

## Разработка конструкции многотрубного реактора сверхкритической гидротермальной деструкции органических отходов

Н.С. Милованов, вед. инженер,  
А.И. Феоктистов, научн. сотрудник,  
В.С. Григорьев, вед. Научн. сотрудник, д-р техн.наук, профессор,  
А.А. Володина, аспирант  
(ФГБНУ ГОСНИТИ - Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка», Москва, (495) 989-18-07, 1117731@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрены возможности оптимизации теплообмена в реакторе сверхкритического гидротермального окисления органосодержащих веществ при использовании нового типа многотрубного реактора.

**Ключевые слова:** сверхкритическая водная среда, гидротермальное окисление, многотрубный реактор, поверхность теплообмена, безопасность процесса.

Цель исследования – изыскание конструкторских решений и разработка реактора гидротермальной деструкции органических отходов нового типа устройства с улучшенными эксплуатационными и экономическими характеристиками.

Методика исследования заключается в оценке технических и технологических путей усовершенствования существующей конструкции однотрубного реактора с целью снижения габаритов установки, улучшения теплообмена и повышения производственной безопасности при его эксплуатации при сверхкритических параметрах воды.

Состояние вопроса

Эффективность любых технологий, в том числе и технологий сверхкритического гидротермального окисления (СКГО), во многом зависит от состава используемого оборудования. Отличительной особенностью режимов, используемых в сверхкритических гидротермальных технологиях, является высокая напряженность рабочих параметров реактора, так как сама сверхкритическая водная среда гарантированно достижима лишь при давлениях свыше 220 атм и температуре не ниже 374°C. Автотермические и аллотермические режимы в целях увеличения производительности и полноты процессов деструкции органосодержащих веществ требуют более высоких значений указанных параметров, что обуславливает технические и технологические трудности их поддержания. Это, прежде всего, трудности энергообеспечения эндотермических процессов и деструкции обедненных органикой водных растворов, эмульсий и суспензий; трудности в комплектовании установок дорогостоящим высоконапорным гидравлическим и пневматическим оборудованием необходимой производительности и ресурса; проблемы обеспечения герметичности многочисленных соединений между узлами, агрегатами, приборами контроля и управления; обеспечение безопасности эксплуатации установок. Это минимальный набор требований, которым должно соответствовать оборудование, реализующее технологии СКГО. Задачами настоящего исследования являются оптимизация требований, которым должно соответствовать оборудование, реализующее технологии СКГО, рассмотрение возможных путей технического решения

существующих проблем, выбор наиболее приемлемых решений для создания реактора нового типа.

Трудности энергообеспечения эндотермических процессов помимо больших удельных затрат тепловой энергии сопряжены с необходимостью подачи требуемого количества теплоты в реакторную зону. При внешнем способе нагрева внутриреакторного пространства возникает противоречие между необходимостью уменьшать объем этого пространства в целях уменьшения нагрузок на нагретые стенки реактора при фиксированном давлении и необходимостью увеличивать это пространство с целью увеличения поверхности нагрева. Разрешение противоречия лежит в увеличении перепада температур между наружной и внутренней стенками реактора согласно известной из теплотехники формуле:

$Q = C * S * (T_1 - T_2)$ , где  $Q$  – количество тепла,  $C$  – удельный тепловой поток, вычисляемый по формуле  $C = G * \lambda / \delta * \alpha * (T_1 - T_2)$  – значение удельного потока ( $C$ ), определяется из справочника для выбранного материала стенки,  $S$  – поверхность реактора,  $\delta$  – толщина стенки реактора, а выражение в скобках  $(T_1 - T_2)$  – перепад температур между наружной и внутренней поверхностями реактора. Для многих обезвреживаемых с помощью гидро-термальных технологий веществ температура  $T_2$  внутри реактора должна быть порядка 500-550 $^{\circ}$ C, приближаясь по своему значению к температуре наружной поверхности стенки реактора  $T_1$ , что не позволяет существенно повысить количество подаваемого внутрь реактора тепла вследствие небольшого значения этой величины. Можно увеличивать поверхность реактора  $S$ , что означает рост габаритов реактора. Исходя из прочностных характеристик, рост габаритов реактора возможен в основном лишь в высоту. Так для реактора производительностью 6 т/сутки [1] высота реактора должна быть увеличена в 13 раз т.е. с 1,6 м до 21м для того, чтобы при перепаде температур  $(T_1 - T_2) = 200^{\circ}$ C создать достаточную поверхность теплообмена. Поместить такой реактор в помещение, где он должен эксплуатироваться в составе установки СКГО весьма проблематично. Установка же реактора в горизонтальном положении невозможна по условиям технологии процесса. Для решения проблемы теплопередачи можно увеличивать количество аналогичных реакторов, или искать другие технологические или конструкторские решения. Увеличения количества реакторов ведет к пропорциональному росту числа дорогостоящих комплектующих (компрессорного и насосного оборудования высокого давления, гидравлических и пневматических клапанов, вентилей высокого давления, приборов контроля и управления) и необходимых для них производственных площадей. Кроме того, каждый реактор обслуживается более чем сотней различных соединений, с обеспечивающими его работу приборами и агрегатами, число которых возрастает пропорционально числу реакторов, что неизбежно снижает надежность установки в целом в условиях жестких режимов эксплуатации. Кроме того, растут эксплуатационные расходы, в том числе и на возрастающее количество обслуживающего персонала. Такой вариант решения рассматриваемой технической проблемы является нежелательным.

