

КОМПЛЕКСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ТЕПЛОВЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ

4.1. Сжигание водомазутной эмульсии в паровых котлах

4.1.2. Исследования и опыт применения водомазутных эмульсий в энергетических котлах ТГМП-314 и ТГМ-96

Н.А. Зройчиков, Е.А. Морозова, ТЭЦ-23 ОАО Мосэнерго, Москва, Россия

М.Г. Лысков, НИУ «МЭИ», Москва, Россия

А.Б. Булгаков, ИНТРЭК, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены вопросы, касающиеся сжигания водомазутных эмульсий на мощных энергетических котлах ТЭЦ-23 филиала ОАО Мосэнерго, с целью определения основных показателей их работы и выявления новых путей борьбы с выбросами загрязняющих веществ с дымовыми газами в атмосферу.

В последнее время все большее внимание уделяют проблемам теплоэнергетики, связанным с экономией топлива и защитой окружающей среды, так как постоянно ужесточаются экологические требования, предъявляемые к энергетическим установкам.

В тоже время, стоимость энергоносителей, прежде всего жидких, непрерывно растет, в связи с этим, возникает необходимость использования более дешевых и поэтому, более низкосортных марок топлива. Перспективным в этом смысле является использование водо-мазутных эмульсий (ВМЭ). В основу разработки, которых, положены известные данные по интенсификации процесса горения топлива (вода+мазут) в топке котла.

Применение системы эмульгирования мазута дает заметный экономический выигрыш, так как при ее осуществлении достигается более рациональное использование теплоты сгорания топлива. Внедрение этой технологии на действующих ТЭС не требует больших капиталовложений и существенных изменений в схеме мазутного хозяйства.

Сжигание обводненного мазута со значительным содержанием влаги приводит к серьезным проблемам в поддержании стабильных режимных параметров котлов.

При сжигании мазута, помимо воды и углекислого газа, выделяется более двухсот загрязнителей. Среди них – частицы сажи, оксиды серы, азота, углерода, а также углеводороды, опаснейшим из которых является канцерогенный бенз-(а)-пирен.

Основная доля вредных веществ синтезируется в средней и хвостовой части факела горящего пламени. Там же, в результате недожога, образуется сажа, которую необходимо удалять с поверхностей теплообменников.

Еще одной проблемой, осложняющей экологическую обстановку, является - непрерывное накопление балластных вод и их утилизация. Применяемые сейчас методы очистки сточных вод от нефтепродуктов, очень дорогостоящие и не всегда высокоэффективные. Особенно это относится к очистке сильнозагрязненных вод. Использование в качестве добавочной воды сточных вод, дает возможность подвергнуть огневому обезвреживанию значительный их объем (примерно до

20 % топлива на котел). Это позволяет перевести ТЭС на малоотходную технологию.

Так, например, перевод котла БКЗ-75-39 на сжигание ВМЭ позволил осуществить огневое обезвреживание около 1 т/ч сточных вод, загрязненных нефтепродуктами. При этом котел на ВМЭ работал устойчиво. Щитовые приборы зафиксировали даже, некоторое увеличение паропроизводительности при постоянном расходе исходного мазута.

В мазуте всегда присутствует грубодисперсная вода, что создает технологические и экологические проблемы. При хранении мазута часть воды собирается в водяные линзы и осаждаются на дне емкости. Попадая в трубопроводы, а затем и в топливные форсунки, эти водяные включения вызывают неравномерности горения и даже останов котла.

Если такие грубые водо-мазутные смеси с различным содержанием воды подвергнуть высокоинтенсивной гидромеханической обработке в кавитационном поле, то они превращаются в эмульсию типа “масло-вода”, в которой вода находится в тонкодисперсной фазе.

Присутствие в топливной эмульсии тонкодисперсной фазы воды положительно влияет на процессы сжигания мазута на микроуровне (в масштабах одной капли) по следующим причинам.

Во-первых, при размерах дисперсной фазы воды в пределах 6...20 мкм в результате ее бурного вскипания происходят микровзрывы капель в топочном пространстве, что многократно увеличивает поверхность контакта топлива с воздухом и улучшает процесс горения.

Во-вторых, вскипание мелких включений воды диаметром 1...5 мкм и постепенный рост парового пузыря на месте крупных включений (свыше 20 мкм), приводят к увеличению объема капли мазута, вследствие чего усиливают диффузионные потоки легких фракций к ее поверхности и их испарение.

