

Влияние содержания влаги в зоне горения на эмиссию оксидов азота и серы

В роботі наведені дані експериментів впливу водяних парів при спалюванні вуглеводневого палива на емісію оксидів азоту, сірки та інших шкідливих речовин. Доведено, що введення в зону горіння вологи у вигляді водяних парів або води при спалюванні водомазутної емульсії істотно зменшує викиди NO_x та SO_2 в атмосферу.

In the work there are results of the experiments of the influence of water steams during the burning of carbohydrate fuel on the nitrogen oxid, sulfur and other harmful substances emission.

1. Анализ проблемы и постановка задачи исследований

При сжигании углеводородных топлив в составе дымовых газов имеются высокотоксичные оксиды азота NO_x (сумма NO и NO_2), монооксид углерода CO , несгоревшие углеводороды и продукты их неполного окисления (альдегиды, кетоны), оксиды серы SO_x (сумма SO_2 и SO_3), а также твердые аэрозольные частицы, в состав которых могут входить различные химические соединения, включая канцерогенные вещества (например, бенз(а)пирен $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$). Образование NO_x , SO_x , CO происходит при прохождении высокотемпературных процессов сжигания топлива, а образование SO_3 и аэрозолей зависит также от химического состава топлива и его приготовления.

Процессы горения происходят в условиях значительной неравномерности полей концентрации компонентов и температур, которые зависят от конструкции форсунок и горелочных устройств в целом, формирующих структуру зон смесеобразования и горения, а также от граничных эффектов (теплоотвод в стенку топки и пограничный слой, распределение концентраций горючего и окислителя и т.д.).

Существуют различные методы снижения концентраций оксидов азота, которые образуются в условиях высоких температур: рециркуляция дымовых газов,

двухступенчатое сжигание, повышение температуры топлива, рассредоточение зоны горения и изменение скорости охлаждения факела, каталитические присадки к топливу. Для уменьшения эмиссии NO_x и SO_x до уровня ПДВ необходимо использовать при сжигании топлива комбинацию 2...3 мероприятий.

Из большого числа известных технологических мероприятий по подавлению процессов образования NO_x наиболее широко применяемыми при сжигании мазута и природного газа являются: рециркуляция продуктов сгорания и сжигание топлив с пониженными избытками воздуха. В результате применения этих и некоторых других «топочных» методов [7] удается снизить концентрации NO_x в дымовых газах до 500...700 мг/м^3 и ниже, а при сжигании природного газа и мазута – до 150...200 мг/м^3 , но для этого требуются большие расходы рециркуляции дымовых газов (более 8...12%, что технико-экономически не всегда приемлемо). Сжигание с предельно низкими избытками воздуха или даже при стехиометрических условиях требует надежной работы автоматики горения топлива и применения специальных устройств для автоматического поддержания процесса сжигания топлива в заданном режиме.



Наиболее приемлемым и удобным в эксплуатации котельных установок является применение в качестве присадок воды. Это обусловлено доступностью, дешевизной и хоро-

шими эксплуатационными качествами воды, а также тем, что значительная часть топлив (жидких и твердых) содержит определенное количество влаги (обводненные топлива).

2. Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем

Подача воды в реакционную зону горения может осуществляться двумя способами: путем впрыска воды или пара, а также путем применения водотопливных эмульсий. Следует отметить, что имеется достаточно большое количество разноречивых (в том числе и отрицательных) опытных данных по применению добавок воды. Чаще всего эти результаты можно объяснить тем, что эксперименты проводились на серийных промышленных объектах, не обеспечивающих оптимальных условий проведения исследований.

Максимальное количество NO образуется в зоне с коэффициентами избытка воздуха $\alpha = 1,1 \dots 1,4$, а CO – в зоне с $\alpha < 1$ [1]. Поэтому ввод воды для подавления образования оксидов азота следует осуществлять локализовано, в зоны факела с $\alpha = 1,1 \dots 1,4$ по всем их длинам. Впрыск воды в локальную зону факела пламени осуществляется с тем условием, чтобы обеспечить ее проникновение по всей длине зоны с $\alpha = 1,1 \dots 1,4$.

