

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕАКТОРА СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ

*В.С. Григорьев, зам. руководителя Инновационного центра,
докт. техн. наук, профессор,
Н.С. Милованов, ведущий инженер, А.А. Полякова, аспирант
(ФГБНУ ГОСНИТИ, Москва, (495) 989-18-07, 1117731@mail.ru)*

Аннотация. В статье рассмотрена возможность обеспечения реакций обезвреживания широкого круга стойких экологически вредных веществ на базе многореакторных установок с использованием сверхкритической водной среды и сжатого воздуха в качестве окислителя.

Обоснованы методики расчета реактора и определения энергозатрат на эндотермические реакции окисления органических веществ при использовании реактора СКГО.

Ключевые слова: реактор, давление, сверхкритическое состояние, скорость реакции, окисление, окислитель, экологическая безопасность, энергия активации, температура, диэлектрическая проницаемость среды, плотность, реагенты.

Анализ сверхкритической водной среды

По мере развития промышленности и агропромышленных комплексов во многих странах мира, неизбежно возникают проблемы утилизации их отходов. Традиционные технологии складирования и переработки, включая сжигание, никак не могут удовлетворить требованиям по чистоте и экологической безопасности окружающей среды. Лавинообразное нарастание их объемов в некоторых странах становится уже не только экологической, но и во многих случаях социальной проблемой.

На этом фоне становится понятным настойчивый поиск новых эффективных методов решения этой проблемы.

Одним из таких методов в последнее десятилетие выделяется технология обезвреживания хлорсодержащих, отравляющих и органических веществ в сверхкритической водной среде. Это так называемое сверхкритическое гидротермальное – СКГО. Несомненным достоинством метода является широкий охват перерабатываемых отходов и глубина их переработки до безвредных продуктов: H_2O ; CO_2 ; N_2 ; оксидов и солей. Этому методу уделяется все большее внимание в специальной литературе, отраслевых и международных конференциях.

Как известно, попытки использования технологии СКГО предпринимаются во многих развитых странах мира, таких как США, Германия, Израиль и др., но недостаточная теоретическая проработка метода, неполнота представлений протекающих в активной зоне реакций, не позволяет в полной мере выделить доминантные параметры процесса и на них сосредоточить ресурсы и конструктивные усилия разработчиков соответствующего оборудования для увеличения его производительности, надежности, эффективности и безопасности. Без решения этих проблем на должном уровне вряд ли возможно широкое внедрение метода в практику переработки опасных отходов, загрязняющих окружающую среду.

На примере органосодержащих отходов, разлагающихся в активной зоне до вышеприведенных компонентов, попробуем разобраться в процессах окисления исходных веществ, рассматривая не химическую, а физическую суть их переходов к конечным продуктам.

В самом названии метода СКГО содержится указание на параметры рабочей среды, в которой осуществляется разложение перерабатываемых отходов. Это, как правило, температура выше $T_{кр}$ для воды – 374,6°С и давление P – более 22 МПа. Для обозначения особых свойств водяного пара при этих параметрах его принято называть флюидом, а сами свойства флюидными.

Какие же параметры и каким образом влияют на свойства водяного пара, повышающие реакционные способности сверхкритической среды? Ответ на этот вопрос необходим для концентрации усилий разработчиков оборудования по обеспечению наиболее выгодных параметров промышленных установок в том случае, когда обеспечение всех параметров затруднительно или нецелесообразно по причинам себестоимости, надежности или безопасности.

Рассмотрим влияние температуры на протекание окислительных процессов внутри реакционной зоны.

Как известно, любые химические реакции возможны лишь в том случае, если энергия взаимодействия реагирующих веществ выше необходимой энергии активации их молекул. Энергию взаимодействия можно повысить увеличив, например, кинетическую энергию поступательного движения молекул реагента путем увеличения средней скорости движения молекул за счет нагрева реагента. Но какой реагент выгоднее нагревать: органосодержащий или вступающий с ним в реакцию окислитель?