На макроуровне (в масштабах топки), при горении ВМЭ водяные пары являются физическим возбудителем конвективной гомогенизации топливовоздушной смеси, приводящей к сглаживанию неравномерности концентрации газов и температурных полей в топке.

Важной особенностью механизма воздействия ввода добавочной влаги в зону горения является диссоциация паров воды при высокой температуре на ионы H^+ и OH^- . Ион OH^- , являющийся сильным окислителем, вступает в реакцию с продуктами недожога топлива: CO , CH_4 , многоядерными углеводородами (бенз(а)пирен — это тоже недожог), что приводит к значительному снижению концентрации этих веществ

в дымовых газах. Хорошим подтверждением этого являются результаты экспериментов [6] при работе на природном газе с вводом добавочной влаги, когда добавочная влага (вода) просто впрыскивалась в зону горения через специальные форсунки. В этих экспериментах было получено, что концентрации СО и бенз(а)пирена в дымовых газах снижаются даже более резко, чем концентрации оксидов азота. Ион H^+ активнее атома азота (а тем более молекулы N_2). Он вступает в реакцию со свободным кислородом и тем самым способствует снижению генерации оксидов азота. Этот механизм влияния влаги в зоне горения на образование вредных веществ работает и при сжигании мазута.

Суммарным эффектом влияния интенсификации горения на материальный баланс процесса является снижение критического коэффициента избытка воздуха на 5...10 %. А это снижает объемы синтезируемых оксидов азота на 15...45 % и уменьшает выбросы бенз(а)пирена.

За счет активизирующего воздействия тонкодисперсной фазы воды в эмульсии на 20...25 % снижается время подготовки и горения топлива, а также сокращается длина факела. Благодаря этому концентрация сажи в продуктах сгорания уменьшается примерно на 90 %. Наилучшие результаты по снижению выбросов бенз(а)пирена достигаются при размерах капель дисперсной воды 1...10 мкм.[4].

Сопутствующим эффектом уменьшения образования сажи и кокса является также изменение структуры их отложений на конвективных поверхностях нагрева котла. Они либо вообще отсутствуют, либо становятся рыхлыми и легко удаляются.

Влияние тонкодисперсной воды на подавление эмиссии «термических» оксидов выражается в том, что максимальная температура ядра факела снижается на 90-100°C. Кроме того, уменьшается критический избыток воздуха за счет интенсификации теплообменных процессов благодаря паровзрывному дроблению капель.

Известно, что при длительном хранении мазута происходят процессы старения топлива, сопровождающиеся образованием высоко-вязких сгустков и выделением твердых частиц карбенов и карбоидов. Это снижает химическую активность мазута и его распыляемость, что приводит к коксованию форсунок, повышению выбросов насыщенной бенз(а)пиреном сажи в атмосферу и ее интенсивному отложению на конвективных поверхностях.

Избежать этих технологических и экологических «неприятностей» помогает приготовление водомазутной эмульсии в емкостях хранения при помощи гидродинамических кавитационных смесителей (ГКС) и обработка топлива в гидродинамических активаторах (ГКА), установленными перед форсунками котла. В ГКА происходит деструкция мазута в диапазоне от механического дробления до механокрекинга углеводородных соединений. В результате увеличивается реакционная поверхность твердой фазы, разрушаются нераспыляемые сгустки, а также возникают фрагменты молекул, свободные радикалы которые обладают высокой реакционной активностью. А это существенно снижает коксование форсунок, укорачивает факел горения, уменьшает выбросы в атмосферу сажи, окси-

да углерода и бенз(а)пирена, уменьшает заносы сажей теплообменных поверхностей.

Исследования показали, что активация ВМЭ непосредственно перед котлом не только увеличивает в эмульсии содержание водных включений размером порядка 5 мкм, способствующих вторичному распылу, но и приводит в результате высоких напряжений и скоростей сдвига в «жестком» кавитационном поле к деструкции мельчайших коллоидных сгустков, карбенов и карбоидов, образовавшихся в процессе старения мазута за время его хранения. Именно эти компоненты являются одной из основных причин механического недожога топлива (q_4) и выбросов в атмосферу сажи и СО. Одновременно с этим в силу явлений механокрекинга разветвленных молекулярных цепей нефтепродуктов образуются свободные радикалы с высокой реакционной способностью. Результат таких механохимических превращений проявляется в увеличении прозрачности факела, сокращении его длины, уменьшении закоксованности форсунок и дает возможность снизить температуру распыла на 10...15°C.

