

# КОМПОЗИЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ИМПУЛЬСНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЖИДКИХ СРЕД

к.т.н. Колпаков А.В.  
УРАН Оренбургский НЦ УрО РАН  
г. Оренбург, Россия

Кавитационная переработка является эффективным энерго- и ресурсосберегающим методом интенсификации технологических процессов (разрушение и очистка твердых тел, растворение, экстрагирование, эмульгирование, гомогенизация, пенообразование, деструкция, пастеризация, дегазация сплошных сред и т.д.) в жидких средах (ЖС) растительного и животного происхождения.

Известно, что высокая эффективность гидродинамической кавитационной переработки ЖС достигается в объеме, ограниченном поверхностями технологического оборудования (трубопроводы, резервуары, каналы рабочих камер статора и ротора, узлы местных гидравлических сопротивлений). Поэтому возникает задача оптимизации конструктивно-режимных и технологических параметров (структурно-параметрический синтез) этого оборудования [1]. Параметрический синтез будет проведен методами математического (имитационная модель, программирование на ЭВМ) и натурального (комплексные испытания, производственный эксперимент) моделирования.

Существующие математические модели с достаточной степенью адекватности описывают многокомпонентные струйные течения жидких сред [2-7]. Однако, для установления корреляции математических моделей с реальными процессами кавитационной гидрогазодинамики необходимо провести натуральное моделирование.

Ключевой задачей является создание стенда для исследования импульсных гидродинамических явлений (SPHP) в жидкодисперсных системах методами оптического, тепловизионного, гидроакустического контроля (рисунок 1).

SPHP выполняет следующие функции:

1. Многофакторные исследования кавитационной переработки ЖС;
2. Промышленное использование SPHP для получения ценных ЖС.

SPHP является сложной системой, предназначенной для энергосберегающей кавитационной переработки материалов природного происхождения (измельченное растительное сырье – опилки деревянные, солома, лузга подсолнечника, гречихи, костра льна; кормовые премиксы; жидкие органические отходы жизнедеятельности человека и животных – навоз свиней и КРС, помет птичий, торф, остатки продуктов питания; сыпучие породы – мел, песок, кварц и т.д.) и химических производств (смеси из гидрофобилизирующих ПАВ; топливные дисперсные системы – мазут, дизельное топливо, бензин, битум, угольная пыль; отработанные токсичные

стоки предприятий и т.д.) в ценные ЖС. Поэтому SPHP должен использоваться в отраслях сельского хозяйства, пищевой и перерабатывающей промышленности страны. Поэтому SPHP может эффективно использоваться в отраслях сельского хозяйства, пищевой и перерабатывающей промышленности как Оренбуржья, так и России [8].