Для ответа на этот вопрос обратимся к разделу молекулярно-кинетической теории газов, где дается формула средней арифметической скорости движения молекул:

$$V = \sqrt{\frac{8RT}{\mu\pi}} \approx 1,60 \sqrt{\frac{RT}{\mu}},$$

где R – газовая постоянная, T – температура нагрева газа, а μ – молекулярная масса.

Из формулы видно, что выгоднее нагревать более низкомолекулярный реагент, так как скорость движения его молекул будет выше, а его кинетическая энергия $E = \frac{mV^2}{2}$ – больше, что и обеспечивает достижение уровня активации органических молекул. Особенно это должно быть заметно при реакциях разложения высокомолекулярных органосодержащих веществ, где их молекулы будут представлять, по сути, малоподвижные мишени для легких и энергичных молекул окислителя, разрушающих эти молекулы.

Так, если в качестве окислителя использовать воздух с молекулярным весом $\mu \approx 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль при температуре реакторной зоны $T=873^\circ\text{K}$, то средняя арифметическая скорость движения молекул воздуха, согласно приведенным формулам, может достигнуть величины

$$V = \sqrt{8 \cdot 8,31 \frac{873}{3,14} \cdot 29 \cdot 10^{-3}} \approx 803 \text{ м/с},$$

в то время как для обычных условий при температуре 17°С она достигает 463 м/с. Впрочем, следует иметь в виду, что в целом ряде случаев может быть более полезным иметь в качестве молекул-разрушителей вовсе не молекулы окислителя, а просто еще более легкие молекулы, например, молекулы водорода, гелия или углерода. Вводить ли такие молекулы в реагенты в чистом виде или в качестве присадок на стадии подготовки реагирующих смесей, нужно решать технологу в каждом конкретном

случае на стадии анализа возможных реакций в реакторной зоне. Исходя из этого следует выдавать технические задания разработчикам оборудования по этому температурному параметру.

Помимо возрастания энергии столкновения молекул-разрушителей пропорционально уже квадрату этой скорости, что делает возможным протекание реакций при достижении энергии активации, возрастает и число соударений молекул в единицу времени пропорционально этой скорости, что ведет к ускорению реакций в реакторной зоне.

Возможные технические решения по достижению нужной температуры реакторной зоны при наименьших затратах энергии мы рассмотрим ниже, в разделе кинематических расчетов установки СКГО.

Еще одним важным фактором влияния на ход реакций в реакторе является давление, при котором эти реакции проходят. Повышение давления сокращает межмолекулярные расстояния пропорционально своему значению и, значит, увеличивает число столкновений молекул реагентов между собой во столько раз, во сколько оно превосходит значение исходного давления. Так как значение средней арифметической скорости, определяемой температурой нагрева, не изменилось, а расстояние между молекулами сокращается.

Так, если средняя длина свободного пробега молекул кислорода при 27°C и нормальном давлении равна приблизительно $4,17 \cdot 10^{-3}$ см, то при давлении равном 300 атм средняя длина свободного пробега сократится в 300 раз и станет равной $\frac{4,17}{3} 10^{-5}$ см. В такое же количество раз увеличится число столкновений молекул и скорость реакций в реакторе при сохранении скорости движения молекул соответствующей 27°C.

Помимо описанного воздействия на скорость протекания реакций в реакторной зоне, давление должно оказывать еще одно влияние на ход реакций, хотя и не столь очевидное. Как известно, природа химических связей носит характер электронных (а, следовательно, электрических) взаимодействий между молекулами. И для такого взаимодействия вовсе небезразлична относительная диэлектрическая проницаемость среды ϵ , в которой это взаимодействие происходит.