При подаче влаги в тракт горячего воздуха (дозировка воды составляет до 10% расхода топлива) подавление оксидов азота составляет 25%, а при рекомендуемом авторами локальном впрыске [6] – от двух- до пятикратного подавления образования оксидов азота по сравнению с вариантом сжигания необводненного мазута. Локализованный ввод воды резко уменьшает потребное количество воды для обеспечения эффективного подавления образования оксидов азота. При этом не происходит (что также очень важно) снижения температурного уровня во всем объеме пламени, что сглаживает влияние впрыска воды на энергетические характеристики процесса. При сжигании ВТЭ подвод воды к месту горения осуществляется в момент микровзрыва и начала процесса горения, что

можно рассматривать как локализованный ввод влаги.

Более значительное снижение концентрации NO_x может быть получено в режимах, сочетающих локальный дозированный впрыск воды в зону горения и работу на пониженных коэффициентах избытка воздуха. В исследованном диапазоне $\alpha''_{\text{кпп}} = 1,05 \dots 1,2$, снижение концентрации NO_x в продуктах сгорания с уменьшением $\alpha''_{\text{кпп}}$ достигало 15...20% в режимах с впрыском и без впрыска воды. Однако сочетание впрыска воды и пониженных избытков воздуха (и даже предельно низких $\alpha''_{\text{кпп}} = 1,02 \dots 1,04$) особенно благоприятно, так как в этом случае достигается снижение уровня концентраций ΔC_{NO_x} на 200...220 мг/м³ в дымовых газах при сохранении высокой экономичности работы котла. В результате экспериментов установлено, что локальный дозированный впрыск воды наиболее эффективен при максимальных (номинальной и выше) нагрузках котла [7].

Использование высоковязких мазутов в большинстве случаев неизбежно связано с их обводнением, которое в зависимости от условий выгрузки, хранения и транспортировки достигает 20%. Сжигание обводненных мазутов без их эмульгирования, как правило, сопровождается нарушением точных процессов и снижением экономичности работы котельных установок. Поэтому одним из объективных способов снижения выбросов оксидов азота с продуктами сгорания топлив энергетических котлов является сжигание специально подготовленных водомазутных эмульсий (ВМЭ). При сжигании мазута в виде ВМЭ интенсифицируется процесс горения за счет вторичного распыливания топлива в объеме топki, а также появляется возможность использовать обводненные мазуты без предварительного их обезвоживания. Эффективность сжига-

ния ВМЭ в значительной мере зависит от дисперсных характеристик самих эмульсий. Известно, что при сжигании эмульсии одинаковой влажности с различными значениями размеров дисперсной фазы достигается разный результат по снижению выбросов в атмосферу вредных веществ.

При сжигании обводненных эмульгированных мазутов (при содержании воды до 10%) в сопоставимых условиях сокращаются выбросы оксидов азота без заметного снижения экономичности. По мере увеличения степени обводненности мазута экологические показатели (по выбросам оксидов азота) улучшаются. За счет ступенчатого сжигания обводненного эмульгированного мазута при разных нагрузках котла выбросы оксидов азота сокращались от 15 до 30%. При дополнительном введении рециркуляции сокращение выбросов достигало 45% [13].

Сжигание ВМЭ вместо чистого мазута позволяет значительно снизить содержание вредных оксидов азота в продуктах сгорания в широком диапазоне коэффициента избытка воздуха. При содержании в ВМЭ 3...11% воды выход оксидов азота снижается приблизительно на 40...60%. Сжигание ВМЭ оказалось более эффективным способом сжигания образований вредных выбросов, чем непосредственное введение воды или водяного пара в топку.

В реальных условиях сжигания энергетических топлив в продуктах сгорания после охлаждения их ниже 1000 К остается определенное количество NO и CO, концентрации которых определяются степенью неравновесности процесса, зависящей от скорости охлаждения продуктов сгорания, и степенью равномерности смешения компонентов.

Химическая неравномерность возникает из-за несоответствия скоростей отвода теплоты и химических реакций при каждой температуре. Скорость отвода теплоты принято характеризовать темпом охлаждения газа $dT/d\tau$, К/с. В результате концентрации токсичных компонентов стабилизируются на каком-то уровне и оказываются равными на выходе некоторой равновесной концен-

трации, соответствующей промежуточной температуре замораживания T_f . Величина температуры замораживания T_f характеризует токсичность процесса и зависит от темпа охлаждения газа и исходного химического состава смеси. Для условий организации процессов сжигания топлив в топках паровых котлов температуры замораживания соответствуют $T_{fNO}=2200$ К и $T_{fCO}=1500-1700$ К [1], т.е. происходит в локальных высокотемпературных зонах факела.

