

УДК 665.63:51.001.57

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ РЕАКТОРА КЛАУСА ОТ ЗНАЧЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СЕРЫ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2020 г. Б. Б. Оразбаев^а, Ж. Е. Шангитова^{а, *}, К. Н. Оразбаева^б,
Б. А. Серимбетов^б, А. Б. Шагаева^с

^аЕвразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

^бКазахский университет экономики, финансов и международной торговли, Нур-Султан, Казахстан

^сАтырауский университет нефти и газа им. С. Утебаева, Атырау, Казахстан

*e-mail: zhanna.shangitova@mail.ru

Поступила в редакцию 30.03.2020 г.

После доработки 05.06.2020 г.

Принята к публикации 10.07.2020 г.

Определено, что на термической ступени на работу реактора влияют следующие основные параметры: кислый газ и его состав на входе в реактор Клауса; соотношение между воздухом и кислым газом; время нахождения реакционной смеси в реакторе; а также температура и давление в реакторе. А на каталитической ступени на эффективность реактора Клауса определено влияние давления реактора, его температуры, степени активности катализаторов, а также продолжительности контакта газов с катализатором. Исследованы влияния этих технологических параметров на эффективность работы реактора Клауса установки производства серы на термической и каталитической ступенях. Построены графические зависимости влияния выбранных технологических факторов на показатель технологических процессов производства серы. Для оценки качества производимой товарной серы на основе производственной модели представления знаний специалистов-экспертов разработаны лингвистические модели с применением исходной нечеткой экспертной информации. Полученные лингвистические модели позволяют оценивать качество серы, ее сортность в зависимости от массовых долей серы, золы и органических веществ, а также воды. Для описания нечеткого термина “высокое качество” серы построены соответствующие функции принадлежности.

Ключевые слова: реактор Клауса, установка производства серы, нечеткая информация, функция принадлежности, производственная модель, лингвистическая модель

DOI: 10.31857/S0040357120060093

ВВЕДЕНИЕ

Процессы производства серы из кислых газов, полученных в результате сероочистки сероводородсодержащих углеводородов нефтегазовых месторождений, содержащих сероводород, какими являются месторождения Тенгиз Республики Казахстан и морских месторождений Казахстанского сектора Каспийского моря, допускают возможность производить серу высшего качества с содержанием серы 99.5% и более. Себестоимость такой серы значительно меньше по сравнению с себестоимостью природной серы. Также следует отметить, что для обеспечения экологических требований и охраны воздушного бассейна эти процессы в нефтегазоперерабатывающих заводах, позволяющие утилизировать сероводород, являются весьма важными и актуальными [1–3]. Актуальность исследования также обусловлена увеличением переработки углеводородов с высоким содержанием сернистых соединений, уже

сточением экологических требований, а также необходимостью увеличения производства качественной товарной серы из кислых газов, выделяющихся в процессах нефтепереработки и содержащих сероводород.

На нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) Республики Казахстан проведена модернизация и внедряются новые технологии, способствующие расширению ассортимента продукции и повышению ее качества, а также позволяющие улучшать экологическое состояние производств. Например, в Атырауском НПЗ введена в эксплуатацию установка производства серы (УПС), позволяющая из вредных сероводородов, кислых газов вырабатывать полезную продукцию – гранулированную серу [4]. Таким образом, УПС позволяет одновременно улучшать экономико-экологические критерии производства за счет выработки полезной продукции (сера) из экологически вредных выбросов производства (кислые газы), что позволя-

ет улучшать экологическое состояние завода и окружающей среды.