Вода, как известно, обладает самым высоким из природных веществ показателем относительной диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 81$), ослабляющей электрическое взаимодействие между молекулами реагентов. Если такое взаимодействие носит ионный характер, то в большом количестве случаев этого ослабления достаточно для распада молекул вещества на составляющие их ионы без всякого дополнительного воздействия на эту молекулу. Так распадаются в воде на ионы большое число солей различных металлов при нормальных условиях.

Из электростатики известно, что силы взаимодействия двух электрических зарядов описываются формулой:

$$F = \frac{g1 * g2}{4\pi\epsilon\epsilon^0 r^2},$$

где $g1 * g2$ – взаимодействующие заряды, e^0 – электрическая постоянная равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Из формулы видно, что чем выше значение ϵ , тем меньше сила, удерживающая противоположные заряды в одной молекуле. Механизм ослабления силы взаимодействия зарядов не совсем ясен, но, вероятнее всего, молекулы воды при контакте с поляризованными молекулами реагента сами поляризуются и создают электрическое поле противоположной направленности, ослабляющее электрическое поле молекулярных ионов настолько, что теплового движения

молекул среды оказывается достаточно для разрушения молекул растворимой соли. Понятно, что такое же воздействие оказывает относительная диэлектрическая проницаемость и на все другие типы молекулярных связей, хотя степень поляризации молекул воды, а, следовательно, и напряженность противодействующего электрического поля, будут иными. В пользу таких представлений свидетельствует факт выпадения в осадок избытка солей в водных растворах при их выпаривании, что можно объяснить нехваткой молекул воды для создания достаточного противодействующего электрического поля для всех, имеющих в растворе, ионов соли. Те ионы, у которых этот недостаток наибольший, объединяются в молекулу, кристаллизуются и выпадают в осадок.

Однако при использовании технологии СКГО нам приходится использовать не воду, а высокотемпературный пар, у которого ϵ зависит от плотности пара и, следовательно, от давления в реакторной зоне. Как установлено рядом исследователей в 90-х годах прошлого века, эта зависимость в координатах $\epsilon - \frac{\rho}{T}$, где

ρ - плотность, а T - температура в кельвинах, носит почти линейный характер в большом диапазоне температур и давлений, ϵ возрастает от значений близких к единице до $\epsilon > 81$.

Это наглядно видно на приводимом ниже рисунке.

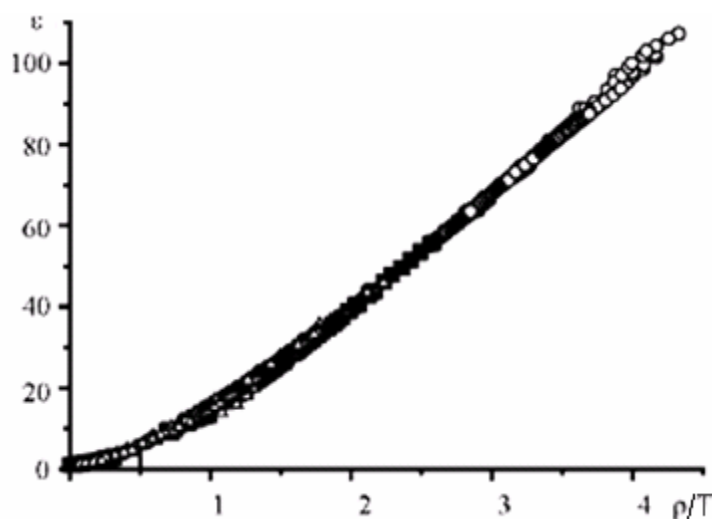


Рис. 1. Экспериментальные данные по ϵ воды и водяного пара в виде функции одного параметра отношения плотности к температуре

Следовательно, параметр давления в реакционной зоне, помимо уменьшения межмолекулярных расстояний и увеличения, тем самым, числа столкновений молекул, ослабляет внутримолекулярные связи, благодаря чему число результативных столкновений молекул реагентов увеличивается, и скорость реакции дополнительно возрастает. За счет указанных факторов и обеспечивают те высокие характеристики технологии СКГО, позволяющие окислять до нейтральных продуктов широкий круг экологически вредных веществ, и обозначить их как «флюидные».

