

## **ПОДГОТОВКА ВОДОТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ МАГНИТНОМ И НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЯХ С КОНТРОЛЕМ ПРОЦЕССА МЕТОДОМ ЯМР-РЕЛАКСОМЕТРИИ**

**Р.С. КАШАЕВ**

**Казанский государственный энергетический университет**

*В работе описана модернизация топливоснабжения котельных путем превращения водо-углеводородных смесей, включая обводненные мазут и котельное топливо, в водотопливные эмульсии (ВТЭ). Подготовка ВТЭ осуществляется во вращающихся магнитном и неоднородном электрическом полях с контролем процесса методом ЯМР-релаксометрии.*

*Ключевые слова: топливоснабжение, водотопливная эмульсия, ЯМР-релаксометрия.*

### **Введение**

Энергетика все шире использует водотопливные эмульсии (ВТЭ) для топливоснабжения котельных и котлов тепловых электростанций (ТЭС) вместо мазута и котельного топлива. Использование, например, водомазутных эмульсий (ВМЭ) дает преимущества, связанные с диспергированием мазута за счет взрыва капель в пламени факела: быстрое сгорание и практически полная конверсия углерода; возможность сжигания при малых концентрациях кислорода; низкая температура сжигания – в разы снижают выбросы в атмосферу окислов азота  $\text{NO}_x$ . Использование ВТЭ позволяет экономить углеводороды; при этом оборудование котлов ТЭС и котельных требует минимальной адаптации, затраты на которую окупаются в течение года. Исследования, проведенные на ТЭЦ-21 Мосэнерго, показали [1], что при применении ВМЭ с концентрацией воды 5–13 % снижение температуры ядра факела на  $100^\circ\text{C}$  приводит к двукратному уменьшению концентрации  $\text{NO}_2$  в продуктах сгорания. Если размер капель воды не превышает 50 мкм, КПД котла не меняется, и теплоэнергетическая установка может работать с максимальной нагрузкой. Концентрацию воды в ВТЭ можно доводить до 30%. Вязкость эмульсии из нефтяных остатков ниже, чем в самом остатке.

Применение ВТЭ экономически целесообразно. Появляется возможность использовать бросовые водо-углеводородные смеси (ВУС), сильно обводненные нефтяные остатки, слив и хранение которых связаны с загрязнением водоемов и опасностью пожаров. Переработка отходов в топливные эмульсии дает возможность обезвреживания промышленных водных стоков, содержащих ВУС [2]. По данным работы [3] для агрегатов топочной системы достаточно ограничение дробления капель воды до 15 мкм. Это обеспечивает устойчивую работу при содержании воды в ВТЭ до 25–30%. При дальнейшем дроблении до 1 мкм ВТЭ можно использовать в двигателях внутреннего сгорания, в том числе морских дизельных ДВС. При этом расход топлива сокращается на 12 %, исключается недожог, эмиссия  $\text{SO}_2$  снижается на 50% [4].

### **Система поддержания концентрации воды в ВМЭ**

Для функционирования системы топливоснабжения котельной водотопливной эмульсией необходима система поддержания концентрации воды при определенных значениях, обычно  $20 \pm 2\%$ .

Рассмотрим реализацию системы топливоснабжения с поддержанием концентрации воды на примере котельной на трех котлах ДКВР-10-13, паропроизводительностью 45 т/час, закрытого типа, предназначенной для централизованного теплоснабжения систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения жилых, общественных и промышленных зданий, а также технологических потребителей. Область применения – районы с расчетной температурой наружного воздуха  $-20$ ;  $-30$ ;  $-40^{\circ}\text{C}$ . В качестве вида топлива использован мазут М-100 плотностью  $\rho^{20} = 957 \text{ кг/м}^3$ , вязкостью  $\eta^{20} = 1,08 \text{ Па}\cdot\text{с}$  при  $80^{\circ}\text{C}$ , теплотворной способностью  $Q = 38,42 \text{ МДж/кг}$ . Теплоносители: перегретая вода с температурой  $150\div 170^{\circ}\text{C}$  (60%-й пар) для системы отопления, вентиляции и горячего водоснабжения и насыщенный пар давлением 7 атм для технологических потребителей. Вода подготавливается в водоподогревательной установке теплопроизводительностью 59080 МДж/ч. Мазут подогревается до температуры  $80^{\circ}\text{C}$ .