Темп охлаждения продуктов сгорания влияет не только на конечное содержание оксидов азота в продуктах сгорания, но и на максимальную концентрацию оксидов в зоне их образования. Следовательно, пути управления процессом подавления образования оксидов азота должны быть направлены непосредственно на обнаружение локальных высокотемпературных зон и состоять в эффективном воздействии на них или должны обеспечиваться высокая равномерность смешения компонентов и равномерное распределение температуры газов в факеле, что обеспечивается при сжигании ВМЭ.

Важным является правильный выбор дозировки вводимой воды. При пониженном количестве вводимой воды эффект нейтрализации получается неполным, а при чрезмерном впрыске концентрации NO и CO «замораживаются», что еще более нежелательно. В зависимости от конструктивных особенностей объекта (в первую очередь от протяженности реакционной зоны) меняется и дозировка воды.

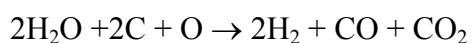
По данным [4] при сжигании мазута с увеличением расхода влаги на номинальной нагрузке котла до 10 т/ч снижение содержания оксидов азота в дымовых газах достигает 20...22%, причем эффект одинаков при подаче влаги как в виде пара, так и в виде пароводяной смеси. По мнению авторов, с одной стороны, ввод влаги в топку в количестве 2% паропроизводительности котла приводит к увеличению объема продуктов сгорания в зоне активного горения в результате балластирования их водяными парами на 2,5...3%, что в такой же пропорции снижает концентрации реагирующих веществ. Сле-



довательно, этот фактор не может быть определяющим в суммарном эффекте влияния влаги на снижение образования NO. Время пребывания реагирующих веществ в зоне высоких температур практически не меняется. С другой стороны, указанное количество влаги (например, пара с температурой 520 К), введенное в тракт горячего воздуха, приводит к снижению температуры факела на 30...40 К. Расчеты показывают, что такое снижение температуры факела, влияющее на скорость протекания реакции образования NO, уменьшает скорость реакции примерно в 2 раза. Таким образом, расхолаживанием факела водяными парами также нельзя объяснить влияние дополнительной влаги на снижение образования оксидов азота в топке. По-видимому, объяснение нужно искать в кинетике реакций горения и образования NO, на что обращалось внимание в работе [9].

Уменьшение скорости охлаждения приводит к возрастанию неравновесной концентрации оксидов азота, что согласуется с выводами работы [12] о том, что в крупных паровых котлах по сравнению с небольшими установками выход оксидов азота оказывается большим вследствие малой скорости охлаждения в зоне горения. Для уменьшения количества выбрасываемого в атмосферу NO необходимо понижать температуру горения $T_{\text{макс}}$ и одновременно стремиться к достижению максимальной скорости охлаждения продуктов сгорания.

В некоторых литературных источниках [14] отмечается, что при подаче топливно-водяной эмульсии ($G_{\text{в}} = 10\%$) концентрация оксидов азота снижается в 1,5...2,0 раза. Поскольку такое снижение NO_x трудно объяснить расхолаживанием факела, делается предположение о воздействии влаги на образование NO_x через кинетику реакции горения. В соответствии с ним образующийся при высоких температурах атомарный кислород в присутствии водяных паров в первую очередь реагирует с углеродом



и гораздо труднее с азотом, а концентрация атомарного кислорода, который мог бы образовывать оксиды азота, снижается. В опытах авторов снижение NO_x при сжигании топливно-водяной эмульсии значительно меньше и может быть полностью объяснено снижением температурного уровня факела.

Вводимая в реакционную зону вода играет не только роль охладителя, но и химического реагента, являющегося источником активных радикалов OH и H, существенно влияющих на процесс образования NO и CO.

По данным испытаний камеры сгорания высокого давления ГТ-100-750-2 [14] впрыск пара в количестве $G_{\text{п}}/G_{\text{т}} \approx 1,5$ уменьшает выброс оксидов азота со 120 до 60 мг/м³ (в условиях стенда). Эффективность впрыска пара достигалась выбором оптимального места и способа впрыска пара. Впрыск пара в количестве $G_{\text{п}}/G_{\text{т}} = 1,5$ снижает температуру факела в корневом сечении в среднем на 150...200°C. Вместе с тем подача воды в зону горения приводит к увеличению концентрации токсичного CO в продуктах сгорания за камерой сгорания в 4-6 раз.