При проектировании оборудования для таких технологий разработчики должны просчитывать энергозатраты и стоимость эксплуатации при использовании преимущественно того или иного фактора: фактора температуры и фактора давления для получения заданной производительности. Однако к настоящему времени все еще не существует общепринятой методики проектирования установок СКГО, которую можно было бы рекомендовать для различных технологических схем. Рассмотрим один из вариантов технологической схемы, получившей к настоящему времени распространение при проектировании такого

оборудования. Приведем пример расчета технических характеристик такой установки СКГО.

Расчет технических характеристик установки СКГО

Таблица 1

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА	
Суточная переработка сухого вещества (органики), кг	5922
Переработка органики в секунду $V_{расч}$, г/с	70
Соотношение воды и органики	6.7
Массовый расход воды, г/с	400
Массовый расход суспензии, г/с	470
Температура суспензии, °С	10
Температура в реакторе, °С	600
Давление в реакторе, Мпа	24

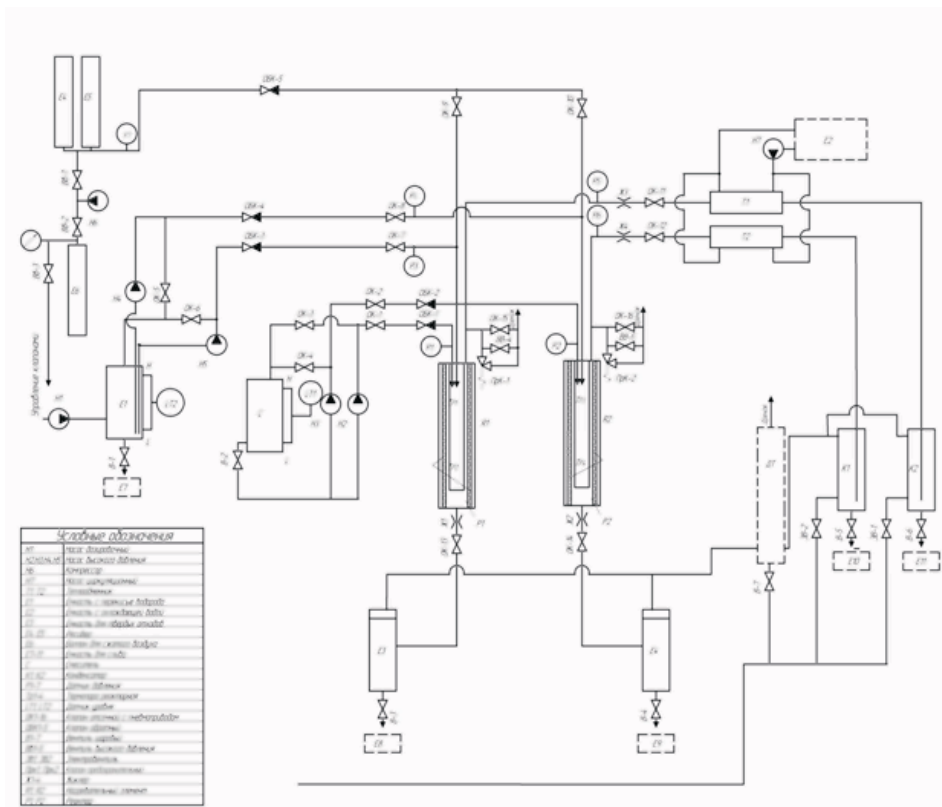
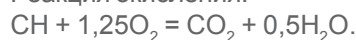


Рис. 2. Технологическая схема установки СКГО

Расчет объема реактора

Реакция окисления:



Соотношение окислителя к органике:

$$O_2:CH = 32:13 = 2,471.$$

Для окисления 70 г СН требуется $70 \times 2,471 = 173$ г кислорода; количество необходимого воздуха – $173 \times 5 = 865$ г/с.