В системе топливоснабжения (рис. 1) котельной ДКВР-10-13 ВТЭ необходимо регулировать концентрацию воды в ВТЭ, поступающей в котел. Это осуществляется с помощью разработанного нами способа и датчика проточного экспресс-анализа [5-7]. ВМЭ образуется смешением мазута и воды в специальной емкости 4. Для этого мазут и вода подаются в емкость 4 при последовательном открытии вентилей 1 и 2. Эти жидкости заполняют емкость 4 до объема  $0,8V$  ( $V$  – объем емкости), контролируемого датчиком уровня 3. При заполнении  $0,8V$  срабатывает датчик уровня 3, вентили 1 и 2 закрываются и переходят в ждущий режим. При понижении уровня в емкости до  $0,5V$  датчик уровня 3 работает на открытие вентилей 1 и 2. После заполнения емкости включается шестеренчатый насос 5. Он перемешивает мазут и воду в течение заданного времени  $t_{\text{зад}}$ , необходимого для достижения определенного диаметра капель воды. По истечении этого времени открывается клапан 6, смесь начинает поступать в промежуточную емкость 8. В это время смесь анализируется датчиком технологического параметра на концентрацию воды и дисперсность, контролируется также расход смеси. В зависимости от процентного содержания воды в ВТЭ, открывается либо вентиль 1, либо 2. Время открытого состояния 1 и 2 зависит от требуемого количества воды. Если ВТЭ отвечает заданным параметрам, открывается вентиль 9 и смесь подается в котел 10.

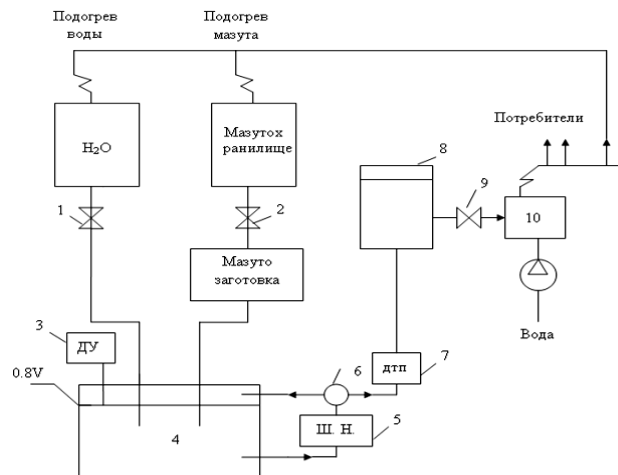


Рис.1. Принципиальная схема системы топливоснабжения и поддержания концентрации воды в ВМЭ:  
1, 2 и 9 – вентили; 3 – ДУ – термодифференциальный сигнализатор уровня СУПТ 201 Ех; 4 – емкость;  
5 – Ш.Н. – шестеренный насос марки Ш5-25; 6 – клапан; 7 – датчик технологического параметра;  
8 – промежуточная емкость; 10 – котел для сжигания

### Подготовка ВТЭ с использованием установки снижения концентрации воды во вращающемся магнитном и неоднородном электрическом полях и управлением от релаксометра ЯМР

В настоящее время в целях ресурсоэкономии и энергосбережения актуально создание блочно-модульных установок подготовки топливных эмульсий, установок дэмульсации и превращения нефтепродуктов и стоков промышленных производств в ВТЭ. По данным рекламного проспекта разработчика ОАО «Корпорация «Компомаш», УП «Омский завод нефтеперерабатывающего оборудования» ГП ПО «Полет» производит установки, стоимостью 3,5 млн. руб. и производительностью 5–10 т/час, по приготовлению 30%-х водомазутных эмульсий. По данным производителя (и рекламного проспекта от 2006 г.) стоимость подготовки 1 т ВТЭ составляет 70 руб./т; экономический эффект при переходе теплоэлектростанции на ВТЭ составляет 48,7 млн. руб. Ближайший зарубежный аналог – установка фирмы *ENH, Colas* по подготовке водо-битумных эмульсий. Сравнительные данные по установкам приведены в таблице.