Приоритетной задачей современных нефтегазоперерабатывающих заводов является повышение глубины переработки, что позволяет увеличить ассортимент и улучшить качество получаемой продукции. Кроме того, увеличение объема перерабатываемых высокосернистых углеводородов в настоящее время требует ужесточения экологических требований, которые предъявляются к нефтегазоперерабатывающим заводам. В таких предприятиях процессы производства серы с применением реактора Клауса относятся к эффективным и распространенным процессам производства серы из сероводородов. В этой связи необходимо разработать информационные системы оптимизации и управления технологическими агрегатами УПС, реактором Клауса, процессами производства серы на основе современных научных методов и средств информационных технологий, позволяющие увеличить объем прибыли за счет реализации серы и ее продуктов, а также снизить уровень загрязнения окружающей среды, что является актуальной задачей нефтегазоперерабатывающей отрасли. На практике некоторые параметры, например, необходимые для оценки качества получаемой серы на УПС, характеризуются нечеткостью [4]. В этой связи необходимо разработать математическое обеспечение информационных систем, которое позволяет определить оптимальные режимы работы УПС и улучшить качество вырабатываемой продукции при нечеткой исходной информации [5, 6]. Таким образом, задача разработки моделей и методов оптимизации, являющихся основой математического обеспечения систем управления процесса производства серы, является актуальной научно-практической задачей. Такие системы позволяют увеличить объем вырабатываемой продукции, обеспечивать ее необходимое качество и уменьшить вредные выбросы в атмосферу. Цель данного исследования – изучить влияние технологических параметров процесса производства серы на эффективность реактора Клауса и оценить качество вырабатываемой серы при нечеткой информации на основе разработанных лингвистических моделей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С целью построения математических моделей УПС проведены исследования влияния следующих основных технологических факторов, которые влияют на показатели работы реактора Клауса в процессе производства серы: объем кислого газа и его состав на входе реактора Клауса; соотношение между воздухом и кислым газом; время нахождения реакционной смеси в реакторе; температура термической ступени и каталитической ступени; давление реактора в зонах высоких и низких температур; характеристики катализаторов, используемых

в процессах производства серы; продолжительность времени контакта газов с катализатором.

На основе результатов экспериментального исследования необходимо определить зависимость между основными параметрами процесса и показателями работы реактора в графическом виде, а также аппроксимируя их определить уравнения этих зависимостей.

Также на основе доступной нечеткой информации, экспертной информации и логических правил условного вывода необходимо разработать лингвистические модели для оценки качества серы в виде продукционной базы знаний. Лингвистические модели должны описывать зависимость качественных показателей серы от массовых долей серы, золы, органических веществ, а также воды.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ

При исследовании и анализе влияния выбранных основных факторов технологического процесса на эффективность работы реактора Клауса используется методика системного анализа [7–10], методы статистического анализа и способы построения графических зависимостей между исследуемыми параметрами. Для сбора и обработки экспериментальных данных используются методы теории вероятностей [11], математической статистики и планирования экспериментов [12–15]. С целью синтеза лингвистических моделей производится сбор и обработка нечеткой информации, применяются методы экспертных оценок [16–18] и теории нечетких множеств [19–21].

Известно, что 100%-ное извлечение серы, содержащейся в кислом газе, теоретически невозможно, поскольку часть серы кислого газа расходуется вместе с газами, используемыми в качестве топлива печи. При этом сера дожигается как пары, состоящие из неконвертированных сероводородов, серооксида углерода и сероуглерода. Но путем повышения эффективности работы основных агрегатов УПС, в том числе реактора Клауса, за счет учета влияния основных технологических факторов [22], степень конверсии сероводорода в элементарную серу теоретически возможно довести до уровня 99.9%.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАКТОРА КЛАУСА

По проведенным исследованиям определены основные технологические параметры процесса получения серы, изучено их влияние на качество работы реактора Клауса.

Выявлено, что на термической ступени на процесс производства серы оказывают влияние следующие параметры: компоненты кислого газа на вхо-

де реактора Клауса; соотношение между воздухом и кислым газом; время пребывания реакционной смеси в реакторе; температура горения сероводорода на термической ступени; давление реактора в зоне высоких температур; свойства используемых катализаторов; время контакта газов с катализатором.

Рассмотрим компоненты кислого газа на входе реактора Клауса.

Сероводород. H_2S относится к основному компоненту кислого газа. На термической ступени содержание H_2S в кислом газе должно быть таким, чтобы обеспечить необходимую температуру для нагрева всего газа, в котором 1/3 часть является сероводородом. Если содержание сероводорода в кислом газе по объему выше 50%, то кислый газ в реакторе будет устойчиво гореть. В случае менее 50% сероводорода в кислом газе следует принимать меры по обеспечению стабильности горения, так как часть теплоты теряется при нагреве разбавителей. С целью обеспечения стабильности горения можно обогащать воздух кислородом [23], предварительно произвести подогрев воздуха, кислорода или принимать другие специальные меры.

