

## Топливные эмульсии: проблемы и перспективы

УДК 621.436.0

### Аннотация

Проанализированы причины недостаточно широкого использования водотопливных эмульсий в российской теплоэнергетике. Рассказывается о вновь созданной и успешно опробованной (путём сжигания в котле полученного топлива) Системе Приготовления жидких Топлив, способной расширить области использования топливных эмульсий. СПТ осуществляет фильтрацию и подогрев компонентов топлива, его дозированное обводнение и *диспергирование* с образованием Сверхстойких Водно -Топливных Эмульсий (СВТЭ), а также подогрев эмульсионного топлива до оптимальной для сжигания температуры. СВТЭ получена путём прокачки смеси исходных компонентов через *волновой диспергатор* (в корпусе которого на неподвижной оси вращаются под действием потока топлива две турбины в противоположных направлениях). Высокие характеристики дисперсности СВТЭ подтверждены микроскопическими наблюдениями в Национальном ядерном центре (г. Астана, Республика Казахстан). Стойкость к расслоению эмульгированного топлива доказана автором совместно с Евразийским национальным университетом (ЕНУ) им. Гумилёва (г. Астана) путём центрифугирования, а высокие теплотехнические и экологические свойства – сжиганием на одном из котлов котельной того же Университета.

**Ключевые слова:** энергосбережение, энергоэффективность, теплоэнергетика, жидкие котельные топлива, утилизация углеводородных отходов и промышленных стоков, водотопливные эмульсии, водомазутные эмульсии, стабильность эмульсий, диспергирование, сжигание эмульсионного топлива, экономия топлива, экологический эффект.

### Состояние вопроса

Повышение экономичности и экологической чистоты тепловых установок на жидком топливе очень актуально. Действенным средством достижения этих требований служат топливные эмульсии (ТЭ): вода - мазут, вода - дизельное топливо, вода - мазут - угольная пыль. Изучение водотопливных и, в частности, водомазутных эмульсий (ВМЭ), началось в СССР в 60-х годах прошлого века [1]. Было проведено много теоретических и

прикладных исследований. Расчеты и экспериментальные данные[2-7, 9,10, 12,13] однозначно говорят о том, что перевод котлов на сжигание ВТЭ является целесообразным, т.к. это улучшает как их энергетические показатели, так и экологическую чистоту выбросов. Разумеется, вода не горит (сама по себе!) в составе топливной эмульсии, но водяной пар распадается на радикалы, которые катализируют окислительные реакции при горении топлива. Известно, что скорость цепной химической реакции пропорциональна концентрации активных центров, ведущих процесс. Для обводнённых топлив концентрация таких центров всегда будет больше, чем у необводнённых. С увеличением обводнённости топливной смеси растёт парциальное давление водяных паров и соответственно увеличивается количество диссоциированных молекул водяного пара.

Кроме термической диссоциации паров воды на водород и кислород по уравнению  $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ , возможна диссоциация на водород и гидроксил, то есть существование равновесия  $2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + 2\text{OH}$ .

В процессе горения положительные ионы легко взаимодействуют с нейтральными молекулами, в результате чего образуются свободные радикалы. Так, ионы воды  $\text{H}_2\text{O}^+$ , взаимодействуя с молекулой воды по схеме

$\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$ , дают радикалы  $\text{OH}^-$ .

Свободные радикалы могут также образовываться при рекомбинации положительных ионов с электронами или отрицательными ионами. Выделяющаяся при этом энергия оказывается достаточной для расщепления на радикалы вновь образующихся молекул. Так энергия, выделяющаяся при рекомбинации ионов  $\text{H}_2\text{O}^+$  с электроном, равная 1215 кДж/моль, достаточна для полной атомизации молекул воды так как для расщепления её на 2 атома Н и 1 атом О требуется энергия 918 кДж/моль.

При рекомбинации иона гидроксония  $\text{H}_3\text{O}^+ + e = \text{H}_2\text{O} + \text{H}$ , выделяется энергия, равная 821 кДж/моль, достаточная для полного расщепления  $\text{H}_2\text{O}$  на Н и  $\text{OH}$  [12].