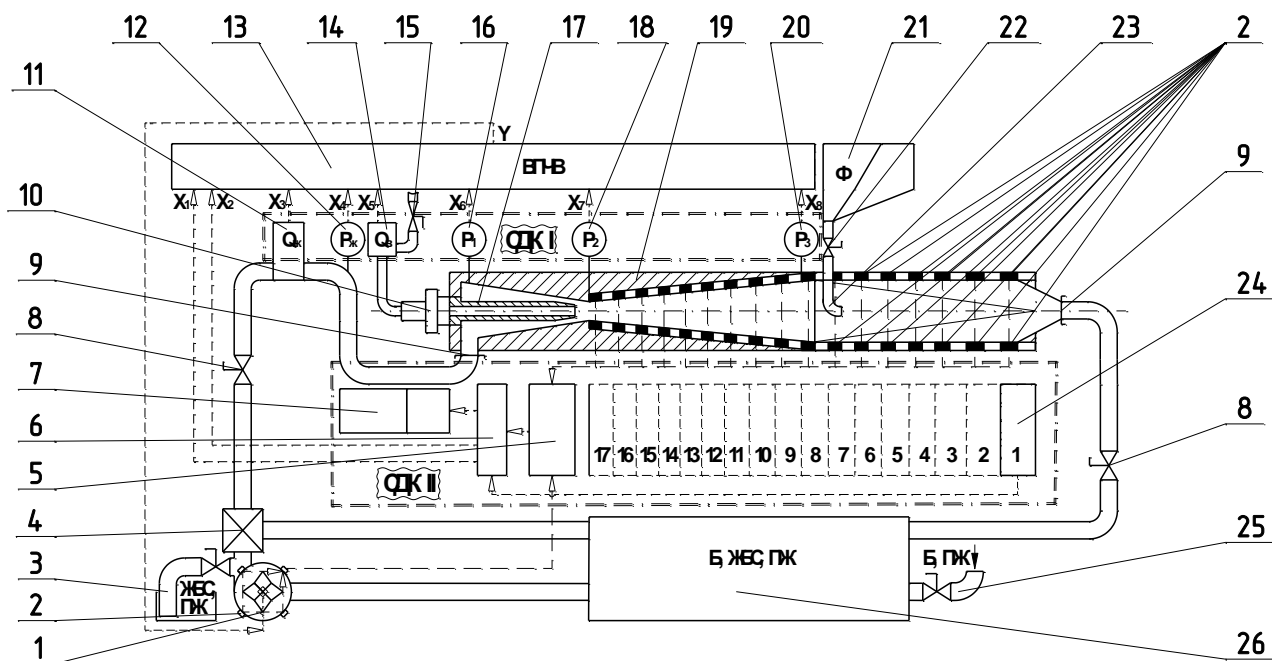


Рисунок 1 – Принципиальная схема стенда для исследований импульсных гидродинамических явлений

1 – роторно-импульсный насос-генератор (RPPG), 2 – оптическая система контроля кавитационной области, 3 – узел слива жидкой дисперсной системы (LDS) и промывочной жидкости (WL), 4 – трехходовой кран, 5 – усилитель сигнала, 6 – устройство контроля и обработки сигналов, 7 – ЭВМ, 8 – регулирующий клапан расхода, 9 – универсальный механизм закрепления кавитаторов, 10 – микрометрическая индикаторная головка, 11 – счетчик расхода, 12 – датчик давления, 13 – векторный преобразователь частоты вращения (VFCT) RPPG, 14 – датчик расхода воздуха, 15 – регулятор расхода просасываемого воздуха, 16,18,20 – датчики давления, 17 – дроссельная полая игла, 19 – импульсное гидродинамическое устройство (кавитатор), 21 – бункер с обрабатываемым материалом, 22 – дроссель расхода материала, 23 – трубка Пито подачи материала, 24 – тепловизионный излучатель, 25 – узел подачи LDS и WL, 26 – резервуар для LDS и WL; I,II – системы датчиков контроля (SSTC I, SSTC II).

С позиции фундаментальных исследований стенд позволяет проводить моделирование нелинейных гидрогазодинамических процессов в струйных и центробежных течениях многокомпонентных жидких сред. Для создания струйных течений могут использоваться кавитаторы (сопла Вентури, гидродинамические свистки и сирены) (позиция 19), а для центробежных течений – роторно-импульсные насосы генераторы RPPG (позиция 1).

Принципиальной новизной стенда в сравнении с существующими аналогами является его оснащение оптической системой контроля (волоконно-оптические датчики давления, разрежения и температуры

интерференционные Фабри-Перо). Оптическая система определяет степень развития кавитации, посредством регистрации изменения рассеивания светового пучка инфракрасного диапазона от противоположной стенки внутренней поверхности кавитационной камеры. Сигнал с оптических датчиков подается на усилитель, затем в устройство контроля и обработки. Возможна визуализация на ЭВМ. Такая система оптического контроля, по сути, определяет степень развития кавитации (средний индекс кавитации). Используя результаты этой системы, можно эффективно управлять параметрами области развития кавитации.

Для этих исследований нами разработан роторно-импульсный насос-генератор (RPPG) на базе типовых схем центробежных и вихревых насосов. Оптимизация конструктивно-режимных параметров (схема расположения и геометрические параметры RPPG, частота вращения ротора, тип и концентрация газожидкостных фаз, давление, подача, температура в камере и т.д.) позволит эффективно управлять пространственно-временными характеристиками поля гидродинамической кавитации.

Объектами исследования выбраны жидкие дисперсные системы (лигнитно-водные суспензии (LWS), водотопливные эмульсии (FWE), рапсовое масло (rapeoil)) в центробежном течении с потенциальным ядром пузырьковых кластеров. Научной новизной является достижение высоких значений градиентов энергии (плотность мощности) при схлопывании пузырьковых кластеров в центробежном течении. Такой подход предполагает создание импульсов давления с амплитудой несколько атмосфер и длительностью порядка нескольких десятков микросекунд, в отличие от аппаратов позволяющих достигать сверхдавление в статическом режиме.