Двуокись углерода. CO_2 является следующим компонентом кислого газа. Установлено, что H_2S ухудшает процесс горения, являясь разбавителем, снижает концентрацию компонентов, которые реагируют. Таким образом, H_2S понижает конверсию, приводит к образованию побочной продукции, например COS , CS_2 . Если содержание двуокиси углерода в кислом газе составляет 10%, то степень конверсии повышается до 70%. Если в кислом газе содержание CO_2 40%, то степень конверсии снижается до 60%. Очень высокая концентрация двуокиси углерода значительно влияет на устойчивость пламени в реакторе, а также влияет на температуру сжигания.

Пары воды. Водяные пары сдвигают равновесие реакций Клауса обратно, что приводит к снижению выхода серы. До сегодняшнего дня не разработаны методы удаления воды из состава реакционной смеси, которые внедрены на практике. На всех ступенях процесса получения серы пары воды также негативно влияют на протекание реакции Клауса. В кислом газе по нормативу содержание паров воды допускается до 10%.

Углеводороды C_nH_m . В кислом газе C_nH_m содержится немного, но все равно они приводят к значительному повышению расхода воздуха в процессе сжигания и к увеличению объема газов, который образуется после процесса горения. А это, в свою очередь, усиливает процесс смешения основных газов с продуктами горения. Поэтому в процессе горения углеводородов в высокотемпературной зоне образуются углеводы, т.е. сажа. Сажа, как известно, загрязняет катализатор и серу. В результате реакций с сероводородом углерод приводит к образованию серооксида углерода и сероуглерода. Они конверсии не подвергаются, по-

падают в уходящий газ процесса Клауса и снижают объем получаемой серы.

Кислород. Этот компонент кислого газа оказывает непосредственное влияние на количество SO_2 . Нарушение стехиометрического соотношения $\frac{H_2S}{SO_2} = 2 : 1$ приводит к снижению выхода серы. Также S с SO_2 образует SO_3 , взаимодействующий с катализатором. При этом образуются сульфаты алюминия. Все это приводит к снижению активности катализатора.

Компоненты кислого газа COS и CS_2 относятся к побочным реакциям процесса Клауса. Они приводят к снижению общего выхода серы. С целью превращения COS и CS_2 в серу требуется провести процессы гидролиза с применением специального катализатора, который способствует протеканию реакции гидролиза COS и CS_2 .

Соотношение между воздухом и кислым газом является очень важным для степени конверсии. Степень конверсии будет максимальной, если соотношение воздух/кислый газ оптимальное. При других значениях соотношения воздух/кислый газ, т.е. когда расход воздуха с кислородом выше или ниже оптимального значения, степень конверсии снижается.

На основе условия стехиометрического расхода на реализацию реакции Клауса можно определить оптимальное соотношение воздух/кислый

газ [24]. При условии $\frac{O_2}{H_2S} > 1.5$ весь H_2S превращается в SO_2 .

В случае меньшего количества кислорода часть сероводорода будет окисляться до элементарной S и SO_2 , с другой частью не происходит реакция, а кислород расходуется почти полностью.

График зависимости между отношением $\frac{O_2}{H_2S}$ в сырье и интегрированной конверсией сероводорода приведен на рис. 1.

Аналитическое выражение, описывающее графическую зависимость, приведенную на рис. 1, установлено в виде $y = 140x$.

Оптимальная продолжительность пребывания реакционной смеси определяется в зависимости от времени достижения термодинамического равновесия. Если температура процесса на термической стадии высокая, то скорости всех реакции являются высокими [25].

Температура горения сероводорода на термической ступени определяется в зависимости от концентрации сероводорода, входящего в реактор в кислый газ. Если концентрация сероводорода в исходном газе, поступающем в реактор, увеличивается, то температура в реакторе и степень конверсии H_2S в элементарную S также повышаются. Кроме того, при этом нагрузка на реактор

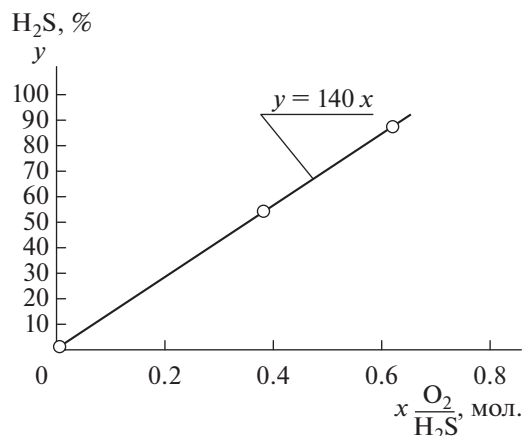


Рис. 1. Влияние отношения $\frac{O_2}{H_2S}$ (мол.) в сырье на конверсию H_2S . Температура — $105-110^\circ C$; время контакта — 5.5 с; состав сырья: H_2S — 1.5% ; H_2O — 20% ; N_2 — до 100% ; продолжительность — 24 ч.