Для снижения энергопотребления реактором при протекании автотермических процессов можно перейти от окисления воздухом к окислению концентрированной перекисью водорода. Это уменьшит подаваемую в реактор инертную массу в виде бесполезного для протекания реакции азота воздуха, что снизит общую массу нагрева и уровень потребления энергии в соотношении:  $M_1 * \mu_2 / M_2 * \mu_1$  где  $M_1$  – удельный расход воздуха,  $\mu_1$  – молекулярная масса воздуха,  $M_2$  – удельный расход перекиси водорода,  $\mu_2$  – молекулярный вес перекиси водорода. Существенный результат по снижению

энергопотребления могут дать мероприятия по обогащению дополнительным «топливом» бедных органикой водных смесей.

Среди технологических средств обеспечения необходимого уровня теплообмена следует отметить, как одно из эффективных, совместное окисление в реакторе СКГО двух и более подлежащих уничтожению веществ, одно из которых окисляется с выделением требуемого количества тепла. В этом случае общая поверхность теплообмена может быть сбалансирована с общим объемом реактора установки СКГО, соответствующему объему, определяемому формулой Менделеева-Клапейрона:

$P \cdot V = M \cdot R \cdot T / \mu$ , где  $P$  – давление,  $V$  – объем,  $M$  – масса,  $R$  – газовая постоянная,  $T$  – температура,  $\mu$  – молекулярный вес.

Результаты и их обсуждение

Наибольшего эффекта в решении проблемы теплообмена можно добиться конструкторскими решениями при совершенствовании устройства реактора СКГО. Предлагается для увеличения общей поверхности теплообмена создание более мелких объемов реакторов внутри большего объема. В основе разработки лежит замена однотрубного рабочего объема реактора на несколько объединенных, более мелких, для получения требуемой поверхности теплообмена. Такое конструктивное решение позволяет увеличить температуру внутри реактора, приблизив ее к температуре внешней поверхности стенки реактора, при сохранении производительности. При такой конфигурации мы переходим от однотрубных реакторов к новому типу конструкций реакторов - многотрубным реакторам [2].

На рис.1 и рис.2 представлен один из вариантов устройства многотрубного реактора (вид сверху (рис.1) и устройство головной части многотрубного реактора (рис.2)).



Рис. 1. Многотрубный реактор. Вид сверху

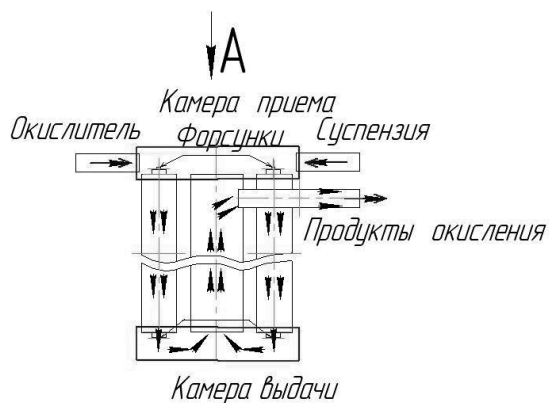
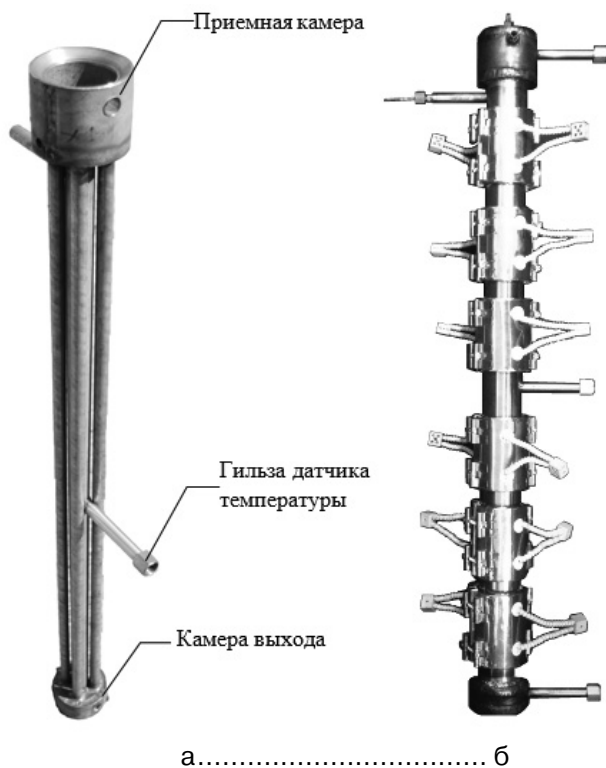