Увеличение концентрации CO может быть объяснено появлением низкотемпературных зон, бедных кислородом, а также процессом газификации топлива с участием паров воды. При впрыске пара в исследуемых пределах концентрация монооксида углерода на выхлопе практически не менялась. Образовавшийся монооксид углерода в корневом сечении факела догорал в объеме пламенной трубы.

Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям основных закономерностей образования термических оксидов азота [10] их выход пропорционален температуре и времени пребывания в зоне горения $\tau_{\text{лг}}$, а также теплонапряжению зоны активного горения (ЗАГ) $q_{\text{лг}}$. Для уменьшения выхода оксидов азота необходимо снизить теплонапряжение $q_{\text{лг}}$ и время пребывания $\tau_{\text{лг}}$ в ЗАГ по отдельности или одновременно. Однако существуют определенные значения характеристик ЗАГ, ниже которых снижение уже нецелесообразно, так как это

вызывает ухудшение топочного процесса. Поэтому не рекомендуется снижать величину теплонапряжения ЗАГ для котлов с $q_{\text{лг}} < 0,8 \text{ МВт/м}^2$ или уменьшать время пребывания в ЗАГ для котлов с $\tau_{\text{лг}} < 0,3\text{--}0,35 \text{ с}$.

С помощью зависимости $\text{NO}_x = f(q_{\text{лг}}, \tau_{\text{лг}})$ принципиально можно определить оптимальные пути снижения образования оксидов азота. Для этого в зависимости от диапазонов характеристик ЗАГ следует изменять одну из них или обе одновременно. Сокращение времени пребывания $\tau_{\text{лг}}$ достигается благодаря, например, отключению верхнего яруса горелок при сохранении неизменной паропроизводительности котла, а также путем подачи газов рециркуляции в горелки или воздушные короба. Снижение величины теплонапряжения ЗАГ можно обеспечить в результате организации ступенчатого или нестехиометрического сжигания, установкой двусветного экрана и пр.

Основные закономерности образования и разложения оксида азота при горении выражаются цепной реакцией [5]: ($\text{O} + \text{N}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{N}$; $\text{N} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{O}$), которая в условиях непрерывно изменяющейся температуры имеет две характерные области. В первой области (дозакалочной) содержание оксида азота в продуктах сгорания определяется кинетикой ее образования, во второй (закалочной) конечный выход оксида азота определяется кинетикой его разложения. Определяющим параметром при переходе из одной области в другую служит отношение времени протекания реакции ко времени установления равновесия $\tau_p / [\tau_{\text{NO}}]$. Дозакалочный режим осуществляется в области $\tau_p / [\tau_{\text{NO}}] \ll 1$, закалочный – в области $\tau_p / [\tau_{\text{NO}}] \gg 1$. Четкой границы между областями, естественно, нет, и при $\tau_p / [\tau_{\text{NO}}] \approx 1$ имеется переходный режим, в котором влияние образования и разложения оксида азота на конечное содержание оксида в продуктах сгорания соизмеримо.

Уровень выброса NO для заданного избытка воздуха при переходе от исходных условий (сжигание одного мазута) к сжиганию эмульсий может не меняться. Это обстоятельство объясняется высоким содержанием азота в самом мазуте. Сжигание эмульсии

сказывается только на воздушных NO. Поскольку выбросы NO при сжигании топлив с высоким содержанием азота обусловлены главным образом окислением азота топлива, переход на сжигание эмульсий мало сказывается на этих выбросах. Однако кривая выброса NO действительно снижается с уменьшением коэффициента избытка воздуха. Если выбрать режим работы с меньшим коэффициентом избытка воздуха, то можно уменьшить и уровень выброса NO. Так, в случае сжигания эмульсии с 17,5 %-ным содержанием воды [15] максимальное снижение выброса NO, равное 9%, было достигнуто при уменьшении коэффициента избытка воздуха до 1,17, что обусловило величину числа дымности 5,8 (равное числу дымности при сжигании одного только мазута при коэффициенте избытка воздуха 1,45).