Преимущество водосодержащих топлив перед необводнёнными топливами состоит в том, что даже при низких температурах в зоне пламени они всегда дают более высокие начальные концентрации активных центров атомов и радикалов. Появление в зоне пламени обводнённого топлива большого числа активных центров атомарного водорода Н и гидроксила  $\text{OH}$  может во много раз ускорить реакции окисления и горения

углеводородного топлива в результате развития реакции по цепочно-тепловому механизму. Ускоряющее действие водяных паров в процессе горения окиси углерода объясняется суммарной реакцией  $H_2O + CO = CO_2 + H_2$ , в результате которой возникает легко воспламеняющийся водород. Последующее гомогенное окисление водорода приводит к образованию радикалов  $OH$  и атомов  $H$  и  $O$ , обуславливающих как развитие цепной основной реакции путём процессов

$OH + CO = CO_2 + H$  и  $H + CO + O_2 = CO_2 + OH$ , так и их разветвления

$H + O_2 = O + OH$  и  $O + H_2 = H + OH$ , или  $O + CO + O_2 = CO_2 + O + O$ .

Этим объясняется повышение скорости горения  $CO_2$ , которое всегда имеет место в присутствии водяного пара. Вода является не только инициатором цепей в реакции, но и участвует в развитии самих цепей. Это подтверждается изменением интенсивности свечения, которое наблюдается с увеличением содержания воды в смеси. Кроме того, при сжигании обводнённых топлив, уменьшается дымление, которое вызывается обычным дефицитом кислорода крекинга топлива и выделением свободного углерода, который может сгорать по реакции  $C + H_2O = CO + H_2$ , для осуществления которой необходимо в наличии вблизи крекингующих молекул топлива достаточного количества продуктов сгорания имеющих в своём составе водяные пары. Очевидно, что в обводнённом топливе водяных паров всегда достаточное количество, то есть даже без сгорания  $H_2$  в  $H_2O$ , сгорание  $C$  в  $CO$ , а затем и  $CO$  в  $CO_2$  будет обязательным.

Эмульгирование обводнённых жидких углеводородов обеспечивает возможность утилизации обводнённых стоков мазутных резервуаров, с вводом в хозяйственный оборот всего содержащегося в них мазута. При этом водомазутные эмульсии стабильно горят при содержании воды до 50 объёмных процентов. Диспергирование обводнённых нефтепродуктов позволяет утилизировать жидкие отходы, в том числе подтоварные воды танкеров, нефтеостатки и крекинг-остатки.

Тем не менее, коренные показатели эмульсий, характеризующие их стабильность (неизменность структуры при хранении) за прошедшие полвека изменились мало. Очевидно, это обусловлено исчерпанием технических возможностей используемого для приготовления эмульсий оборудования (роторно-пульсационных аппаратов (РПА) и кавитаторов статического типа), а также экономической нецелесообразностью диспергации эмульсий

магнитострикционными генераторами ультразвука. Здесь надо упомянуть и о «хорошо забытом старом» - Аппаратах Вихревого Слоя, где диспергирование происходит на ферромагнитных иглах во вращающемся электромагнитном поле. Такие диспергаторы поставяет одна российская фирма из Нижнего Новгорода, а также украинская фирма из Полтавы. Но оборудование этого типа не получило широкого распространения по причине высокой удельной энергоёмкости. Быстрый износ ферромагнитных элементов (и переход их в топливо в виде металлических частиц) делает аппараты вихревого слоя проблемными в эксплуатации.

Нельзя признать случайным, что ни в одной из десятков профильных публикаций не освещена детально стойкость ТЭ к расслоению при хранении, применительно к *конкретному* способу их получения. А ведь стабильность структуры ТЭ – важнейший эксплуатационный показатель! Не встречались автору и работы, содержащие подробное технико-экономическое обоснование применения в теплоэнергетике *конкретных* систем приготовления ТЭ, хотя число публикаций на тему ТЭ многократно превышает количество промышленных объектов в России, где ТЭ применяются. Источнику [8], по всей видимости, принадлежит рекорд отрыва от реальности и разительного расхождения заголовка статьи с её содержанием. Вместо топлива авторы экспериментируют с ... минеральным маслом: «... нами проведены эксперименты с водомасляной (минеральное масло) эмульсией при ее приготовлении методом перемешивания... Частота вращения мешалки – 12 об/с. Общее время перемешивания – до 20 мин». Мазут – отличный природный эмульгатор, а минеральное масло – нет. Почему для эмульгирования с водой не было использовано топливо, и кто в дальнейшем станет готовить эмульсию путём перемешивания в течение 20 минут?! Упомянутая статья не единична, её авторы участвуют в конференциях и симпозиумах и позиционируют себя как эксперты в области эмульгированного топлива...