Успешное применение водо-топливных эмульсий обуславливается, прежде всего, их качеством. Качество любых эмульсий определяется дисперсностью, которая влияет на устойчивость эмульсии, вязкость, электропроводность и другие свойства. Чем выше дисперсность, т.е. чем больше число и меньше размеры капель воды и чем меньше отличаются они по величине одна от другой, тем равномернее распределяется вода в топливе, устойчивее эмульсия и выше ее качество.

Получить эмульсии высокого качества позволяет оборудование, принципы работы которого основаны на использовании явления кавитации. К такому оборудованию относятся роторно-пульсационные аппараты, гидро-динамические акустические генераторы ("свистки") и ультразвуковые эмульгаторы. Все эти устройства позволяют получить качественные эмульсии (средний диаметр капель - 1...3 мкм). Однако, их широкому распространению препятствуют некоторые, присущие этим устройствам недостатки. Так, акустические "свистки" отличаются трудностью настройки и поддержания эффективного режима обработки при эксплуатации. Ультразвуковые эмульгаторы – это дорогостоящее, сложное, требующее специального ухода оборудование. Кроме того, у этих аппаратов низкая производительность до 3 м³/ч. Роторно - пульсационные аппараты пригодны только для обработки чистых жидкостей (рабочие зазоры — 60...80 мкм).

Вышеуказанные недостатки отсутствуют у гидродинамических кавитационных смесителей и активаторов, отличительной чертой которых является относительная простота их конструкции, легкость настройки на эффективный режим обработки, простота эксплуатации, высокая надежность, высокая производительность.

Явление кавитации возникает в движущейся жидкости, как правило, за местными гидравлическими сопротивлениями. Необходимым условием возникновения кавитации является наличие такого режима движения жидкости, при котором давление в определенной области будет ниже давления насыщенных паров жидкости при данной температуре. При этом в объеме жидкости наблюдается образование и рост кавита-

ционных пузырьков. Рост пузырьков происходит за счет разности давлений до и после ГКС:

$$\Delta P = (P_{\text{нп}} + P_2) - P_{\text{жс}}$$

где $P_{\text{нп}}$ - давление насыщенных паров жидкости при данной температуре; P_2 - давление растворенных газов внутри пузырька; $P_{\text{жс}}$ - внешнее давление в жидкости.

Чем больше значение ΔP , тем выше скорость роста кавитационного пузырька. Когда кавитационный пузырек выносится потоком в область повышенного внешнего давления, значение ΔP становится отрицательным, что приводит к схлопыванию пузырька. Процесс схлопывания сопровождается выделением энергии в микроскопическом объеме и как следствие, образованием кумулятивных струек и микрогидроударов. Таким образом, при схлопывании значительного количества кавитационных пузырьков в жидкости идут процессы чрезвычайно интенсивного массообмена, что и используется для приготовления однородных и мелкодисперсных водо-топливных эмульсий.

В гидродинамических кавитационных смесителях понижение давления в потоке ниже давления насыщенных паров достигается за счет разгона потока до скоростей 10...15 м/с.

Смеситель представляет собой проточную камеру, по оси которой установлены одно или несколько кавитирующих тел. При обтекании кавитирующего тела, поток в месте сужения разгоняется, при этом, в соответствии с уравнением Бернулли, давление в потоке уменьшается, что приводит к образованию и росту кавитационных пузырьков. Кавитационные пузырьки образуют за кавитирующим телом некое подобие облака, называемого каверной. За кавитирующим телом скорость потока снижается, давление растет, что приводит к схлопыванию кавитационных пузырьков и интенсивному эмульгированию.

Как было показано выше (1), кавитационный пузырек может существовать при $\Delta P > 0$. Очевидно, что при возрастании скорости потока снижается значение $P_{\text{жс}}$, что приводит к более интенсивному росту кавитационного пузырька. На практике это проявляется более развитым режимом кавитации и увеличением размеров каверны, что приводит к более интенсивному эмульгированию. В то же время, увеличение скорости потока уменьшает время нахождения пузырька в зоне пониженного давления, т.е. уменьшает время существования пузырька. В результате размер кавитационного пузырька в начале схлопывания тем меньше, чем выше скорость движения жидкости. Однако, с увеличением скорости резко возрастают гидродинамические потери, что может негативно сказаться на работе оборудования, установленного за ГКС. Таким образом, конструктивный расчет ГКС заключается в получении возможно большей скорости движения жидкости через аппарат при обеспечении гидродинамических потерь не выше предельно допустимого значения в данных условиях.