Коэффициент использования кислорода в реакторе – 0,725, следовательно, в реактор надо подать воздуха:

$$\frac{1074,5}{0,725} = 1193 \text{ г/с.}$$

Согласно реакции, 70 г органики образуют конечных продуктов:

$$\frac{70}{13} = 5,385 \text{ молей, т.е. } (5,385CO_2 + 5,385) : 2 H_2O.$$

Число молей исходных продуктов: воздуха – $\frac{1193}{28,95} \approx 41,2$ молей, воды – 22,22 молей, углекислого газа – 5,385 молей.

Определяем суммарное число молей:

$$N = 5,385 \text{ CO}_2 + (2,69 + 22,22) \text{ H}_2\text{O} + 41,2 = 71,5 \text{ молей.}$$

Из уравнения Менделеева-Клапейрона определяем необходимый объем реактора:

$$PV = \frac{M}{\mu} RT \quad 24 \text{ Мпа} (V_1 + V_2 + V_3) = \frac{M_{1,2,3}}{\mu_{1,2,3}} RT, \text{ откуда}$$

$$V_1 = \frac{M_1}{\mu_1} RT / 24 \text{ Мпа}; \quad V_2 = \frac{M_2}{\mu_2} RT / 24 \text{ Мпа}; \quad V_3 = \frac{M_3}{\mu_3} RT / 24 \text{ Мпа};$$

$$\text{Или } V_1 = \frac{1,193 \text{ кг}}{29 \times 10^{-3} \text{ кг/моль}} \times 8,31 \frac{\text{Нм}}{\text{моль}^\circ\text{К}} \times \frac{873^\circ\text{К}}{24 \times 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}} = 2,43 \text{ м}^{-3} \text{ воздуха,}$$

$$V_2 = \frac{70 \times 10^{-3} \text{ кг}}{13 \times 10^{-3} \text{ кг/моль}} \times 8,31 \frac{\text{Нм}}{\text{моль}^\circ\text{К}} \times \frac{873^\circ\text{К}}{24 \times 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}} = 1,63 \text{ м}^{-3} \text{ углекислого газа,}$$

$$V_3 = \frac{400 \times 10^{-3} \text{ кг}}{18 \times 10^{-3} \text{ кг/моль}} \times 8,31 \frac{\text{Нм}}{\text{моль}^\circ\text{К}} \times \frac{873^\circ\text{К}}{24 \times 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}} = 7,53 \text{ м}^{-3} \text{ пар.}$$

Таким образом, для секундного расхода указанного количества реагентов потребуется реактор объемом $V=21,59 \text{ м}^3$. При проверке правильности проделанных расчетов нужно подставить в уравнение Менделеева-Клапейрона суммарное количество молей и произвести расчет объема. Результаты расчетов должны совпадать.

Для реакций более медленных, этот объем необходимо умножить на отношение скоростей реакций: истинной к расчетной, заложенной в этом расчете –

$\frac{V_{\text{ист.}}}{V_{\text{расч.}}}$

Зная истинную скорость реакций конкретных реагентов нужно указать в

техническом задании для разработчиков оборудования необходимый общий объем реактора, полученный из этого соотношения, для того чтобы они, исходя из условий прочности, безопасности, стоимости, условий эксплуатации, энергозатрат и других факторов, могли определиться с числом и габаритами реальных реакторов промышленной установки, ее конфигурации и оснастить ее нужными комплектующими.

После определения габаритов расчетного реактора на основании предыдущих результатов, дальнейший расчет реактора установки должен проводиться в части его прочностных характеристик в условиях эксплуатации.

Рассмотрим возможные теплотехнические методы обеспечения процессов окисления и их расчеты.

