная вода, которую предварительно подогревают в экономайзере 14 до 155 °С. В результате теплообмена в межтрубном пространстве образуется пар низкого давления (0,4 – 0,6 МПа). Далее оставшийся газ выходит из конденсатора 9 и направляется во вспомогательную печь 4 для подогрева. В этой печи происходит сжигание кислого газа, после чего основной поток газа смешивается с ним и нагревается до температурного интервала от 240 °С до 280 °С. Нагретый газ направляется на первую каталитическую ступень в конвертор 10, где проходит сверху вниз через слой катализатора (активированный Al_2O_3 или на основе TiO_2). В конверторе H_2S и SO_2 превращаются в серу, там же происходит гидролиз COS , CS_2 . На выходе смесь имеет температуру в интервале от 350 °С до 365 °С. После конвертора 10 образовавшиеся продукты реакции поступают в трубное пространство совмещенного аппарата 11-12 (11 – теплообменник газ/газ, 12 – конденсатор-генератор газ/вода) для охлаждения. В теплообменнике 11 газы реакции охлаждаются до 325 °С и поступают в конденсатор 12, где охлаждаются до 180 °С. Сконденсированная сера через два гидрозатвора по серопроводу поступает в яму. Для охлаждения газа в теплообменнике 11 используется питательная вода, подогретая в экономайзере 14 до 155 °С. Из конденсатора 12 технологический газ поступает в межтрубное пространство теплообменника 11, где подогревается до температур в интервале от 210 °С до 240 °С и поступает в конвертор 13. Там технологические газы так же сверху вниз проходят через слой катализатора. В результате происходит превращение H_2S и SO_2 в серу и повышение температуры до 260 °С.

Образовавшиеся продукты поступают в трубное пространство экономайзера 14. Там за счет теплообмена с питательной водой технологический газ охлаждается до 140 °С. Аппарат 15 служит для сепарации капельной серы от газа за счет снижения скорости потока и отбойных сеток. Из коагулятора 15 технологический газ поступает на доочистку, а сконденсированная сера по серопроводу уходит в яму для хранения [19].

3.2 Характеристика готовой продукции

Целевым продуктом на установке является техническая (газовая) сера, выпускаемая по ГОСТ 127.1-93 (сорт 9998).

Требования к качеству технической серы установлены для сорта 9998 по ГОСТ 127.1-93 и его преемнику – стандарту ОАО «Газпром» (СТО Газпром 040-2008). Техническую серу в зависимости от способа получения выпускают жидкую, комовую, гранулированную и молотую.

По физико-химическим показателям техническая сера и модифицированная техническая сера должны соответствовать требованиям и нормам, указанным в таблицах 2-4 [21].

Таблица 2 – Физико-химические показатели жидкой технической серы

Наименование показателя	Значени е		Метод анализа
	Высший сорт	Первый сорт	
1 Внешний вид	Жидкость бурого цвета. Не допускаются присутствие механических загрязнений (бумага, дерево, песок и др.)		Визуал ьно
2 Массовая доля серы, %, не менее	99,9900	99,9800	По 7.2
3 Массовая доля золы, %, не более	0,0080	0,0100	По 7.3
4 Массовая доля органических веществ, %, не более	0,0040	0,0080	По 7.4
5 Массовая доля кислот в пересчете на серную кислоту, %, не более	0,0010	0,0015	По 7.5
Примечание - Значения показателей 2-5 даны в пересчете на сухое вещество.			

Таблица 3 – Физико-химические показатели комовой технической серы

Наименование показателя	Значение			Метод анализа
	Высший сорт	Первый сорт	Второй сорт	
1 Внешний вид	Куски желтого цвета разного размера и формы. Не допускается присутствие механических загрязнений (бумага, дерево, песок и др.)			Визуально
2 Массовая доля серы, %, не менее	99,980	99,920	99,200	По 7.2
3 Массовая доля золы, %, не более	0,009	0,050	0,300	По 7.3
4 Массовая доля органических веществ, %, не более	0,004	0,020	0,450	По 7.4
5 Массовая доля кислот в пересчете на серную кислоту, %, не более	0,001	0,010	0,020	По 7.5
6 Массовая доля воды, %, не более	0,500	1,000	3,000	По 7.6
Примечание - Значения показателей 2-5 даны в пересчете на сухое вещество				

Таблица 4 – Физико-химические показатели гранулированной технической серы

Наименование показателя	Значение			Метод анализа
	Высший сорт	Первый сорт	Второй сорт	
1 Внешний вид	Гранулы желтого цвета сферической, полусферической и других геометрических форм. Не допускается присутствие механических загрязнений (бумага, дерево, песок и др.)			Визуально
2 Массовая доля серы, %, не менее	99,980	99,920	99,200	По 7.2
3 Массовая доля золы, %, не более	0,010	0,050	0,300	По 7.3