Доклады на симпозиумах и диссертации не убедят промышленников использовать ТЭ, если эмульсии нестабильны, процесс их приготовления сложен и энергоёмок, а диспергатор капризен и ненадёжен. В этом отношении особо показателен источник [11]. Его автор пытается доказать превосходство статического кавитатора (который незначительно отличается от «кавитационного эмульгатора мазута КЭМ» профессора В.И.Кормилицына, придуманного двадцать лет назад). Но о том, что такой диспергатор ненадёжен в работе (имеет очень узкие проходные каналы, склонные к засорению), а его перенастройка на мазут другой партии по силам разве что кандидату наук, в диссертации - ни слова. Впрочем, с РПА дела обстоят не лучше. РПА - диспергаторы с

электроприводным ротором, имеющим минимальный зазор со статором – тоже достигли предела своего развития. РПА также склонны к засорению при эксплуатации (но, в отличие от «косметизированного» КЭМа, засорение РПА не только нарушает процесс диспергации, но и приводит к заклиниванию роторов и поломке приводных электродвигателей). Наибольший вклад в развитие теории и практики применения РПА внёс профессор Тамбовского университета М.А.Промтов[14]. Однако, в силу принципа действия этих устройств, они не могут конкурировать с проточными(не имеющими привода) аппаратами по критерию «удельная энергоёмкость». Поэтому в своих монографиях и статьях проф. Промтов основное внимание уделяет качественным результатам процесса, кратность обработки материала остаётся за рамками рассмотрения. В наше время энергосбережения и энергоэффективности, соотношение «затраты/качество»вышло на первый план.

С учётом этих проблемных моментов автор поставил себе задачу ориентироваться на персонал котельных, а не на симпозиумы. Результат не замедлил сказаться. *Волновой диспергатор* [16] – устройство принципиально нового типа – позволил получить сверхстойкие водотопливные эмульсии (СВТЭ). Ниже описаны результаты работ, выполненных в феврале – марте 2012г. (источник [15] описывает результаты работ в Москве в первом квартале 2010г.). За прошедшее время был не только усовершенствован пилотный образец волнового диспергатора, но и разработана опытно – промышленная СПТ, внедрённая на реальном объекте – котельной, ранее работавшей на дизельном топливе (которое в 2,5 раза дороже, чем ВМЭ). Следует подчеркнуть, что данная СПТ – первая в Казахстане, а успешная проверка стойкости СВТЭ *методом центрифугирования* – **первая в СНГ**. Стойкость полученной ВМЭ проверена на центрифуге «Eppendorf», на критическом режиме, обеспечивающем отделение ДНК из клеток. Центрифугирование проводил (в НИИ Клеточной биологии и молекулярной генетики ЕНУ) профессор Р. Т. Омаров, которому автор выражает глубокую признательность.

### **Как работает СПТ**

СПТ позволяет получать и сжигать в котлах СВТЭ на основе жидких углеводородов. СВТЭ не теряют качества при длительном (много месяцев) хранении и отлично горят, с высокой тепловой эффективностью и пониженным содержанием вредных отходящих газов. Такие свойства топлива стало возможным экономично получать на комплексе оборудовании, ядром которого является *волновой диспергатор*(фото1). Исходные продукты поступают из насоса в центральный патрубок диспергатора. Конструкция

диспергатора полностью исключает засорение проточной части в процессе эксплуатации и заклинивание роторов. Переналадка этого аппарата при поступлении топлива из другой партии поставки не требуется (в отличие от кавитаторов статического типа). Падение давления на диспергаторе крайне незначительно, что также выгодно отличает его от диспергаторов статического типа.