Следует отметить, что на практике не существует типовых схем приготовления ВМЭ, пригодных для эффективного использования на любом объекте энергетики. Это обусловлено тем, что при проектировании технологической схемы необходимо учесть целый ряд факторов и параметров, характеризующих конкретный объект внедрения.

Поэтому, для условий ТЭЦ-23, была разработана двухступенчатая технология эмульгирования в гидродинамических кавитационных смесителях и активации топлива перед сжиганием в гидродинамических кавитационных активаторах, для установки непосредственно перед котлами.

Технология предусматривает:

- рециркуляцию мазута насосами 1-го подъема через ГКС с целью получения водо-мазутной топливной эмульсии со средним диаметром капель воды 20...30 мкм; ВМЭ готовится по всему объему мазутных резервуаров (рис. 1);
- гидромеханическую обработку ВМЭ в ГКА, установленных на мазутопроводе высокого давления непосредственно перед котлами (рис.2).

Конструктивно расчет активаторов выполнен таким образом, что скорость потока при попадании в рабочий участок достигает величины, при которой давление становится ниже давления насыщенных паров при данной температуре. За кавитирующим профилем образуется кавитационное поле, в котором, примерно 50 % гидродинамической энергии турбулизации приходится на акустическую (в области ультразвуковых колебаний) составляющую. В результате этого происходит разрушение структур, возникших в процессе хранения топлива и приведших его к дестабилизации. После ГКА средний размер капель воды составляет 5...12 мкм. Такая дисперсность является оптимальной и с точки зрения снижения эмиссии оксидов азота.

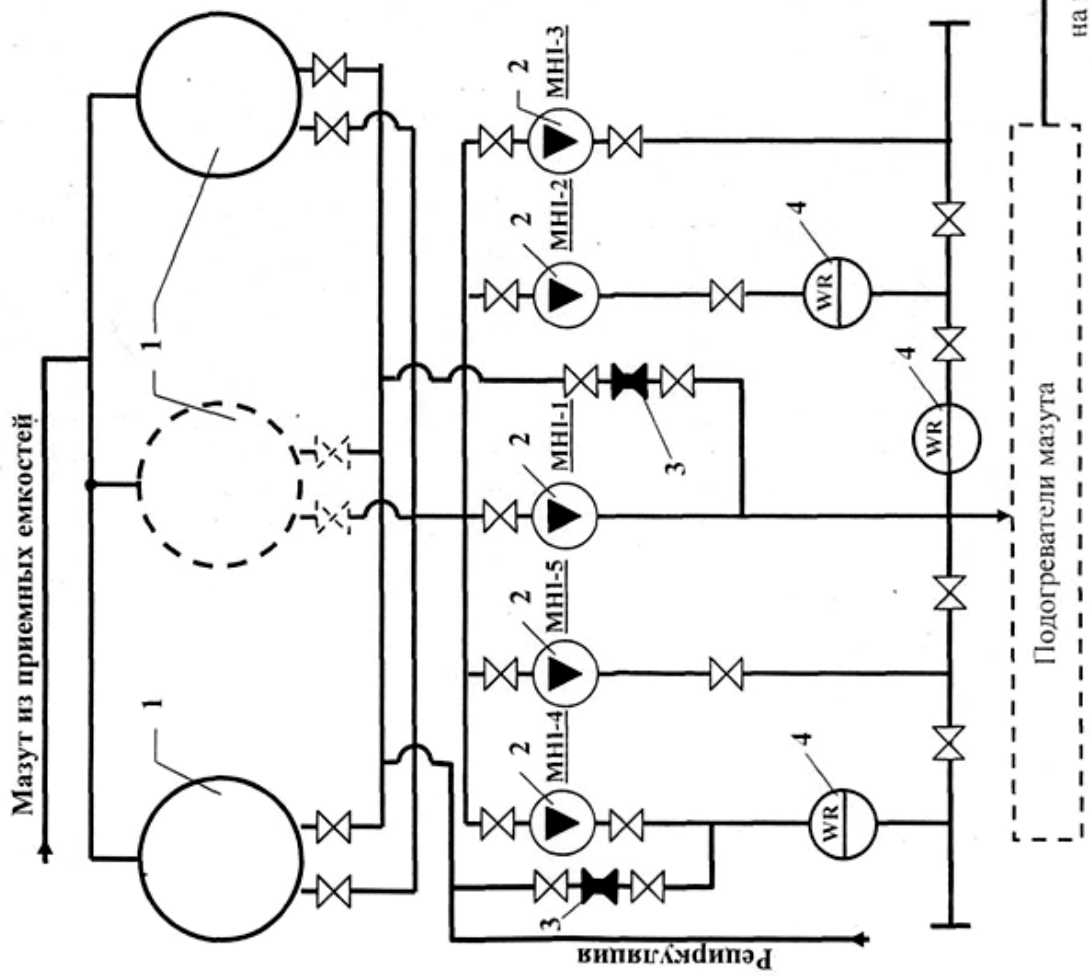
После внедрения двухступенчатой схемы эмульгирования и активации топлива перед сжиганием, для определения влажности и дисперсности были отобраны пробы неэмульгированного мазута, водо-мазутной эмульсии и активированного топлива непосредственно перед форсунками.