4 Массовая доля органических веществ, %, не более	0,010	0,020	0,450	По 7.4
5 Массовая доля кис-лот в пересчете на серную кислоту, %, не более	0,001	0,010	0,020	По 7.5
6 Массовая доля воды, %, не более	0,500	3,000	Не нормируется	По 7.6
7 Массовая доля гра- нул, %, не менее, диа- метром, мм: - 2,0-7,0 - 1,0-10,0	90,00 0 -	- 90,00 0	Не нормируется	По 7.7
Примечание				
1. Значения показателей 2-5 даны в пересчете на сухое вещество				
2. Массовую долю гранул определяют по требованию потребителей				

3.3 Технологический расчет действующей установки Клауса

1.4.1 Исходные данные

Производительность установки по кислому газу – 5000 кг/ч. Выход серы в термической части – 62 % [20].

Распределение потока кислого газа между термической и каталитической ступенями 98 % и 2 % [22].

Степень извлечения серы 95 %.

Выделенный на установке гидроочистки + гидрокрекинг сероводород поступает на установку производства элементарной серы, материальный баланс которой приведён в таблице 6.

Производство серы	% мас. На сырье	% мас. На нефть	Тыс. т/год	Кг/час
Поступило				
Сероводород с гидрокрекинга	17,80	0,445	44,55	5459,00
Сероводород с гидроочистки масел	14,96	0,374	37,43	4586,73
Сероводород с гидроочистки ДТ	17,65	0,442	44,16	5411,76
Сероводород с гидродепарафинизации ДТ	15,36	0,384	38,43	4709,68
Сероводород с ГО ВГ	34,23	0,857	85,66	10498,09
Всео:	100,00	2,50	250,23	30665,26
Получено:				
Сера элементарная	97,00	2,427	242,72	29745,30
Потери	3,00	0,075	7,51	919,96
Всего	100,00	2,50	250,23	30665,26

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Conclusion)

В ходе выполнения работы были закреплены знания, приобретенные за время обучения в университете. Изучено устройство и принцип работы установки Клауса, усвоена технологическая схема, приборы и оборудование установки. Проанализирована нормативная, техническая, научная документация по теме исследования.

Предложены методы усовершенствования установки Клауса, рассчитаны тепловые и материальные балансы, проведен технологический расчет каталитического реактора до усовершенствований и после.

Рассмотрены требования безопасности и требования по охране окружающей среды установки Клауса.

В ходе технологического расчета выявлено, что инновации позволяют увеличить количество получаемой серы, уменьшают выход побочных веществ. Длина аппарата уменьшается, за счет чего уменьшается металлоемкость, масса катализатора, загружаемого в катализатор меньше, чем до модернизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (Bibliography)

1. И. А. Голубева., Г. Р. Хайруллина., А. Ю. Старынин., Каратун О. Н. Анализ производства серы методом Клауса на нефтегазовых предприятиях России, нерешенные проблемы // НефтеГазоХимия. 2017. №3. С. 12.
2. Свирина, С.А. Модификации процесса Клаус для повышения степени конверсии сероводорода и диоксида серы в серу / С. А. Свирина, В. В. Мешков // Молодой ученый. – 2020. – № 7. – С. 52-54.
3. Анализаторы управления процессом Клауса: опыт ТАНЕКО и новые решения // Энергетика и нефтегазохимический комплекс Татарстана в начале XXI века. – 2011. – № 7. – С. 26-28.
4. Справочник сернокислотчика / К. М. Малина : под ред. К. М. Малина. – М. : Химия, 1971. – 374 с.
5. Лapidус, А.Л. Газовая сера в России: проблемы и перспективы / А. Л. Лapidус, И. А. Голубева // Газохимия. – 2011. – № 3–4. – С. 61-73.
6. Шерматов, Б.Э. Катализаторы сероочистки на основе местного сырья и отходов производства / Б.Э. Шерматов [и др.] // Universum: химия и биология. –2020. – № 8. – С. 50-57.
7. Чумакова, Е.А. Повышение надежности работы установки производства серы / Е.А. Чумакова, Р.А. Ваганов, Ф.А. Бурюкин, Д.А. Мельчаков // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2017. – № 3. – С. 437-446.
8. Аяпбергенов, Е.О. Особенности технологии получения элементарной серы на установках Клауса из сероводорода кислых газов / Е. О. Аяпбергенов // Современные научные исследования и инновации. – 2012. – № 10. – С. 40-43.
9. Широкова, Г.С. Современные тенденции в развитии процесса Клауса. Пути решения задач по оптимизации работы установок производства серы / Г. С. Широкова // Экологический вестник России. – 2010. – № 1. – С. 6-12.
10. <https://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/VKR/4207.pdf>