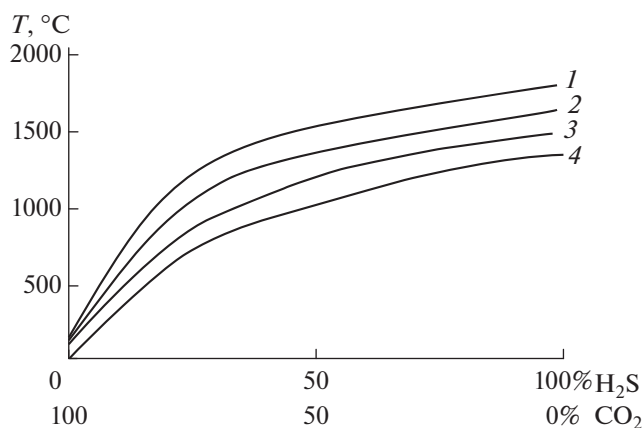


Рис. 2. Зависимость температуры горения H_2S от состава исходного газа и количества O_2 : 1 — $H_2S + 1.5O_2$ (y_1); 2 — $H_2S + 1.0O_2$ (y_2); 3 — $H_2S + 0.7O_2$ (y_3); 4 — $H_2S + 0.5O_2$ (y_4).

уменьшается и, соответственно, его эффективность повышается.

График зависимости температуры горения сероводорода на термической ступени от состава кислого, т.е. исходного, газа и от количества O_2 представлен на рис. 2.

В результате аппроксимации определены уравнения, т.е. модели описывающие зависимость температуры горения ($y_1; y_2; y_3; y_4$) от состава кислого газа H_2S и разного количества кислорода (1 — $H_2S + 1.5O_2$; 2 — $H_2S + 1.0O_2$; 3 — $H_2S + 0.7O_2$; 4 — $H_2S + 0.5O_2$):

$$y_1 = 534.5 \ln(x) - 12.144,$$

$$y_2 = 489.85 \ln(x) - 56.453,$$

$$y_3 = 0.0498x^3 - 3.9694x^2 + 123.67x - 6.7562,$$

$$y_4 = 0.0583x^3 - 4.0695x^2 + 116.96x - 70.342.$$

С помощью приведенных моделей можно исследовать влияние состава кислого газа и количества кислорода на температуру горения и выбрать оптимальный режим работы реактора Клауса.

Давление. Увеличение этого параметра в зоне высокой температуры, в которой конверсия H_2S в элементарную S может достигать до 70% , приводит к уменьшению степени конверсии сероводорода в серу.

Определено, что на каталитической ступени на процесс получения серы оказывают влияние следующие технологические факторы: температура; давление в низкотемпературной зоне; время контакта газов с катализатором; катализаторы процесса.

Температура. В каталитической ступени необходимо задать такое значение температуры, которое не позволяет конденсацию образовавшейся серы, а также температура не должна блокировать поверхность катализатора процесса. Чтобы найти эффективное значение температуры в каталитической ступени следует поддержать значение температуры больше, чем точка росы S [26]. На рис. 3 представлен график зависимостей конверсии и селективности окисления H_2S от температуры, построенный на основе экспериментальных данных.

В результате аппроксимации кривых зависимостей конверсии и селективности окисления сероводорода в элементарную серу от температуры в случае содержания сероводорода в газе — 1.5% , воды — 20% , азота — до 100% , отношения сероводорода к кислороду — 1.0 (мол.) получены следующие аналитические выражения, являющиеся моделями, позволяющие определить влияние температуры в каталитической ступени на конверсию и селективность реакции окисления сероводорода в элементарную серу:

$$y_1 = -0.1667x^3 + 1.2143x^2 + 1.3810x + 83.6000,$$

$$y_2 = -0.0714x^2 + 7.5286x + 74.4000.$$

Давление. Повышая значение этого параметра в зоне низкой температуры, в которой повышение значения температуры приводит к снижению степени конверсии, можно обеспечить повышение степени конверсии сероводорода в элементарную серу.