Реакции образования высших оксидов азота из NO широко используется в технике и хорошо изучены ранее [5]. При температурах выше 600°C термодинамически устойчив только оксид азота. При более низких температурах возможно образование NO₂. При избытке кислорода в продуктах сгорания время окисления половины имеющегося оксида азота в диоксид равно:

$$\tau_{\text{NO}_2} = \frac{1}{k_{\text{NO}_2} C_{\text{NO}} C_{\text{O}_2}},$$

где k_{NO_2} – константа скорости реакции (при 30°C $k_{\text{NO}_2} = 0,004$, при 100°C $k_{\text{NO}_2} = 0,002$ и при 200°C $k_{\text{NO}_2} = 0,0009(\%)^2 \cdot \text{с}^{-1}$). При $\alpha = 1,25$, $C_{\text{NO}} = 0,63\%$, $\text{CO}_2 = 20\%$ получается $\tau_{\text{NO}_2} = 20 \text{ с}$.

По данным [8], при образовании оксидов азота из атмосферного азота количество NO₂ по длине факела до определенного расстояния увеличивается, затем, несколько понизившись, стабилизируется.

По данным [11], для защиты воздушного бассейна от вредных выбросов на Воронежской ТЭЦ предусмотрена установка контактных воздухоподогревателей, использующих значительную часть горячей воды, нагретой в контактном экономайзере (КЭ), для предварительного подогрева и увлажнения



ния дутьевого воздуха, что приводит к снижению температурного уровня во всем топочном объеме, препятствует образованию оксидов азота в топке. При этом увеличивается доля NO_2 (к сожалению, авторы не приводят конкретных данных), который, отличаясь хорошей растворимостью в воде, в значительной степени абсорбируется в контактном экономайзере (КЭ). В соответствии с расчетами, подтвержденными практикой использования контактных утилизационных установок, выбросы теплоты с уходящими газами снижаются в 2...3 раза, выбросы оксидов азота – в 2 раза. Таким образом, достигается не только теплоутилизационный, но и экологический эффект.

Одновременно с образованием NO_x , как показали проведенные измерения, идет доокисление SO_2 в SO_3 . Этот процесс, как известно из многих работ [8], протекает под влиянием имеющегося в газе атомарного кислорода и тем самым тормозит образование NO из молекулярного азота. Но в ходе работы было установлено, что наличие в топливе серы также тормозит образование NO_x из азота топлива. На основе проведенных опытов удалось составить для инженерных расчетов эмпирическую формулу расчета относительного уменьшения k выхода NO_x при наличии в топливе серы:

$$K = 0,4 + 0,6 \exp(-2,2 S_T),$$

где S_T – содержание серы в топливе, %.

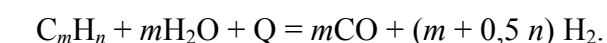
Наряду с интенсификацией смесеобразования водяные пары активно участвуют в химических реакциях пламенных процессов. Существенное влияние на эти процессы оказывают диссоциация воды, участие воды в газификации углерода, а также перераспре-

3. Цель исследований

Целью работы является исследования влияния ввода водяных паров и сжигания ВМЭ на процессы горения и эмиссию NO_x , SO_2 и продуктов неполного сгорания. Исследования проводились на экспериментальной установке при сжигании необходимо-го топлива М40 ($S^p = 1,8\%$, $W^p = 2\%$) с коэф-

фициентом избытка воздуха $\alpha = 1,5$, при вводе водяных паров к корню факела и при сжигании ВМЭ на основе этого мазута с содержанием воды 15 и 30%.

Анализ состава дымовых газов на содержание O_2 и RO_2 осуществлялся с помощью газоанализатора ГХП-3М, а содержание

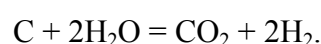


деление теплоты, выделяющейся при экзотермических реакциях. Диссоциация молекул воды происходит под воздействием высокой температуры. Она способствует повышению скорости горения.

В условиях топки наряду с чисто физическим воздействием воды возможно проявление ее химической активности, заключающейся в протекании реакции водяного пара с углеводородным топливом [3]:

В результате реакции конверсии топлива с водяным паром образуются оксид углерода и водород. Процесс довольно активно протекает при температурах выше 1000°C , причем его полнота определяется количеством теплоты, подведенной к реагентам в период реакции. Затраченная на процесс теплота частично компенсируется при горении образовавшихся CO и H_2 . В то же время присутствие водорода оказывает положительное воздействие на протекание процесса горения в целом.