Практической новизной исследований является определение оптимальных конструктивно-режимных параметров RPPG, работающего в режиме наибольшей степени развитости гидродинамической кавитации в объеме рабочей камеры.

За трехлетний период работы сотрудников отдела в этом научном направлении были успешно выполнены следующие этапы исследований:

1. Проведен анализ фундаментальных исследований явления кавитации в жидких средах. Дана классификация эффективных способов возбуждения кавитации. Проведено ранжирование способов возбуждения кавитации по критерию кумуляции энергии высокой плотности при схлопывании пузырьковых кластеров. Сделан вывод о наибольшей эффективности применения импульсного гидродинамического способа возбуждения кавитации в высокопроизводительных химико-технологических процессах деструкции жидких сред.

2. Проведено теоретическое обоснование процесса кавитационного диспергирования жидкой дисперсной системы в RPPG с использованием существующих гипотез субкавитационного диспергирования (Фиалкова Е.А., Ткаченко А.Н.), теорий динамики кавитационного пузырька (Реллея-Плессета, Херринга-Флинна, Кирквуда-Бете), стохастических подходов при

моделировании гомогенизации и диспергирования в аппаратах импульсного действия (Иванец Г.Е., Ядута А.З., Куров В.С., Мидуков Н.П.). Уточнены аналитические зависимости динамики кавитационного пузырька (давление парогазовой смеси, размер и время схлопывания кавитационного пузырька) и коэффициентов интенсивности тепло- и массообменных процессов в центробежном течении с потенциальным ядром кавитирующей жидкости.

3. Разработан инженерный метод композиционного проектирования (прикладные расчеты) SPHP и RPPG [9]. Оптимальное проектное решение удалось достичь в два этапа. На этапе структурного синтеза определены элементы узлов формирующих агрегатную базу гидравлической схемы SPHP (принципиальная схема RPPG и замкнутых коммуникаций, контрольно-измерительные приборы, высокоточное оборудование). На этапе параметрического синтеза SPHP принимает облик максимально эффективного объекта (проводится оптимизация конструкции RPPG и замкнутых коммуникаций SPHP).

Эффективным способом формирования технического облика RPPG является разработка опорного объекта. В качестве опорного объекта предложена новая технология периодически возбуждаемой импульсной гидродинамической кавитации с амплитудой пульсации давления несколько атмосфер и длительностью несколько десятков микросекунд. Такой режим работы RPPG позволит устойчиво воспроизводить гидродинамическую кавитацию и схлопывание пузырьковых кластеров с высокими градиентами мощности при сверхнизкой длительности импульсов давления в рабочей камере RPPG.

В качестве технической схемы прототипа выбраны существующие разнообразные конструкции роторно-импульсных аппаратов (rotorno-pulsing apparatuses - RPA). Их общим недостатком является невозможность создания напорного потока обрабатываемой жидкости, что приводит к энергозатратам на работу дополнительного нагнетательного насоса перед RPA.

Программа планируемых исследований с использованием SPHP включает три этапа научных экспериментов:

I. Структурно-параметрический синтез конструкции RPPG.

II. Исследования гидродинамики и эжекции при центробежном течении с потенциальным ядром кавитирующей жидкости

III. Исследования фазовых превращений и тепломассообмена в центробежном течении с потенциальным ядром кавитирующей жидкости.

Приведем методологию третьего этапа исследований.

Цель исследований – характеристика (классификация) жидких дисперсных систем, подвергнутых гидродинамической обработке в RPPG (импульсная кавитация). Объекты воздействия – the lignite-water slurries (LWS), dispersive fuel-water emulsions (FWE), рапсового масла (rapeoil).

Задачи:

1. Провести научные эксперименты процесса гидродинамической кавитационной обработки FWE, LWS, rapeoil в RPPG.

#### Методика экспериментов:

1) Подготовить SPHP для гидродинамической кавитационной обработки FWE, LWS, rapeoil.

2) Последовательно провести обработку FWE, LWS, rapeoil способом замкнутой циркуляции на стенде для исследований импульсных гидродинамических явлений (SPHP) в режиме наибольшей степени развитости кавитационной области (определен на втором этапе исследований).

3) Закончить гидродинамическую обработку FWE, LWS, rapeoil, осуществить отбор проб для физико-химического анализа.

Применяемые КИП и высокоточное оборудование: оптическая система контроля световых пучков (интерферометр Фабри-Перо) с датчиками регистрации реологических свойств (плотность, вязкость, температура) жидких дисперсных систем на входе в RPPG и выходе из него.