Время контакта газов с катализатором. Повышение значения этого параметра позволяет увеличить выход серы. С учетом падения активности катализатора во времени необходимо время контакта принимать больше, чем расчетная величина. Если температура задана, чтобы обеспечить термодинамическое равновесие состава газов, время

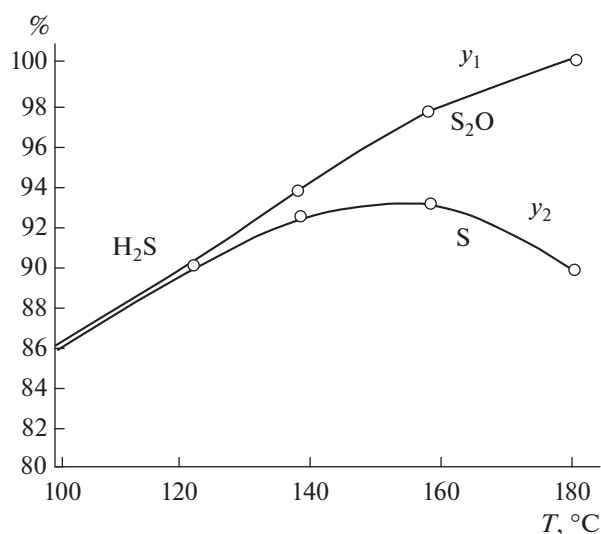


Рис. 3. Зависимость конверсии и селективности окисления сероводорода в серу от температуры катализаторной ступени. Содержание H_2S в газе – 1.5%,

H_2O – 20%; N_2 – до 100%; $\frac{H_2S}{O_2} = 1.0$ (мол.).

контакта газов с катализатором в реакционной зоне должно быть 10 с [27].

Катализаторы процесса получения серы. Активность катализаторов, устойчивость катализаторов

к сульфитации и их способность осуществлять гидролиз CO_S и CS_2 достаточно сильно влияют на показатели работы реактора Клауса УПС.

От используемого катализатора зависит время достижения равновесия, а на положение равновесия он не влияет. Если значение температуры меньше, чем точка росы S , то допускается использование Al_2O_3 как катализатора-адсорбента. В качестве основных параметров производительности УПС и уровня потерь серы можно рассматривать состояния и активность слоев катализатора [28, 29].

ЛИНГВИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СЕРЫ

Приведем результаты построения лингвистических моделей, которые позволяют оценить качество вырабатываемой серы. Применяя идею метода логического правила условного вывода [6] и разработанной базы правил, идентифицированы структуры лингвистических моделей, используемые при оценке качества серы в нечеткой среде. Разработанные лингвистические модели оценивают влияние массовых долей серы, золы, органических веществ и воды в составе продукции на качество вырабатываемой серы. Идентифицированная структура лингвистических моделей основана на базе правил типа продукционная модель и состоит из следующих основных правил:

Если $MD_C \gtrsim 99.98\% \wedge MD_Z \lesssim 0.02\% \wedge MD_{OV} \lesssim 0.01\% \wedge MD_W \lesssim 0.2\%$, То КС = ВК,

Если $MD_C \gtrsim 99.95\% \wedge MD_Z \lesssim 0.03\% \wedge MD_{OV} \lesssim 0.03\% \wedge MD_W \lesssim 0.2\%$, То КС = ВС,

Если $MD_C \gtrsim 99.90\% \wedge MD_Z \lesssim 0.05\% \wedge MD_{OV} \lesssim 0.06\% \wedge MD_W \lesssim 0.2\%$, То КС = СР,

Если $MD_C \gtrsim 99.50\% \wedge MD_Z \lesssim 0.20\% \wedge MD_{OV} \lesssim 0.25\% \wedge MD_W \lesssim 0.2\%$, То КС = НС,

Если $MD_C \gtrsim 99.20\% \wedge MD_Z \lesssim 0.40\% \wedge MD_{OV} \lesssim 0.50\% \wedge MD_W \lesssim 1.0\%$, То КС = НК.

В полученных лингвистических моделях использованы следующие обозначения массовых долей состава серы: MD_C – для серы; MD_Z – для золы; MD_{OV} – для органических веществ и MD_W – для воды.

Знак \gtrsim означает нечеткость ограничения типа “не более”; \lesssim – нечеткость ограничения типа “не менее”; \wedge обозначает логический “и”, который требует истинность всех связываемых им условий.