Химическая активность воды выражается также в газификации несгоревших сажистых остатков топлива, которые в присутствии достаточного количества паров воды взаимодействуют с последними при температурах выше 800°C в соответствии с уравнением



Следовательно, процесс сжигания топлив в топках паровых котлов необходимо организовать так, чтобы одновременно обеспечивать и минимальный выброс с уходящими газами оксидов азота, и полное выгорание горючего за счет определенного сочетания режимных факторов и применения специальных

продуктов неполного горения – с помощью хроматографа “Газохром 3101”. Газоанализатор ГХП-3М имеет цену деления 0,2 мл. Допускаемые отклонения показаний шкалы при 20°C и общей вместимости бюретки 100 ± 2 мл. Хроматограф “Газохром 3101” имеет порог чувствительности, % объемные: по водороду (H₂) – 5·10⁻⁴; по монооксиду углерода (CO) – 1·10⁻³; по метану (CH₄) – 1·10⁻³. Содержание аэрозоля серной кислоты определялось путем отбора его на фильтр из пористого стекла в области температур дымовых газов 250°C...300°C.

Отбор газов в различных точках топки производился с помощью водоохлаждаемых трубок, что способствует сохранению состава дымовых газов, взятого в соответствующей точке отбора (не происходит дожиг продуктов неполного горения). Отбор газов осуществлялся после стабилизации процесса горения. Стабильность процесса горения определялась по составу дымовых газов и температуре дымовых газов на выходе из топки. Для исследования процессов горения необходимого и обводненного топлива по длине и сечению топки осуществлялся отбор газов в отдельных точках. Схема расположения точек отбора газов представлена на рис. 1, начиная от среза горелки. Пробы газов из различных точек топки отбиралась поочередно, т.к. ввод газозаборной трубки нарушает режим процесса горения в последующей за газозаборной трубкой части факела, хотя было бы целесообразно брать пробы на анализ из всех точек отбора одновременно.

Результаты исследований показали, что процессы горения при сжигании обводненного и необходимого мазута отличаются по качеству горения и по количеству продуктов неполного горения в дымовых газах по длине и сечению топки.

При сжигании необходимого мазута максимальное содержание CO наблюдается у среза ротационной горелки (сечение I), причем в центре (по оси факела) содержание CO меньше, чем у стен топки, что объясняется структурой факела при использовании ротационной форсунки. Далее по длине топки содержание CO снижается постепенно, и

на выходе из топки концентрации выравниваются и находятся на уровне 0,04 об. % (рис. 1).

При вводе водяных паров к корню факела в количестве, эквивалентном 30% воды в эмульсии, содержание CO у среза горелки ниже по сравнению с режимом горения необходимого мазута, но затем наблюдается постепенное увеличение концентрации CO (в центре меньше, чем у стен). Максимальное значение концентрации CO выше (в сечении II) по сравнению с режимом горения необходимого мазута. После достижения максимума содержание CO резко снижается и к середине длины топки (сечение III) практически исчезает.

При сжигании водомазутных эмульсий содержание CO в области максимума выше, чем при вводе водяных паров. Практическое отсутствие CO наблюдается к середине длины топки (сечение III) также, как и при вводе водяных паров. При этом необходимо отметить, что при содержании воды в эмульсии 15% максимум концентрации CO наблюдается недалеко от среза горелки (сечение I). При содержании воды в эмульсии 30% наблюдается смещение максимума (к сечению II) при практически таком же значении концентрации.

Измерения концентрации NO_x по длине факела показали, что после максимума содержания CO в факеле наблюдается снижение концентрации NO. Полученные при горении ВМЭ данные согласуются с опубликованными литературными данными.

Измерения содержания водорода H₂ при тех же условиях горения и ввода влаги показали, что процессы выхода H₂ проходят аналогично. При сжигании необходимого мазута содержание H₂ максимально у среза горелки (в центре концентрация ниже, чем у стен топки) и затем постепенно снижается по длине факела. При вводе водяных паров содержание H₂ выше, но не наблюдается явно выраженный максимум. Окисление H₂ идет постепенно и завершается даже дальше по длине топки.