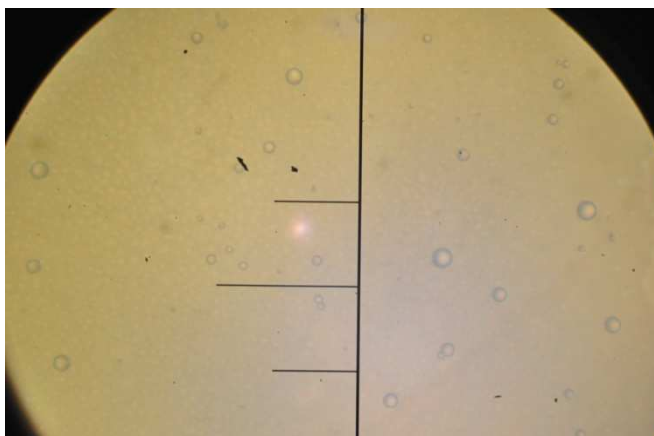
**ФОТО 1**

Обводнённые нефтепродукты (содержание воды 20% и выше) прокачиваются через диспергатор. Внутри него достигается разрыв сплошности топлива под действием мощных сдвиговых напряжений, что порождает пустоты – т.н. каверны. Внутри каверн - пары жидкости и газы (последние всегда присутствуют в жидкости). Кавитационные пузырьки образуются в тех местах каверн, где давление в жидкости становится ниже некоторого критического. Эти явления вызывают вторичные эффекты в жидкости, которые способствуют интенсивному смешению, дроблению и диспергированию компонентов эмульсии. Кавитационный процесс реализован таким образом, что все ударно-волновые явления происходят непосредственно в потоке жидкости, не затрагивая материала корпуса и элементов конструкции, чем обеспечивается долговечность диспергатора.

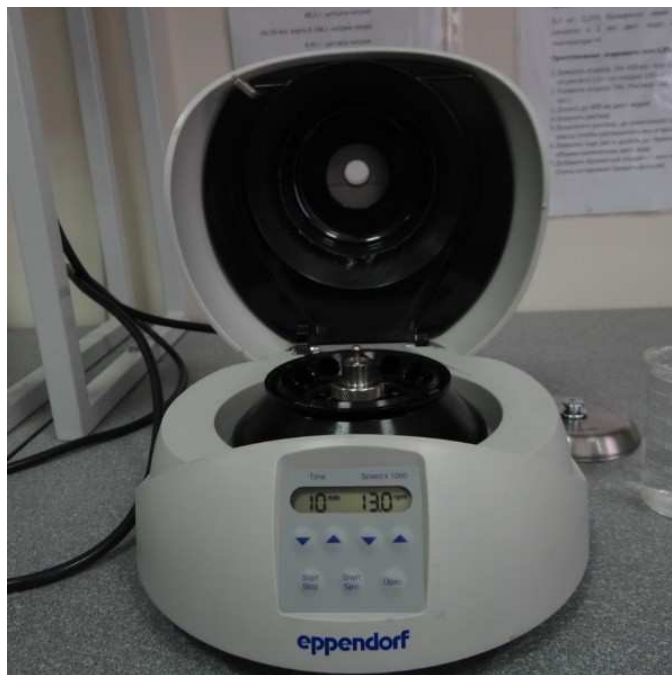
В процессе прямых гидроударов высокой амплитуды (генерируются, когда внутренний ротор циклически перекрывает каналы вихревых камер внешнего ротора) происходят структурные и молекулярные изменения агломератов, изначально присутствующих в мазуте, разрушение органических и минеральных примесей. Обеспечивается интенсивное перемешивание и диспергирование даже многокомпонентных несмешиваемых жидкостей

(с наличием твердых включений). В результате получается однородная СВТЭ (фото2 – эмульсия под микроскопом, цена деления 65микрон), вода **не отделяется** даже через 10 минут обработки эмульсии на центрифуге EPPENDORF (фото3)при частоте 13 000 оборотов/мин.

Следует обратить внимание, что для отделения воды от нефтепродуктов сейчас на рынке успешно продаются центрифуги (в частности, компании "SIMAS" <http://www.simas.ru/products/research/research/waterpetr/a/>) с частотой вращения «всего лишь» 1700 оборотов в минуту. Это подтверждает качество СВТЭ и практическую эффективность *волнового диспергатора* (в котором объединены сразу четыре метода физического воздействия на жидкости: интенсивная турбулизация, кавитационное воздействие, гидроудары высокой амплитуды прямого типа, трибостатический эффект). При этом удельное энергопотребление на создание СВТЭ в среднем составляет 0,2 кВт/т топлива.