Для обозначения качества серы (КС) приняты следующие термины: ВК – высокое; ВС – выше среднего; СР – среднее; НС – ниже среднего и НК – низкое.

На практике качество серы классифицируется по сортности: высший сорт; 1-сорт; 2-сорт; 3-сорт и 4-сорт. Если качество серы по показателю массовой доли серы в продукции оценивается по лингвистическим моделям как “высокое качество”,

т.е. когда выполняется условие $MD_C \gtrsim 99.98\%$, то сера имеет высший сорт, когда оценка качества серы “выше среднего”, т.е. $MD_C \gtrsim 99.95\%$, то сера относится к 1-сорт. Если оценка качества серы “среднее качество”, т.е. $MD_C \gtrsim 99.90\%$, то сера относится к 2-сорт, а если оценка качества серы “ниже среднего”, т.е. $MD_C \gtrsim 99.50\%$, то 3-сорт. Если $MD_C \gtrsim 99.20\%$, т.е. качество серы оценивается как “низкое”, то сера относится к 4-сорт.

Таким образом, качество и сортность серы зависят в первую очередь от значения MD_C , т.е. от массовой доли серы в продукции. В этой связи в практических условиях, если нарушаются остальные требования (в результате проверки MD_Z , MD_{OV} и MD_W), то качество серы оценивается относительно первого условия, т.е. от $MD_C \gtrsim \dots$. Таким образом, на основе этого заключения базу правил можно дополнить и другими правилами, например:

Если $MD_C \gtrsim 99.98\% \wedge MD_Z \lesssim 0.03\% \wedge MD_{OV} \lesssim 0.03\% \wedge MD_W \lesssim 0.2\%$, То КС = ВС,
 Если $MD_C \gtrsim 99.95\% \wedge MD_Z \lesssim 0.04\% \wedge MD_{OV} \lesssim 0.05\% \wedge MD_W \lesssim 0.5\%$, То КС = СР,
 Если $MD_C \gtrsim 99.90\% \wedge MD_Z \lesssim 0.25\% \wedge MD_{OV} \lesssim 0.30\% \wedge MD_W \lesssim 0.3\%$, То КС = НС,
 Если $MD_C \gtrsim 99.50\% \wedge MD_Z \lesssim 0.35\% \wedge MD_{OV} \lesssim 0.50\% \wedge MD_W \lesssim 0.5\%$, То КС = СР.

Как видно, если требования к MD_Z , MD_{OV} и MD_W нарушаются, то качество серы оценивается одним сортом ниже.

Полученные лингвистические модели с применением базы правил на основе продукционной модели представления базы знаний позволяют оценить качество и сортность вырабатываемой серы. Для построения функции принадлежности (ФП) нечетких показателей качества серы организованы и проведены экспертные оценки [16], а также применен алгоритм построения функции принадлежности, предложенный в работе [30]. Ниже приведены результаты построения функции принадлежности, которые описывают качество серы с термином ВК – “высокое качество”:

$$\mu_A^S(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 99.98 \\ 12.5x - 1248.75, & \text{если } 99.90 \leq x < 99.98, \\ 0, & \text{если } x < 99.90 \end{cases}$$

$$\mu_A^Z(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq x \leq 0.020 \\ 33.33x - 0.66, & \text{если } 0.020 < x \leq 0.050, \\ 0, & \text{если } x > 0.050 \end{cases}$$

$$\mu_A^{OB}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq x \leq 0.010 \\ 20x - 0.2, & \text{если } 0.010 < x \leq 0.060, \\ 0, & \text{если } x > 0.060 \end{cases}$$

$$\mu_A^B(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq x \leq 0.20 \\ 20x - 4, & \text{если } 0.20 < x \leq 0.25, \\ 0, & \text{если } x > 0.25 \end{cases}$$

где $\mu_A^S(x)$ ФП, которая описывает массовую долю серы в продукции; $\mu_A^Z(x)$ ФП нечеткого показателя “массовой доли золы” в составе серы; $\mu_A^{OB}(x)$ ФП показателя доли органических веществ и $\mu_A^B(x)$ ФП, описывающая показатель “массовая доля воды” в составе серы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе определены основные параметры, влияющие на эффективность работы реактора Клауса. Дано описание выбранных основных технологических факторов и исследовано их влияние на установку производства серы. На термической ступени исследовано влияние на процесс получения серы компонентов кислого газа на входе реактора Клауса, соотношения воздух/кислый газ, времени пребывания реакционной смеси в

реакторе, температуры горения сероводорода. Также на термической ступени процесса проведены исследования влияния на эффективность работы реактора Клауса давления высокотемпературной зоны, катализаторов процесса и времени пребывания газов в контакте с катализатором.