Таблица

| Показатели                             | Установка<br>«Компомаш», г. Омск | <i>ENH</i><br><i>Enginneering A/S</i><br>( <i>Colas</i> , Франция) | Установка<br>КГЭУ,<br>г. Казань |
|----------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Получаемый продукт                     | Водомазутные эмульсии            | Водо-битумные эмульсии                                             | ВТЭ                             |
| Производительность, т/час              | 5–10                             | до 20                                                              | 5–20                            |
| Концентрация воды, %                   | 0–30                             | –                                                                  | 0 – 100                         |
| Отн. погрешность, %:<br>Мазута, битума | ±2,5                             | –                                                                  | ±2,0                            |
| Взрывозащита                           | нет                              | да                                                                 | да                              |
| Потреб.мощность, кВА                   | 37–50                            | –                                                                  | 30                              |
| Габариты, м:                           | 1,82×0,56×0,8                    | до 1,82×0,56×0,8                                                   | 1,5×0,4×0,5                     |
| Масса, кг                              | 770                              | до 700                                                             | 100                             |
| Экономия топлива, %                    | 25                               | 25                                                                 | 20–30                           |

Однако недостатком установок является проблема, связанная с переработкой ВУС с большим влагосодержанием, – необходимость выпаривания избыточной влаги, что приводит к большому расходу теплоэнергии. Нами предлагается осуществлять данный процесс в установке с вращающимися магнитным и неоднородным электрическим полями (ВМНЭП) [6].

В предлагаемом процессе снижения концентрации воды и формирования мелкодисперсной ВТЭ требуется выполнение следующих контрольно-технологических операций: контроль влажности  $W$  водоуглеродных смесей (ВУС), зачисток, нефтяных стоков; доведение концентрации воды  $W$  до нормы (снижение или повышение  $W$ ); контроль физико-химических свойств и расхода формируемой ВТЭ по способу [4].

Вышеизложенные условия могут быть реализованы в автоматическом проточном режиме датчиком ядерного магнитного резонанса (ЯМР) технологических параметров [5]. Такая контрольно-управляющая установка в базовом варианте включает: ЯМР-датчик, к которому подведены каналы подачи сырья, воды и ВТЭ. Контроль параметров осуществляется электронным блоком релаксометра ЯМР с микропроцессорным контроллером. После обработки полученных данных микропроцессор выдает сигналы на управление процессом обезвоживания во ВМНЭП задвижками, регулирующими расход (подачу) смеси, сырья (топлива, отходов нефтехимии и др.) и воды, осуществляет контроль переработки смеси в эмульсию.

Процесс обезвоживания обводненных мазутов, котельного топлива, нефти и нефтяных отходов осуществляется во ВМНЭП устройством [8], схема которого

показана на рис. 2, фото – на рис. 3. В соответствии со схемой рис. 2 предварительно подогретая до 80°C ВУС (из обводненных мазутов, котельного топлива, нефти и нефтяных отходов) пропускается через сетку отрицательно заряженного электрода 1. Слой отстоявшейся воды 8 перемещается по направлению к электроду 2 с положительной полярностью и обрабатывается в зоне 7 вращающихся магнитного и неоднородного электрического полей. После обработки происходит нейтрализация зарядов капель на положительных электродах, их коалесценция и отстой в зоне 7. При этом на каждом этапе обработки осуществляют контроль параметров эмульсии (концентрации воды, дисперсного распределения капель воды, вязкости, плотности) с помощью проточного ДТП, управляемого микропроцессорным контроллером [7].

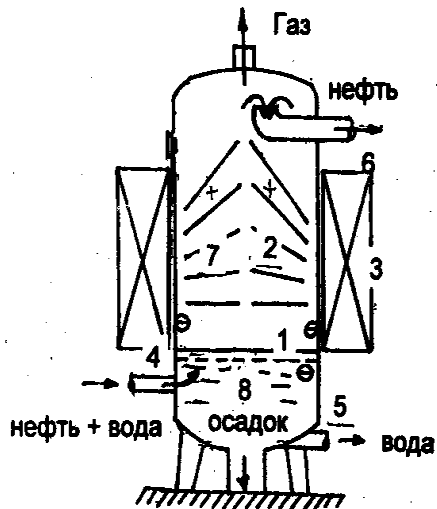


Рис.2. Схема устройства для удаления воды из ВУС во вращающихся магнитном и неоднородном электрическом полях. Здесь 1 – отрицательно заряженный электрод, 2 – положительно заряженные конические электроды, 3 – статорные обмотки для создания ВМП, 4, 5 и 6 – патрубки ввода сырья, вывода отделенной воды и обезвоженного углеводорода, 7 – зона действия на капли воды ВМНЭП, 8 – отстоявшаяся вода



Рис.3. Фото устройства для удаления воды из ВУС во ВМНЭП

Таким образом, в устройстве ВУС подвергается воздействию следующих полей и сил.