При сжигании ВМЭ ход процессов появления и окисления H₂ меняется. При содержании воды 15% максимум концентрации

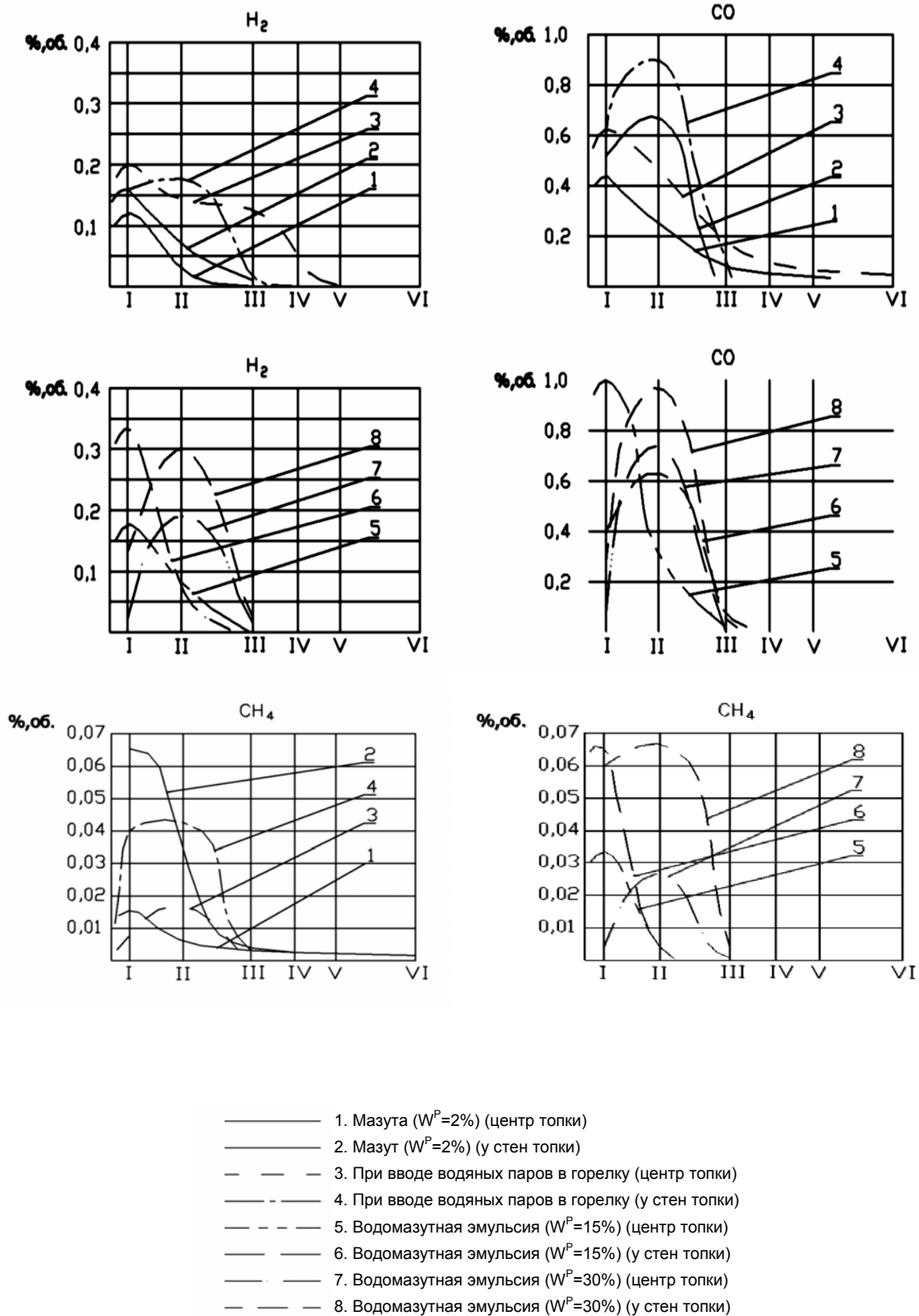


Рис. 1. Изменение содержания CO, H₂, CH₄ по длине и ширине топки при сжигании мазута М40 и водотопливной эмульсии при различных способах ввода воды в камеру сгорания

наблюдается у среза горелки, причем ее значение почти в два раза больше по сравнению с условиями при вводе водяных паров. Затем концентрация H_2 резко снижается вследствие высокой турбулентности в факеле при достаточно высоких температурах. При содержании воды в эмульсии 30% наблюдается более постепенный рост концентрации H_2 . Максимальная концентрация H_2 наблюдается дальше от среза горелки (сечение II). Снижение концентрации H_2 идет более плавно, видимо, из-за более низких температур горения, которые имеют место при вводе большего количества воды в зону горения.