2. Провести оценку изменения физико-химических свойств после фазовых превращений в жидких дисперсных системах (FWE, LWS, rapeoil) в результате гидродинамических способов обработки.

3. Сравнить эффективность технологического способа обработки с существующими по результатам рассчитанных показателей: физико-химические свойства, устойчивость (стабильность), дисперсность жидких дисперсных систем, коэффициент интенсивности химико-технологического процесса деструкции и удельным энергозатратам. Сделать заключения.

#### Методика 2, 3 задач исследований:

1) Провести оценку устойчивости (стабильности) обработанных FWE, LWS, rapeoil по критериям: динамика изменения плотности и вязкости жидких дисперсных систем за определенный промежуток времени.

2) Определить дисперсность жидких дисперсных систем по критериям: размер дисперсной фазы (диаметр глобул воды в FWE и частиц лигнита в LWS, фракционный состав различной летучести и процентного выхода компонентов), удельная поверхность жидкой дисперсной системы.

3) Оценка изменения температуры и pH жидких дисперсных систем.

4) Оценка интенсивности химико-технологических процессов по коэффициентам теплообмена и массопередачи.

5) Сравнение удельных энергозатрат гидродинамического кавитационного способов обработки LWS, FWE.

#### Рассчитываемые оценочные показатели:

1) Критерии эффективности фазовых превращений: устойчивость жидких дисперсных систем по времени от расслоения, дисперсность, температура и pH жидкодисперсных систем.

2) Критерии эффективности теплообмена: коэффициент интенсивности теплообмена и массопередачи химико-технологических процессов.

3) Критерии энергоэффективности сравниваемых способов обработки: удельные энергозатраты на обработку FWE, LWS, rapeoil в RPPG.

Применяемые КИП и высокоточное оборудование: биметаллические температурные датчики накладного (медная пластина) типа и волоконно-оптические интерференционные датчики температуры Фабри-Перо (в составе SPHP) (поз. 2); массовый кориолисовский расходомер высокой точности измерения расхода и плотности газожидкостной среды (поз. 11); ротационный вискозиметр жидких многофазных сред; рефрактометр оптического состояния жидкой среды; инфракрасный Фурье-спектрометр, фотометр для параметров качества жидких и твердых сред (измерение концентрации ионов в водных растворах, коэффициента светопропускания, оптической плотности).

Ожидаемые результаты:

1) **Фундаментальные:** установление закономерностей изменения физико-химических свойств жидких дисперсных системах, подвергнутых импульсной гидродинамической кавитации.

2) **Прикладные:**

– увеличение сроков сохранения устойчивости (стабильности) жидких дисперсных систем без применения ПАВ, эмульгаторов и экологически вредных катализаторов;

– повышение интенсивности химико-технологических процессов в жидких дисперсных системах, за счет фазовых превращений;

– снижение удельных энергозатрат импульсного кавитационного и гидромеханического способов обработки жидких дисперсных сред;

– улучшение стабильности процесса сгорания FWE, LWS, garoöl в двигателях мобильных энергетических средствах. Добавление воды в FWE при гидродинамической кавитационной обработке от 20 до 50 % позволит достичь существенных экономических эффектов – повышение к.п.д. на 3-5%, снижение эмиссии загрязняющих веществ ( $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , сажа, бензапирен) в атмосферу, снизить себестоимость тепловой и электрической энергии.

– уменьшение расхода мазута на 20-25% при сжигании в промышленных установках, за счет добавления качественных угле-мазутных и водоугольных суспензий. Обработка LWS импульсным кавитационным способом позволит снизить вредные выбросы, утилизировать угольный шлам скопившийся на производственных предприятиях, снизить себестоимость получения тепловой и электрической энергии.

Прирост прибыли за счет снижения себестоимости производства новых видов топлив обработанных гидродинамическим способом в RPPG по предварительным оценкам составляет 20-25%. При этом улучшение экологических показателей, за счет снижения газовых выбросов после сжигания FWE, LWS, garoöl нами не учитывалось.

Полученные результаты прикладных и фундаментальных исследований импульсной кавитационной технологии обработки жидких дисперсных систем позволят значительно повысить рентабельность производства многих отраслей промышленности и сельского хозяйства.