Теплотехнические расчеты рабочего режима реактора СКГО

Для обеспечения рабочего режима реактора, позволяющего окислять заданный объем реагентов с нужным качеством, необходимо вывести его на этот режим, т. е. нагреть реагенты до рабочей температуры, создать в реакторе нужное давление, а также подать реагенты в рабочую зону и вывести продукты окисления из рабочей зоны. При этом в случае эндотермических реакций или недостатка тепла по причине обедненности исходных смесей в реакционную зону, необходимо недостающее тепло подвести, а в случае избытка тепла, при неизменной производительности, суметь отвести это тепло из рабочей зоны. Уже из этой задачи становится понятно, что реактор, помимо габаритных и проч-

ностных характеристик, должен иметь и соответствующие теплотехнические свойства, которые можно обеспечить либо подбором материалов, либо конструктивными приемами.

В настоящее время получила распространение схема внешнего подвода тепла в реакторную зону: реакторная зона нагревается через корпус реактора, т. е. нагреватели располагаются с внешней стороны корпуса и тепло через стенки поступает в реакционную зону. Эта схема привлекательна тем, что позволяет использовать самые различные типы нагревателей как по конструкции, так и по мощности, кроме того, она ремонтпригодна в различных условиях эксплуатации и реактор может быть выполнен с неразъемными сферическими головками, что уменьшает вероятность утечек из реакторной зоны и снижает тепломеханические напряжения в корпусе реактора.

Однако такая схема нагрева реакционной зоны обладает и существенными недостатками: прежде всего, она при рабочих температурах даже у жаропрочных сталей понижает прочность корпуса в 1,5÷2,5 раза, что вынуждает пропорционально снижать рабочее давление и температуру с потерей тех преимуществ, описанных выше, которые они дают; увеличивает время выхода на режим, что ведет к повышению уровня энергозатрат и, пожалуй, самое главное, при эндотермических и малоэнергетических реакциях не позволяет подать в реакционную зону достаточного количества тепла для обеспечения нужной производительности, что вынуждает увеличивать число установок для переработки заданного количества обезвреживаемого вещества. Кроме того, такая схема ограничивает и область применения технологии СКГО, так как для окисления наиболее стойких загрязнителей с нужной производительностью уровень используемых параметров может оказаться недостаточным, а поднять их не позволяет схема нагрева. Выход из такого положения мог быть найден в переходе к схемам внутреннего нагрева реакционной зоны, но это является предметом дальнейших наших исследований, а сейчас продолжим рассмотрение схемы внешнего нагрева реакционной зоны на условном примере окисления органики состава СН при вышеобозначенных параметрах.

Определение тепловых затрат для обеспечения рабочего режима установки

Нагрев воды, поданной в реактор:

$$Q = Q_n \beta + Q_r + Q_{c.k.}$$

где $Q_n \beta$ - это количество тепла, необходимое для нагрева воды до температуры кипения, Q_r - количество тепла, необходимое для испарения воды в точке кипения, точка кипения - это критическая температура воды при давлении равном 225,2 кг/см², т.е. 374,4°С, $Q_{c.k.}$ - количество тепла, необходимое для нагрева пара от точки кипения до 600°С. По справочным данным, теплосодержание воды i при 10°С (температура воды, поступающей для подготовки суспензии) равна 10 ккал/г, а теплосодержание i около точки критической температуры - 374,4°С равна 411 ккал/г, следовательно, на нагрев воды секундного расхода уйдет:

$$Q_n \beta = (411 - 10) \times 400 = 160400 \text{ ккал/с.}$$

Теплота парообразования при $T_{кр}$ $Q_r = 27,4 \times 400 = 10600$ ккал/с нагрев пара от точки кипения до рабочей температуры 600°С.

$$Q_{c.k.} = i_{раб} - i_{кр} = (842,7 - 607) \times 400 = 94280 \text{ ккал/с,}$$

откуда $Q = 160,4 + 10,6 + 9403 = 265,3$ ккал/с.