**ФОТО 2**



**ФОТО 3**

### **Структура и механизм сгорания водомазутной эмульсии.**

Углеводороды обычного мазута находится в агрегатированном (связанном) состоянии. При поджигании распылённых горелкой каплей такого топлива процесс горения начнется на активной стороне каждого большого, «слипшегося» полимерного звена - *кластера*. При этом сгорание парафинов или серы будет неполным (что приводит к токсичным выбросам). Несгоревший мазут откладывается на поверхностях теплообменников и снижает КПД котла. Простое перемешивание смеси мазута и воды (даже интенсивное) не приводит к созданию мелкодисперсной эмульсии. Вода по-прежнему будет находится в смеси в виде слишком крупных фрагментов, препятствующих эффективному горению топлива.

Правильное диспергирование обводнённого мазута влечёт целый ряд положительных последствий:

- рвутся кластеры тяжёлого топлива, при этом образуется большое количество активных сторон молекул, которые вступают в процесс сгорания значительно быстрее;
- происходит разрыв слабых молекулярных связей, с образованием углеводородов более лёгкого состава;

- вода переходит в мелкодисперсное состояние (что не тормозит горение так, как крупные вкрапления воды) с образованием в топке котла свободных радикалов Н и ОН, которые участвуют в процессе горения как катализаторы.

В СВТЭ, полученной на волновом диспергаторе, вода разбивается на капли размером 4-15 мкм, капли воды равномерно распределяются по всему объему топлива и получают электрический заряд. На них происходит налипание углеводородного топлива с образованием *мицеллы* - капли воды внутри топливной оболочки. Капли воды не соединяются в более крупные из-за наличия углеводородной оболочки, а оболочка топлива крепко держится на капле (из-за наличия в капле заряда). Дисперсная структура ВМЭ обеспечивает вторичный распыл топлива в пламени (Рис.4). Мицелла, попавшая в зону горения, начинает нагреваться. Температуры кипения воды и мазута существенно отличаются (примерно на 200 град. С). Вода резко вскипает, а мазут в это время остается пока еще в жидком состоянии и препятствует испарению капель воды. При достижении внутри мицеллы критического давления происходит микровзрыв (перегретый водяной пар разрывает топливную оболочку и распыляет ее). Происходит многократное увеличение площади соприкосновения топлива с кислородом воздуха, что равнозначно распылению топлива при давлении на форсунках в 150-300 кг/см<sup>2</sup>. Экономия происходит за счет более полного сгорания исходного мазута. Кроме того во время горения эмульсии снижается температура отходящих газов (без снижения температуры в топке и производительности котла), это свидетельствует об увеличении КПД котла.