Проба неэмульгированного мазута отбиралась с воздушника насоса 1-го подъема после фильтра грубой очистки.

Дисперсный состав водомазутной эмульсии определялся при помощи микроскопа с масштабной сеткой по РД 34.44.215-96. Усредненные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Усредненные результаты дисперсного состава водомазутной эмульсии

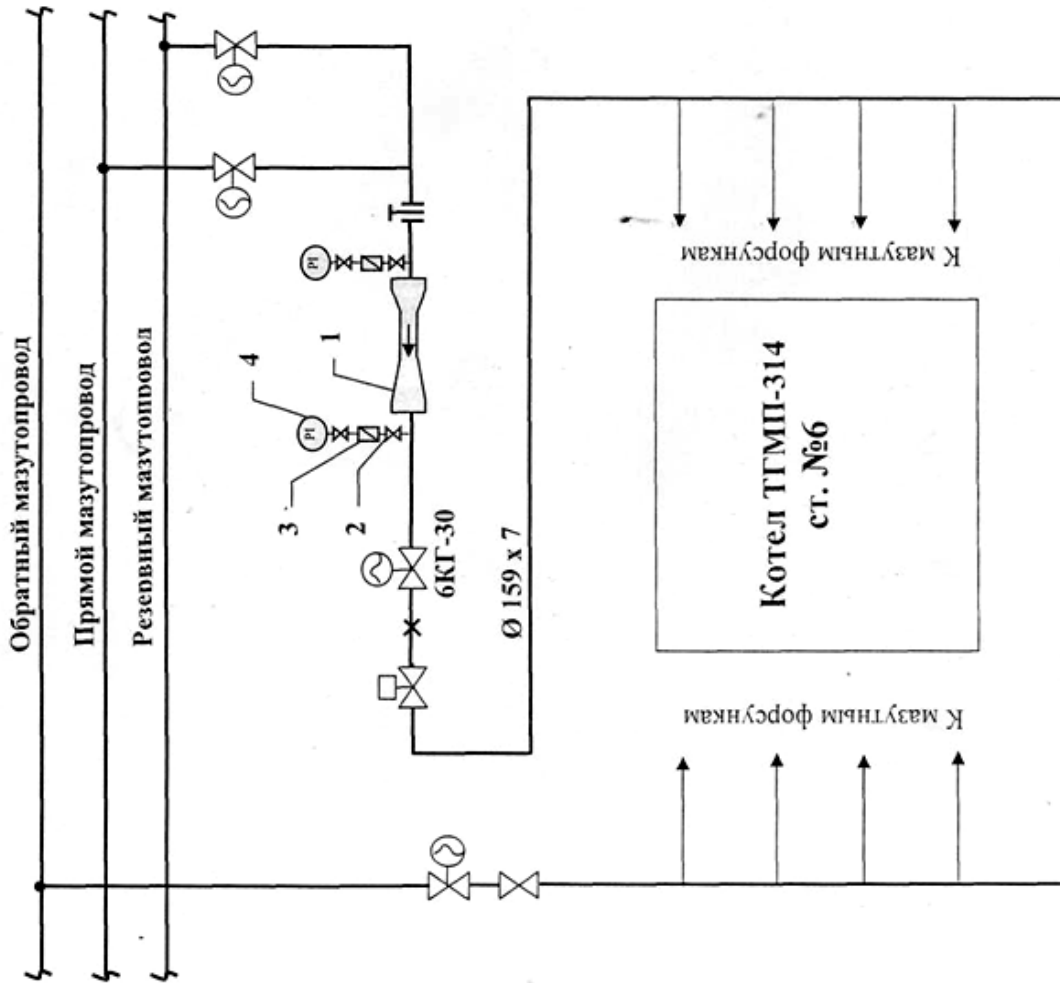
Пробы	Содержание воды, W^p , %	Дисперсность водной фазы	
		Размер капель воды, мкм	Количество капель в поле зрения, в % от общего числа
Неэмульгированный мазут	9,6	5...15	38
		15...30	36
		30...50	24
		50...100	2
Водомазутная эмульсия	9,3	5-10	50
		10-15	33
		15-30	17
		свыше 30	отс.