На каталитической ступени процесса проведены исследования влияния температуры, давления в низкотемпературной зоне, времени пребывания газов в контакте с катализатором, катализаторов процесса на технологический процесс производства серы. Построены графические зависимости влияния основных исследованных технологических факторов на эффективность работы реактора Клауса.

На основе логических правил условного вывода построены лингвистические модели, которые позволяют оценить зависимость качества и сортности серы от массовых долей серы, золы, органических веществ и воды в продукции. Полученные лингвистические модели реализуют нечеткую зависимость качества серы и массовых долей перечисленных составляющих продукции на основе продукционной модели знаний. На основе методов экспертной оценки и теории нечетких множеств построены функции принадлежности нечетких показателей, описывающие качество серы, приведены аналитические выражения функции принадлежности, описывающие “высокое качество” серы.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

MD_C	массовая доля серы
MD_{OV}	массовая доля органических веществ
MD_W	массовая доля воды
MD_Z	массовые доля золы
T	температура, °С

ИНДЕКСЫ

C	сера
OV	органические вещества
W	вода
Z	зола

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сериков Т.П., Оразбаев Б.Б. Технологические схемы переработки нефти и газа в Казахстане. Ч. 1. М.: Нефть и газ, 1993.
2. Hashemi M., Pourfayaz F., Mehrpooya M. Energy, exergoeconomic and sensitivity analyses of modified Claus process in a gas refinery sulfur recovery unit // J. Cleaner Prod. 2019. V. 220. № 5. P. 1071.