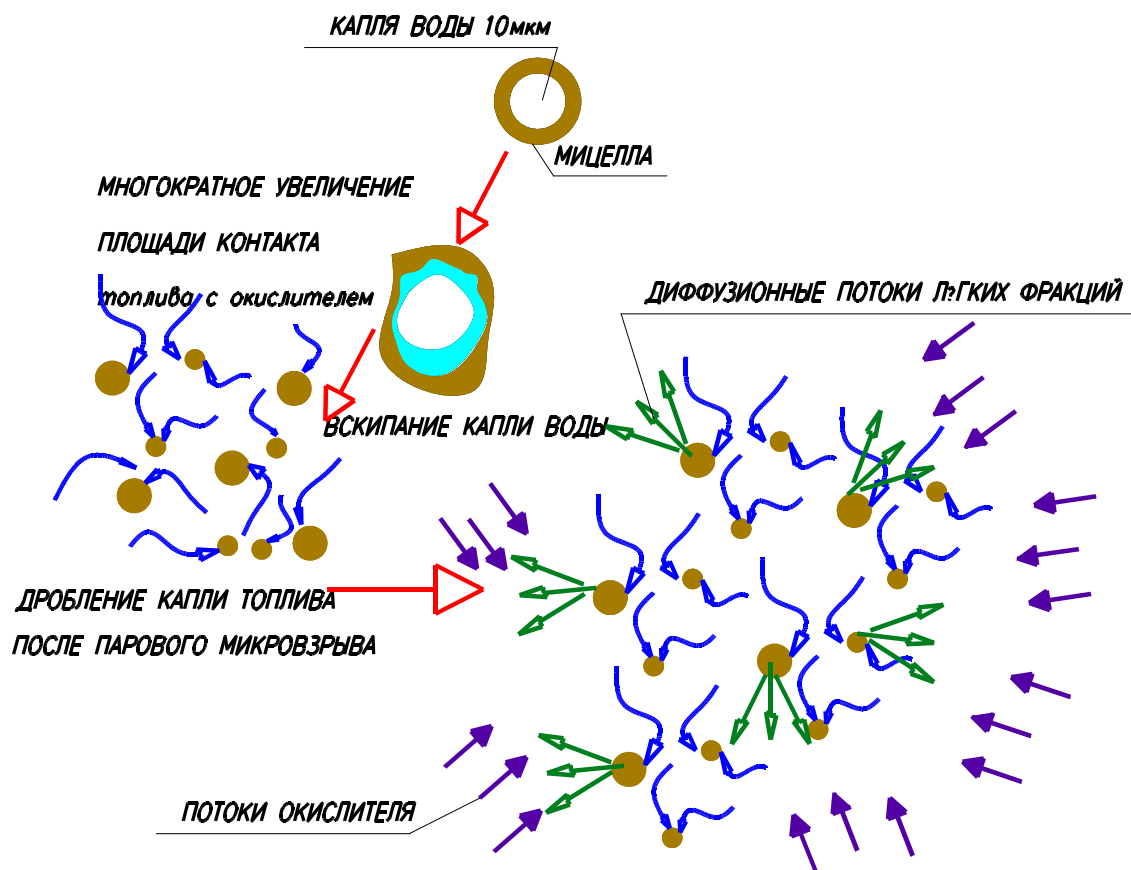


РИС.4

Предлагаемая технология позволяет перевести котельные, ранее работавшие на дизельном топливе, на ВМЭ. Это экономически выгодно, поскольку дизельное топливо существенно дороже, а водомазутная СВТЭ по калорийности не уступает исходному топливу и сгорает с минимальными выбросами вредных газов и сажи в атмосферу. На Фото 5– котёл дизельной котельной, переведённый на водомазутную СВТЭ, приготовленную с помощью *волнового диспергатора*(г.Астана). Котёл, работающий на новом топливе, оборудован красной горелкой. Перед котлом на Фото 5 – кандидат технических наук, инженер - теплофизик Ким В.М., директор Инновационного парка ЕНУ им. Гумилёва, осуществивший успешное руководство созданием Лаборатории альтернативных топлив, в состав которой вошла разработанная автором настоящей статьи СПТ.



**ФОТО 5**

На Фото6 – пламя горящей в котле (Фото5) водомазутной СВТЭ (вид через смотровой глазок на передней панели котла), 25 февраля 2012г.



**ФОТО 6**

Доктор технических наук, сотрудник ЕНУ Аскар Баубек, провёл сжигание ВМЭ, содержащей 25% воды, в своей домашней лаборатории на горелке вихревого типа собственной конструкции (имеет патент РФ на полезную модель). Факел горелки показан на Фото7(которое любезно предоставлено доктором Баубеком). Боковое пламя вырывается из запального отверстия (для розжига горелки доктора Баубека используется

газовая зажигалка). По цвету пламени и его устойчивости можно сделать вывод о высоких теплотехнических характеристиках СВТЭ, полученных на волновом диспергаторе.



**ФОТО 7**

### **Заключение**

Следует отметить, что ультрадисперсные СВТЭ на основе мазута обладают существенно меньшей вязкостью, нежели исходный мазут. Это позволяет перекачивать их по трубопроводам мазутного хозяйства при существенно более низких температурах (порядка 50градусов Цельсия), а также подавать на сжигание при пониженных температурных параметрах (на 20 и более градусов ниже, чем при использовании необработанного топлива), что создаёт дополнительные источники экономии при эксплуатации топливосжигающих объектов. Становится возможным приготавливать топливные эмульсии задолго до момента их сжигания, превращать обводнённые нефтешламы и отработанные масла в полноценное топливо для котлов и печей с длительным сроком хранения (много месяцев). Помимо описанного выше особого качества ВТЭ, СПТ имеет и другие конкурентные преимущества:

1. На рынке отсутствуют системы подобного типа производительностью более шести кубометров в час. Предлагаемая СПТ может обрабатывать в десять и более раз больше топлива, что позволяет использовать её на крупных тепловых электростанциях, металлургических комбинатах. Выше был описан волновой диспергатор производительностью 3...5 кубометров в час (тремякратная обработка топлива). Однако, имеется диспергатор и другого типоразмера [15], обеспечивающий в 6...8 раз большую производительность.