поз.	Наименование	Х-ка	Кол.	Прим.
4.	Влагомер магистральный	Шкала 0...20%	3	Уст. в 1998 г.
3.	Гидродинамический кавитационный смеситель	$Q=420\text{ м}^3/\text{ч}$, $H=0,7\text{ МПа}$, Ду250	2	Уст. в 1993 г., заменены в 2000 г.
2.	Насосы I-го подъема	$Q = 450\text{ м}^3/\text{ч}$, $H = 0,5\text{ МПа}$	5	
1.	Резервуары хранения		8	

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОРУДОВАНИЯ

Рис.1. Схема установки ГКС после насосов I-го подъема.



№п/п	Наименование	Обозначение	Хар-ка	Кол.	Примеч.
4	Манометр	МП4-У	Шкала 0...10 МПа	2	
3	Сосуд разделит.	РС-25	Р=250 МПа	2	
2	Клапан запорный Гидродинамически и кавитационный активатор	588	Д,10 Ру 250 Q _{max} =80 т/ч, Р _р =3,8 МПа, ΔР _{max} =0,35МПа	4	
1		ГКА		1	

СПЕЦИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ:

- ⊗ - отсечной (аварийный) клапан;
- ⊗ - задвижка с электроприводом;
- × - расходомерная шайба;
- Π - ремонтная заглушка.

ПРИМЕЧАНИЕ:

1. Данный чертеж рассматривать совместно со схемой паромазутопроводов энергетического котла ТГМП-314 ст. №6
2. КТЦ ТЭЦ-23 ф-ла АО МОСЭНЕРГО; Условно показана часть схемы паромазутопроводов.

Рис.2. Схема установки ГКА перед котлом.

Для активации топлива непосредственно перед форсунками были установлены ГКА на прямых мазутопроводах энергетических котлов ТГМП-314 ст. №5 и №7 в 2000 г., в 2002 г. — на котле ст. №6, в 2003 г. — на котле ст. №8.

ГКА на энергетическом котле ТГМП-314 установлен перед головной *задвигкой* котла на прямом участке мазутопровода $\varnothing 159 \times 7$. Расчет ГКА выполнялся по следующим исходным данным:

- рабочее давление — 3,8 МПа;

- давление условное — 6,3 МПа;
- максимальный расход мазута — 80 т/ч;
- температура среды, °С — 120...140;
- максимально допустимые потери напора на ГКА — 0,35 МПа;
- присоединение ГКА — сварное под трубу $\varnothing 159 \times 7$.

В рабочем участке ГКА установлены кавитирующие тела в виде криволинейного профиля наименьшего сопротивления (рис.3).