Нагрев сухого вещества: условно принимаем его теплоемкость равной теплоемкости парафина, т.е. 0,216 ккал/г °С, тогда

$$Q_{c.в} = 0,216 \times (600 - 10) \times 70 = 8920,8 \text{ ккал/с.}$$

Теплоту нагрева подаваемого воздуха определяем по разнице энтальпий сухого воздуха, приведенных в «Справочнике машиностроителя» под ред. д.т.н. профессора Вукаловича М.П. и др.:

$$Q_{\text{взд}} = (I_{600^{\circ}\text{C}} - I_{10^{\circ}\text{C}}) \times 1193 = (287,9 - 4,5) \times 1193 = 338,096 \text{ ккал/с.}$$

Общее количество тепла, которое необходимо подвести к реакционной зоне для поддержания эндотермической реакции внутри реактора:

$$Q_{\text{общ}} = Q + Q_{\text{с.в.}} + Q_{\text{взд}} = 265,3 + 8,92 + 338,1 = 612,32 \text{ ккал/с} = 2571,74 \text{ кВт.}$$

Определение необходимой площади теплопередачи

Коэффициент теплопроводности хромоникелевых жаропрочных сталей л выбираем по тому же справочнику для средней температуры стенки реактора

$$T_{\text{ср}} = 700^{\circ}\text{C} = \frac{(T_1 - T_2)}{2},$$

где T_1 – температура 800°C стенки реактора со стороны нагревателей, а T_2 – 600°C – температура рабочей зоны. Габариты реактора были определены нами исходя из кинетических и прочностных расчетов. Теперь необходимо убедиться в том, что полученные габариты реактора позволяют обеспечить выше рассчитанный поток тепла при заданных условиях нагрева реактора. Вычисляем удельный тепловой поток через стенку реактора толщиной $\delta = 20$ мм, полученной в результате прочностного расчета при внешнем диаметре реактора $\Phi = 170$ мм и высоте реактора 1620 мм (исходя из полученного объема – $21,6\text{ м}^3$).

Удельный тепловой поток

$$q \frac{\lambda}{\delta} \Delta t = 52,5 \text{ ккал/м}^2\text{с.}$$

Площадь поверхности нагрева реактора $S = \pi D H = 0,865 \text{ м}^2$, следовательно, внутрь реактора мы можем передать количество теплоты

$$Q = 0,865 \text{ м}^2 \times 52,5 \text{ ккал/м}^2\text{с} = 45,4 \text{ ккал/с.}$$

Так как для поддержания заданной скорости реакции (производительности реактора) нужно подавать в зону эндотермической реакции $612,32$ ккал/с, то без дополнительных мер с таким реактором нам не удастся достигнуть заданной производительности. Для выхода на заданную производительность можно

либо увеличить высоту реактора в 13,5 раз ($\frac{612,32}{45,4} \text{ ккал/с}$), так как увеличение

диаметра невозможно по прочностным характеристикам, либо увеличить число реакторов в такое же кол-во раз, либо перейти на внутренний нагрев реакционной зоны; добиться повышения ДТ и работать с большим перепадом температур или, наконец, осуществить в реакторе комбинированную реакцию: эндотермическую и реакцию с выделением тепла. Возможны и другие меры для достижения заданной производительности.

Остается произвести расчеты энергозатрат на подачу реагентов в реактор и определиться с тепловыми потерями всей установки, которые будут зависеть от ее конструктивных особенностей.