1. При пропускании ВУС через отрицательно заряженную сетку 1 с полем  $E_0$  капли воды радиусом  $r_0$  получают отрицательный заряд  $q$ :

$$q \approx 1,64 E_0 r_0^2. \quad (1)$$

Приобретя заряд, капли отталкиваются от электрода 1 с силой:

$$F \approx 1,37 E_0^2 r_0^2 \varepsilon_{cp} = 0,835 q E_0, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{cp}$  – диэлектрическая проницаемость дисперсной фазы (воды). Ввод ВУС в устройство осуществляется не по радиусу, а по периметру корпуса в направлении, совпадающим с направлением вращения магнитного и электрического полей и электродов 2. Это создает закрученность потока эмульсии и дополнительную центробежную силу, отбрасывающую более тяжелые капли воды (при обработке нефтей и нефтепродуктов с плотностью  $\rho < 980 \text{ кг/м}^3$ ) к внешнему периметру блока. Далее капли воды попадают в зону 8 отстоявшейся воды, в которой улавливаются наиболее крупные капли воды и механические примеси.

2. Выше слоя отстоявшейся воды находится промежуточный слой с меньшей концентрацией воды, куда попадают более мелкие капли эмульсии, которые коалесцируют, подвергаясь обработке ВМП, создаваемым статорными обмотками 3, и НЭП, создаваемым между поверхностью воды и между электродами 2, на которые подано положительное напряжение. Причем, величина электрического поля между электродами 2 изменяется в сторону его увеличения по мере повышения расположения электродов в блоке, как это представлено на рис. 2. Такое наращивание величины удельного электрического поля  $E_{уд}$  ведет к тому, что создаются условия роста сил диполь-дипольного взаимодействия  $F_D$  между мелкими каплями с уменьшением концентрации воды по мере движения ВУС вверх. В зоне 7 на капли действуют силы:

а) силы притяжения от диполь-дипольного взаимодействия между каплями-диполями по формуле

$$F_D = 6(|\alpha|)^2 E_0^2 \varepsilon_{cp} / r^4, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – поляризуемость капли,  $\alpha = r_0^3(\xi - 1)/(\xi + 2)$ ;  $\xi = \varepsilon_0/\varepsilon$ ,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость эмульсии;  $r$  – расстояние между каплями-диполями;  $\varepsilon_0$  – усредненная диэлектрическая проницаемость эмульсии. При этом, поскольку электроды 2 расположены на ферромагнитном роторе, они вслед за ротором осуществляют вращательное движение по принципу ротора асинхронного двигателя, снижая, тем самым, вероятность возникновения «цепочек» проводимости из капель воды между электродами;

б) силы  $F_G$  градиента  $\text{grad } E$  электрического поля  $E$  по формуле

$$F_G = 2\pi\varepsilon_0(\varepsilon - 1)E_0 R^3 \text{grad } E^2 / (\varepsilon + 2), \quad (4)$$

где  $R$  – внешний радиус электрода. Под действием сил капли будут перемещаться по градиенту  $\text{grad } E$  в зону максимальной величины  $E_0$  к периметру корпуса, где капли коалесцируют и оседают;

в) силы  $F_L$  Лоренца:

$$F_L = q [v \cdot B], \quad (5)$$

где  $B$  – магнитная индукция вращающегося магнитного поля;  $v$  – линейная скорость вращения магнитного поля. Под действием сил  $F_L$  заряженные мелкие капли перемещаются вниз, где их концентрация повышенная. Вследствие наличия заряда и дипольного момента капли также стремятся по направлению градиента  $\text{grad } B$  магнитного поля, который максимален на периметре корпуса блока, то есть ближе к источнику магнитного поля 4;

3. Далее обезвоженная ВУС переключателями потока направляется в ЯМР-датчик релаксометра ЯМР для выходного контроля параметров топливной эмульсии. В том случае, если эмульсия удовлетворяет по качеству, она сливается в емкость для готовой топливной эмульсии. Если нет, то, в зависимости от параметров эмульсии, вновь подвергается электромагнитной обработке уже при новых ВМП и НЭП в блоке удаления воды из ВУС.