2. СПТ имеет малую удельную энергоёмкость, надёжна и неприхотлива в работе, что минимизирует эксплуатационные затраты.
3. Волновой диспергатор обеспечивает комплексное воздействие на жидкие среды, что расширяет возможности СПТ по сравнению с существующей на рынке продукцией аналогичного назначения - РПА и кавитаторами статического типа.

#### **Список источников**

1. Иванов В. М. Топливные эмульсии, М.: Изд-во АН СССР, 1962г.
2. В. Д. Юсуфова, А. Л. Гарзанов, С. Г. Каспаров, Р. М. Парнас /Уменьшение вредных выбросов в атмосферу при сжигании водомазутной эмульсии в паровом котле/, - Промышленная энергетика, 1984, № 7.
3. Воликов А.Н., Сжигание газового и жидкого топлива в котлах малой мощности. Л: Недра, 1989г.
4. Zwillenberg M. L., Sengupta C., Guerra C. R. Water-oil emulsion combustion in boilers and gas turbines //Ash deposits and corrosion impur combustion gases. Proc. Int. Conf., Heiniker, 1977. – Washington –London, 1978. – P. 335–355.
5. Горбанов Т.Р. Особенности сжигания водотопливных эмульсий в котлах // Энергетика и энергоэффективные технологии: сб. докл. IV междунар. науч.-практ. конф., 28-30 окт. 2010. - Липецк: ЛГТУ, 2010. - С.11-12.
6. Sjogren A. Verbessere Heizverbrennung mit wasser-Öl-und GasfeuerÜng, 1978, Bd. 23, № 3.
7. Батуев С.П. Улучшение экономических и экологических параметров котельных при сжигании водомазутных эмульсий // Новости теплоснабжения. – 2008 г. - N 12(100).
8. А. К. Ильин, Р. А. Ильин, Т. Р. Горбанов. Об эффективности использования водотопливных эмульсий в теплоэнергетике// Вестник АГТУ, сер.: Морская техника и технология, 2011г., №1.
9. Алибеков С.Я., Забродин А.Г. Устройство для подготовки к сжиганию обводненных жидких топлив // Наука в условиях современности: сб. ст. проф.-препод. состава, докторантов, аспирантов и студентов по итогам науч.-техн. конф. МарГТУ в 2010 г. - Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. - С.94-96
10. Кокшаров М.В., Крайнов М.В. О влиянии содержания воды на вязкость водотопливных эмульсий: Тез. докл. науч.-тех. конф. Ростов-на-Дону, РГУПС, 1998. С. 21.
11. Абдо Халед Мохамед Ахмед. Получение эмульсий типа вода/мазут и закономерности изменения их свойств с изменением состава: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07 Москва, 2007г. 136 с. РГБ ОД, 61:07-5/2198
12. В. Гридин, М.Шафоростова, А. Хохлова. Анализ содержания вредных веществ в продуктах сгорания водо-мазутной эмульсии. Донецкий национальный технический университет (Украина). Проблемы екології. № 1-2, 2009 г.
13. Шагеев М.Ф., Лившиц С.А., Хайриева Э.М. Моделирование подогрева водомазутной эмульсии в технологических схемах // Соврем. наукоемкие технологии. - 2010. - N 7. - С.161-163.
14. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа. Теория и практика. М.: «Машиностроение», 2001г.
15. Геллер С.В. Приготовление водомазутных эмульсий посредством волновой диспергации //Новости теплоснабжения.- 2010 г., №4.
16. Патент РФ №2347153 на изобретение «Гидродинамический генератор». Зарегистрирован 20 февраля 2009г. Автор – С.В.Геллер.

**С.В. Геллер**, дипломированный инженер, автор сорока шести изобретений (Ростов – на –  
Дону) [carma555@mail.ru](mailto:carma555@mail.ru) +7(928)169 10 55