Это необходимо для определения общего энергопотребления участка СКГО. Процесс подачи окислителя (воздуха) будет носить в общем случае политропический характер, но с учетом применения высокооборотных компрессоров, например, плунжерного типа, без больших погрешностей можно допустить, что процесс сжатия осуществляется по адиабате. Это допущение избавит от необходимости определения показателя политропы и упростит расчеты. Из технической термодинамики известна формула работы по адиабатическому сжатию газа:

$$l = \frac{1}{K - 1} (P_1 V_1 - P_2 V_2),$$

где выражение в скобках, соответственно, начальные давление и объем и их конечные значения, причем, если режим работы установки циклический, то V_2 – парциальное давление воздуха в реакторе, равное в рассматриваемом случае

его молярной доле от общего числа молей реагентов в реакторе, т.е. $(1,12:71,5) \times 300 = 172,5$ атм, K – показатель адиабаты равный 1,4. Расчет по этой формуле дает следующее значение величины работы подачи воздуха в реактор:

$$\frac{1}{1,4 - 1} \left(\frac{1 \text{ кг}}{\text{м}^2 \times 10^{-4}} \times 0,93 \text{ м}^3 - \frac{172,5 \text{ кг}}{\text{м}^2 \times 10^{-4}} \times 21,6 \times 10^{-3} \text{ м}^3 \right) = 685,02 \text{ кВт}$$

Если осуществлять подачу воздуха в реактор с помощью компрессора с электроприводом, имеющим кпд в пределах 0,9, то затраты электроэнергии на этой операции возрастут до $685,02/0,9 = 761,13$ кВт.

Остается определить затраты электроэнергии на подачу в зону реакции водной суспензии исходных веществ. Это удобнее всего сделать на основании паспортных характеристик используемых для этого насосов. Так, если использовать насосы аналогичные насосам фирмы ООО «АРЕОПАГ» НД 2.5 120/400К14В с производительностью 120 л/час и давлением до 400 атм, с мощностью привода - 4 кВт, то для подачи всего объема суспензии при давлении 330 атм понадобится электрическая мощность:

$$N = \frac{470}{33,3} \times \frac{330}{400} \times 4 = 46,6 \text{ кВт}$$

Наконец, мы должны определиться с потерями тепла в окружающее пространство. Поскольку эти потери целиком зависят от конструктивной схемы установки, то можно в техническом задании на проектирование установки ограничить эти потери величиной, не превышающей 0,5–1,5% от мощности нагрева реактора, т.е. $Q_{\text{пот}} = (0,5 - 1,5) Q_{\text{общ}}$

$$\Sigma N = Q_{\text{общ}} + L + N + Q_{\text{пот}} = 3315,75 \text{ кВт}$$

Общая мощность, подводимая к участку СКГО, должна быть не ниже расчетной, равной сумме вышеопределенных величин.

Выводы

1. Приведенная методика расчета реактора СКГО показывает, что в случае использования экзотермических реакций для работы реактора, затраты энергии на их поддержание могут быть сведены к нулю и даже получен положительный выход.

2. Разработанная методика позволяет конкретизировать технические задания на разработку оборудования по реализации технологии СКГО.

Работа выполнена в рамках государственного контракта №14.BBB.21.0047 от 02.06.2014 г. с Минобрнауки РФ.

The method of calculation of the reactor SCWO

V. S. Grigoriev, Deputy head of the Innovation centre, doctor t.s., professor, N.S. Milovanov, leading engineer, A.A. Polyakova, graduate (All-russian Research Institute for the Agricultural Machines and Harvester Engineering Technology and Service of the Russian Academy of Agricultural Sciences), Moscow, (495) 989-18-07, 1117731@mail.ru

Annotation. The article considers the possibility of providing reactions disposal a wide range of persistent environmentally harmful substances on the basis of supercritical water environment and compressed air as an oxidant.

Defined energy consumption for endothermic reaction of oxidation. Allows to produce light energy conversion in the case of the reaction of producing heat and the required concentration of the initial reagents.

Keywords: reactor pressure, supercritical state, reaction speed, oxidation, oxidizer, environmental security, activation energy, temperature, dielectric permittivity of the medium, density, reagents.