Рис.2. Устройство головной части многотрубного реактора



а..... б  
а - соединение труб и камер, б – монтаж нагревательных элементов  
Рис. 3. Многотрубный реактор

Многотрубный реактор представляет собой конструкцию из многих однотрубных реакторов малого объема, объединенных в единый блок. Общий объем блока малых реакторов соответствует объему, рассчитанному по формуле Менделеева-Клапейрона, для заданной производительности с поверхностью теплообмена этого объема в соответствии требуемой теплопередаче. При такой конструкции решается и проблема безопасности в условиях промышленной эксплуатации. Поскольку каждый малый объем изолирован от других объемов форсунками-жиклерами, то в аварийном случае разрыва одного из составляющих малых объемов нет необходимости опасаться серьезных последствий из-за его незначительного объема.

Остальные объемы плавно снизят через свои жиклеры высокое давление до атмосферного, не причинив вреда обслуживающему персоналу.

При использовании многотрубного реактора для обеспечения одинаковой мощности с однотрубным реактором резко снижается число возможных соединений и трубопроводов, что облегчает эксплуатацию установки, повышает надежность её работы при снижении стоимости установки СКГО пропорционально числу форсунок многотрубного реактора.

Повышение надежности работы установки СКГО с многотрубными реакторами связано с наличием множества подающих форсунок (по числу трубок, образующих общий рабочий объем). В случае засорения одной из них нет необходимости останавливать работу установки, как в однотрубном реакторе, так как подача реакционной смеси распределится между остальными работающими форсунками, а очистку засорившейся форсунки можно отложить до технологического перерыва.

Результатом выбора этого направления развития технологии СКГО явилась разработка документации и изготовление по ней экспериментального образца многотрубного реактора для отработки режимов деструкции органических веществ.

Для достижения максимальной производительности реакторов СКГО, а также для работы со стойкими органическими загрязнителями, подлежащими уничтожению, требуется повысить температуру внутри реактора на 250 – 300 С и давление до 350 – 400 атм. Решение такой задачи следует искать в переходе от схем с внешним нагревом реактора к конструктивным схемам с внутренним нагревом.

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности дальнейшего развития технологий СКГО как в части обеспечения повышенных параметров процессов, так и в части разработки все более надежных, производительных и безопасных в эксплуатации типов реакторов для сверхкритических гидротермальных технологий.

### **Выводы**

Разработанная конструкция многотрубного реактора существенно расширяет температурные и барометрические эксплуатационные характеристики. Появляется возможность осуществления процессов деструкции органических веществ и отходов в многотрубном реакторе при температуре порядка 700оС и давлениях 350-400 атм.

Проведенные гидравлические испытания при давлении 550 атм разработанного пятирубного реактора высотой 1 м подтвердили его надежность и работоспособность.

### **Литература**

Григорьев В.С., Милованов Н.С., Полякова А.А. Методика расчета реактора сверхкритического гидротермального окисления // Труды ГОСНИТИ. – 2014. –Т.116. – С. 31-40.

Мазалов Ю.А., Григорьев В.С., Феоктистов А.И. и др. Многотрубный реактор для проведения химических реакций при сверхкритических параметрах водной среды // Заявка на полезную модель РФ № 2015118606. 2015.

### **Problems and ways of development of supercritical technologies hydrothermal oxidation**

Milovanov N.S., leading engineer, Feoktistov A.I., researcher,  
Grigoryev V. S., leading researcher, doctor t.s., professor,  
Volodina A.A., 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 optimization heat transfer in the reactor supercritical hydrothermal oxidation of organic substances using a new type of tube bundle reactor.*

**Keywords:** *supercritical water, hydrothermal oxidation, the tube bundle reactor and the heat exchange surface, the safety process.*

#### **Literature**

1. Grigoryev V.S., Milovanov N.S., Polyakova A.A. Method of calculation of the reactor supercritical hydrothermal oxidation // Proceedings GOSNITI, T. 116, 2014. – P. 31-40.
2. Mazalov J.A., Grigoryev V.S., Feoktistov A.I. etc. Tube bundle reactor for carrying out chemical reactions under supercritical water environment // Application for utility model RF № 2015118606. 2015.