Непрерывный контроль данных параметров осуществляется ДТП по способу контроля качества нефти и нефтепродуктов по патенту [6]. Оценка экономической эффективности при использовании установки на отдельной котельной составляет ~ 700 тыс. руб./год (на 2007 г.). Она складывается из экономии средств от реализации в одном ЯМР-анализаторе (ценой 900 тыс.руб) единовременного оперативного (в течение 2 минут) контроля расхода, состава ВТЭ, концентрации воды, вязкости; отказа от установок выпаривания избыточной влаги и высоковольтных установок электрообезвоживания, аппаратов смешения с деэмульгаторами и емкостей для отстаивания в течение  $\approx 30\text{--}60$  минут с подогревом до  $50\text{--}60^\circ\text{C}$ . Срок окупаемости оценивается в 2 года. Разработка обладает наукоемким экспортным потенциалом. Аналог на базе ЯМР-анализатора в мировой практике отсутствует.

### **Выводы**

1. Описана структурная схема и алгоритм работы установки топливоснабжения котельной водотопливной эмульсией с контролем процесса методом ЯМР-релаксометрии.

2. Предложен способ и устройство по подготовке водотопливной эмульсии из водо-углеводородной смеси путем воздействия вращающимся магнитным и неоднородным электрическим полем.

3. Описаны силы и поля, воздействующие на капли воды в водотопливной эмульсии.

### **Summary**

*In the work described modernization of fuel supply of boiler rooms by transformation of water-hydrocarbon mixtures in water-fuel emulsions (WFE). Preparation of WFE is performed in the rotating magnetic and inhomogeneous electric fields with the process control by method of NMR-relaxometry.*

*Key words: fuel supply, water-fuel emulsion, NMR- relaxometry.*

### **Литература**

1. Отчет / КПИ, Мосэнерго. Булгаков Б.Б., Булгаков А.Б., Преснов Г.В. и др.; О применении водо-мазутной эмульсии для сжигания в котельных установках ТЭЦ-21. 1993 г.
2. Кашаев Р.С., Малацион С.Ф., Самигуллин Ф.М., Матухин В.Л. Температурная зависимость структурно-динамических параметров и методика экспресс-анализа топливных водо-мазутных эмульсий на основе метода ЯМР // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. №11-12. С. 3-11.
3. Зверева Э.Р. Ресурсо-, энергосберегающие технологии в мазутных хозяйствах тепловых электрических станций. Казань: Казанский гос. энерг. ун-т, 2010. 184 с.
4. Abu Zaid. Performance of single cylinder, direct injection diesel engine using water fuel emulsions // Energy conversion and Management. 2004. №45. Р. 697–705.
5. Способ оперативного контроля качества нефти и нефтепродуктов / Кашаев Р.С., Темников А.Н., Идиятуллин З.Ш. Пат. 2519496 РФ, С1 G01N 24/08. Опубл. 10.06.2014. Бюлл. №16.
6. Пат. РФ 74710. Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентных жидкостей методом ЯМР / Кашаев Р.С., Темников А.Н., Идиятуллин З.Ш., Даутов И.Р. Опубл. 2009, Бюлл. №28.

7. Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентных жидкостей методом ядерного магнитного резонанса / Кашаев Р.С., Темников А.Н., Идиятуллин З.Ш. Пат. РФ 2544360 С1 G01N 24/08. Оpubл. 20.03.2015. Бюлл. № 8.

8. Пат. 115679 РФ. Устройство для обезвоживания и обессоливания водонефтяных и водомасляных эмульсий / Кашаев Р.С., Фасхиев Н.Р. Оpubл. 2011. Бюлл. №13.

*Поступила в редакцию*

*28 января 2016 г.*

**Кашаев Рустем Султанхамитович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и автоматизированный электропривод» (ПАЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(904)7158012. E-mail: kashaev2007@yandex.ru.