По нашему мнению перспективные направления использования такой технологии обработки жидких сред в RPPG следующие: импульсная технология обеззараживания и дистиллирования загрязненной воды, кавитационная технология очистки поверхностей от прочных механических загрязнений, импульсная технология консервации пищевых и биологически активных эмульсий и суспензий, импульсная технология интенсификации процессов растворения и экстрагирования продуктов микробиологического синтеза (пектин, каротин, танин и др.) из сырья растительного происхождения, технология импульсной переработки растительных масел (рапсового, подсолнечного), кавитационная технология переработки отходов растениеводства для сельскохозяйственного кормопроизводства, импульсная технология получения органоминеральных удобрений из растительных отходов, импульсная технология переработки жидких сельхозотходов, импульсная технология производства биогаза, импульсная технология обогрева помещений, импульсная технология измельчения волокнистых и сыпучих материалов, импульсная технология получения дисперсионных водотопливных систем [10].

Нами составлен план прикладного композиционного проектирования технологических объектов (для создания) многокомпонентного струйного и центробежного течений.

1) Методика обоснования технологической схемы импульсно-гидродинамических течений (структурная оптимизация):

– постановка цели и задач технических объектов;

– формирование концептуального облика объектов (стенд для исследования импульсных гидродинамических явлений в двухфазных средах, гидродинамический генератор кавитации, устройство для промывки молокопровода и пр.) – технологические схемы течения многокомпонентной жидкой среды;

– формирование технического облика объектов (разработка опорного объекта) включает задачи: создание принципиальных (выбор узловых элементов) схем и кинематических схем (определение достоверных внутренних связей и реальные ограничения в конструкции) экспериментального стенда и технических устройств.

2) Методика конструирования многосопловых эжекционных аппаратов струйного и центробежного течений (параметрическая оптимизация объектов):

– определение рациональных (расчет оптимальных конструктивных параметров) форм сопел Вентури для свободно истекающих струйных и центробежных течений в технологических линиях АПК (молокопроводы, аппараты импульсно-гидродинамической многофакторной переработки воды, молока, растительных масел);

– определение рациональных характеристик процесса эжекции в струйных и центробежных течениях для технических устройств АПК

(центробежный гидродинамический генератор кавитации, устройство для промывки молокопровода).

Таким образом, созданный стенд для исследований импульсных гидродинамических явлений позволит получить новые фундаментальные результаты явлений теплообмена в гидродинамическом кавитационном поле и прикладные результаты для экономики региона и страны – новая перспективная технология интенсификации химико-технологических процессов в жидких многофазных средах.

#### Литература:

1. Карташов Л.П., Зубкова Т.М. Параметрический и структурный синтез технологических объектов на основе системного подхода и математического моделирования. Екатеринбург: УрО РАН. – 2009 – 225 с.
2. Холранов Л.Р., Запорожец Е.П., Зиберт Г.К., и др. Математическое моделирование нелинейных термогазодинамических процессов в многокомпонентных струйных течениях. – М.: Наука. – 1998. – 320 с.
3. Червяков В.М, Юдаев В.Ф. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах. – М.: Изд. Машиностроение-1, 2007. – 128 с.
4. Промтов М.А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 136 с.
5. Долинский А.А. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях. – К.: ИТТФ НАНУ, 1996. – 206 с.
6. Витенько Т.Н., Гумницкий Я.М. Массообмен при растворении твердых тел с использованием гидродинамических кавитационных устройств // Теор. основы хим. технологии. 2006. Т. 40. – № 6. – С. 639-644.
7. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 668 с.
8. Карташов Л.П., Колпаков А.В. Перспективы применения энергосберегающей кавитационной обработки материалов в технологических процессах АПК // Труды 7-й Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». – М.: ГНУ ВИЭСХ. – 2010. – Ч. 1. – С. 132-138.
9. Карташов Л.П., Колпаков А.В. Исследование теплообменных процессов в жидких биологических средах при импульсной гидродинамической переработке // Труды 14-й Международной научно-технической конференции «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС В ЖИВОТНОВОДСТВЕ – ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МОДЕРНИЗАЦИЯ В ОТРАСЛИ» – М.: ГНУ ВНИИМЖ. – 2011. – Т. 22. Ч. 2. – С. 105-115.
10. Карташов Л.П., Колпаков А.В. Перспективы применения энергосберегающей кавитационной обработки материалов в технологических процессах АПК // Труды 7-й Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». – М.: ГНУ ВИЭСХ. – 2010. – Ч. 1. – С. 132-138.