3. *Зинченко Т.О.* Экологическая оптимизация технологии производства серы (на примере ГПЗ ООО “Газпром добыча Оренбург”). Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2008.
4. *Сериков Т.П., Серикова З.Ф., Оразбаев Б.Б., Уразбаев К.К., Козырев Д.В.* Новые установки Атырауского НПЗ: установка производства серы. Атырау: АИНГ, 2008.
5. *Orazbayev B.B., Orazbayeva K.N., Utenova B.E.* Development of Mathematical Models and Modeling of Chemical Engineering Systems under Uncertainty // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2014. V. 48. № 2. P. 138. [*Оразбаев Б.Б., Оразбаева К.Н., Утенова Б.Е.* Разработка математических моделей и моделирование химико-технологической системы в условиях неопределенности // *Теор. осн. хим. технол.* 2014. Т. 48. № 2. С. 138.]
6. *Orazbayev B.B., Ospanov E.A., Orazbayeva K.N., Kurtmangazieva L.T.* A Hybrid Method for the Development of Mathematical Models of a Chemical Engineering System in Ambiguous Condition // *Math. Models Comput. Simul.* 2018. V. 10. № 6. P. 748. [*Оразбаев Б.Б., Оспанов Е.А., Оразбаева К.Н., Курмангазиева Л.Т.* Гибридный метод разработки математических моделей химико-технологической системы в условиях неопределенности // *Мат. модел.* 2018. Т. 10. № 6. С. 748.]
7. *Однокопылов Г.И., Дементьев Ю.Н., Шевчук В.А.* Применение системного анализа для обеспечения эксплуатационной надежности электрических машин в алмазодобывающей промышленности // *Изв. Томск. политех. ун-в. Инж. георесур.* 2019. Т. 330. № 5. С. 131. [*Однокопылов Г.И., Деметьев Ю.Н., Шевчук В.А.* Application of system analysis for providing reliability of electrical machines in diamond industry // *Bull. Tomsk Polytech. Univ. Geo Assets Eng.* 2019. V. 330. № 5. P. 131.]
8. *Денисов А.А.* Современные проблемы системного анализа. Информационные аспекты. СПб.: Санкт-Петербургский государственный технический университет, 2005.
9. *Pavlov S.Yu., Kulov N.N., Kerimov R.M.* Improvement of Chemical Engineering Processes Using Systems Analysis // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2014. V. 48. № 2. P. 117. [*Павлов С.Ю., Кулов Н.Н., Керимов Р.М.* Совершенствование химико-технологических процессов на основе системного анализа // *Теор. осн. хим. технол.* 2014. Т. 48. № 2. С. 117.]
10. *Reverberi A.P., Kuznetsov N.T., Meshalkin V.P., Salerno M., Fabiano B.* Systematical Analysis of Chemical Methods in Metal Nanoparticles Synthesis // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2016. V. 50. № 1. P. 63. [*Reverberi A.P., Кузнецов Н.Т., Мешалкин В.П., Salerno M., Fabiano B.* Систематический анализ химических методов синтеза наночастиц металлов // *Теор. осн. хим. технол.* 2016. Т. 50. № 1. С. 63.]
11. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшее образование, 2006.
12. *Zhao Z.-W., Wang D.-H.* Statistical inference for generalized random coefficient autoregressive model // *Math. Comput. Modell.* 2012. V. 56. P. 152.
13. *Протодьяконов М.М., Тедер Р.И.* Методика рационального планирования экспериментов. М.: Наука, 2017.
14. *Математическая теория планирования эксперимента.* М.: Наука, 2010.
15. *Новые идеи в планировании эксперимента.* М.: Наука, 2015.
16. *Мешалкин В.П.* Экспертные системы в химической технологии. М.: Химия, 1995.
17. *Gronostajski Z.* The expert system supporting the assessment of the durability of forging tools // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. V. 82. № 9. P. 1973.
18. *Sabzi H.Z.* Developing an intelligent expert system for streamflow prediction, integrated in a dynamic decision support system for managing multiple reservoirs: A case study // *Expert Syst. Appl.* 2017. V. 82. № 3. P. 145.
19. *Dubois D.* The role of fuzzy sets in decision sciences: Old techniques and new directions // *Fuzzy Sets Syst.* 2011. V. 184. № 5. P. 3.
20. *Štampar, Sokolič S., Karer G., Žnidaršič A., Škrjanc I.* Theoretical and fuzzy modelling of a pharmaceutical batch reactor // *Math. Comput. Modell.* 2011. V. 53. № 8. P. 637.
21. *Al-Jamimi H.A., Tawfik A.Saleh.* Transparent predictive modelling of catalytic hydrodesulfurization using an interval type-2 fuzzy logic // *J. Cleaner Prod.* 2019. V. 231. № 10. P. 1079.
22. *Щербатов И.А.* Оптимальное управление каталитической стадией процесса Клауса. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2006.
23. *Morey A., Pradhan S., Anilkumar R.* Pollutant monitoring in tail gas of sulfur recovery unit with statistical and soft computing models // *Chem. Eng. Commun.* 2019. V. 206. № 1. P. 69.
24. *Lavery C.B., Marrugo-Hernandez J.J., Sui R., Dowling N.I., Marriott R.A.* The effect of methanol in the first catalytic converter of the Claus sulfur recovery unit // *Fuel.* 2019. V. 238. № 2. P. 385.
25. *Шурин Р.М., Плинер В.М., Тер-Саакова Н.Б.* Экспериментальное исследование термической стадии процесса Клауса // *Пром. санит. очистка газов.* 1994. № 4. С. 21.
26. *Харичко М.А., Киевский В.Я., Ефимов В.А.* Опыт реконструкции установки получения элементарной серы // *Хим. технол. топл. масел.* 2005. № 5. С. 27.
27. *Al-Jamimi H.A.* Prediction of Sulfur Content in Desulfurization Process Using a Fuzzy-Logic Based Model // *Solid State Phenom.* 2019. V. 287. № 5. P. 80.
28. *Щербатов И.А., Проталинский О.М.* Оценка активности катализатора процесса Клауса с использованием интеллектуальной модели // *Труды Международных научно-технических конференций “Интеллектуальные системы” (AIS’05) и “Интеллектуальные САПР” (CAD-2005).* Научное издание в 3-х томах. Т. 2. М.: Физматлит, 2005. С. 371.
29. *Mohamed A.S., Sapuan S.M., Megat Ahmad M.M.H., Hatmouda A.M.S., Hang B.T., Baharudin T.B.* Modeling the technology transfer process in the petroleum industry: Evidence from Libya // *Math. Comput. Modell.* 2012. V. 55. № 3–4. P. 451.
30. *Оразбаева К.Н.* Айкын емес ортада оптимизация-лау кезінде колданатын терм-жиын анықтау және тиістілік функцияларын құру ішкі алгоритмдері // *АтМГИ жаршысы.* 2009. Т. 18. № 3. С. 216.