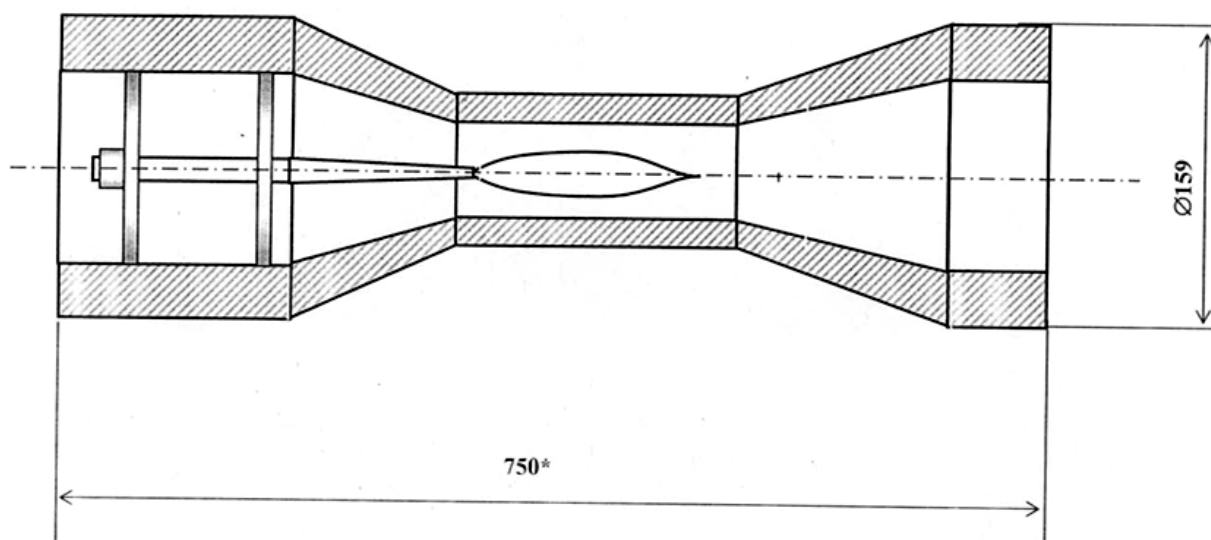


Рис. 3. Гидродинамический кавитационный активатор (общий вид, разрез)

Режим кавитации в рабочем участке ГКА достигается за счет достижения давления на 0,2...0,35 МПа. Регулировочная характеристика клапана обеспечивает поддержания давления, требуемого для нормального режима работы форсунок.

В процессе наладки и испытаний ГКА отбирались пробы мазута для определения влажности, вязкости и содержания механических примесей.

В табл. 2 приведены усредненные данные анализов ВМЭ, полученные при испытаниях.

Таблица 2. Результаты анализов ВМЭ

Место отбора проб	Содержание воды, W ^p , %	Дисперсность	Механические примеси, %
Прямой мазутопровод блока №6 (до ГКА)	11,1	3...6 мкм — 56 %; 6...12 мкм — 28 % 12...20 мкм — 16 %	0,17
Прямой мазутопровод блока №6 (после ГКА)	10,9	3...6 мкм — 79 %; 6...12 мкм — 18 % 12...20 мкм — 3 %	0,022

ВЫВОДЫ

1. Несмотря на повышенную исходную влажность мазута, были выдержаны режимные характеристики котла. Дисперсный состав воды после гидромеханической кавитационной обработки существенно уменьшился. Количество механических примесей, очевидно, осталось таким же, но произошла их деструкция до более мелкой фазы, что увеличило

полноту сгорания топлива и снизило заносы сажей теплообменных поверхностей котла.

2. По нашему мнению, наилучшим способом подготовки мазута к сжиганию, независимо от содержания влаги, является его двухступенчатая обработка в кавитационном поле.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. **В.М. Иванов.** Топливные эмульсии. М.: Издательство Академии наук СССР, 1962
2. **Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит.** Кавитация, под ред. В.И.Полежаева. " М.: «Мир», 1974.
3. **В.А. Корягин.** Сжигание водотопливных эмульсий и снижение вредных выбросов. С..Петербург «Недра», 1995.
4. **И.В. Галас, О.В. Морозов, Ю.М. Усман.** Влияние эмульгированного мазута на выбросы вредных веществ. Энергосбережения и водоподготовка. №3, 2000 г.
5. **О применении водомазутной эмульсии** для сжигания в котельных установках, Булгаков Б.Б., Булгаков А.Б., Преснов Г.В., Турченко В.И. и др. М.: Энергетическое строительство, 1995, №6.
6. **М.Г. Лысков, В.И. Кормилицын, А.А. Румынский.** Комплексная экосовместимая технология сжигания мазута в виде водо-мазутной эмульсии и природного газа с добавками сбросных вод. Теплоэнергетика, 1996, №9.

Н.А. Зройчиков, М.Г. Лысков, А.Б. Булгаков, Е.А. Морозова. Исследование и опыт применения водомазутных эмульсий на энергетических котлах ТГМП-314 и ТГМ-96 // Теплоэнергетика. — № 6. — 2006. — С. 31–35