Характер изменения концентрации метана в факеле отличается от содержания CO и H_2 . При сжигании необводненного мазута выход CH_4 в области максимума выше, чем при режиме горения этого мазута с вводом водяных паров. Но если при сжигании только мазута метан CH_4 содержится в дымовых газах и на выходе из топки, то при вводе водяных паров метан не был обнаружен к середине длины топки. При сжигании ВМЭ максимальное содержание CH_4 такое же, как при сжигании необводненного топлива. При содержании воды в эмульсии 15% максимум концентрации наблюдается у среза горелки (сечение I), как и в случае горения необводненного топлива. Но затем содержание CH_4 резко снижается. При содержании воды 30% максимум концентрации CH_4 смещается дальше от горелки, что, видимо, связано с большей концентрацией водяных паров и более низкой температурой горения, но затем наблюдается резкое снижение содержания CH_4 в связи с явлением “микровзрывов” при горении капель ВМЭ, что приводит к усилению турбулентности.

При практически одинаковых условиях горения топлив в неохлаждаемой камере сгорания экспериментальной установки (коэффициент избытка воздуха α находился в пределах 1,22...1,26) на выходе из нее наблюдается разное содержание оксидов азота NO_x в зависимости от способа ввода влаги в зону горения (рис. 2).

При сжигании необводненного ДТ (содержание серы $S^p=0,98\%$) фактическая

концентрация NO_x составила 389 мг/м^3 (при этом содержание NO_2 составило 60 мг/м^3 , т.е. $NO_2/NO=0,184$). При сжигании мазута М40 ($S^p=1,8\%$) содержание NO_x выше и составило 532 мг/м^3 (содержание NO_2 около 67 мг/м^3 , т.е. $NO_2/NO=0,143$).

При вводе водяных паров к корню факела при сжигании ДТ (содержание водяных паров эквивалентно вводу 30% воды) содержание NO_x снижается до 335 мг/м^3 ($NO_2=68,3 \text{ мг/м}^3$, а отношение NO_2/NO увеличилось до 0,256). При сжигании мазута М40 содержание NO_x снизилось до 399 мг/м^3 ($NO_2=84 \text{ мг/м}^3$, отношение NO_2/NO увеличилось до 0,268).

При сжигании ВМЭ на основе этого мазута при содержании воды в эмульсии 30% наблюдается значительное снижение суммарного содержания оксидов азота NO_x (до 166 мг/м^3), а доля NO_2 возрастает до 0,33.

Содержание сернистого ангидрида SO_2 при вводе водяных паров в топку также снижается с 432 мг/м^3 до 233 мг/м^3 (т.е. в 1,85 раза) при сжигании ДТ; с 449 мг/м^3 до 282 мг/м^3 (т.е. в 1,6 раза) при сжигании мазута М40. При сжигании ВМЭ (вода 30%) содержание SO_2 снизилось до 183 мг/м^3 , т.е. в 2,45 раза по сравнению со сжиганием необводненного топлива.

Следовательно, наличие водяных паров, их равномерное распределение (и других компонентов) по объему факела вследствие “микровзрывов”, равномерное распределение и снижение температуры в зоне горения приводят к уменьшению эмиссии оксидов NO_x и SO_2 , особенно при переходе на сжигание ВМЭ. Увеличивается доля NO_2 в NO_x к выходу из топки. Даже если увеличение содержания NO_2 происходит в охлаждаемой газоотборной трубке до прибора, то учитывая одинаковые условия проведения экспериментов во всех режимах, наблюдается увеличение содержания NO_2 . Это важно, так как при приближении к эквимольному соотношению NO и NO_2 степень поглощения оксидов азота конденсатом на поверхности нагрева с температурой ниже точки росы увеличится, что уменьшит их эмиссию из котла.

Однако по мере увеличения содержания воды в эмульсии при одновременном сни-

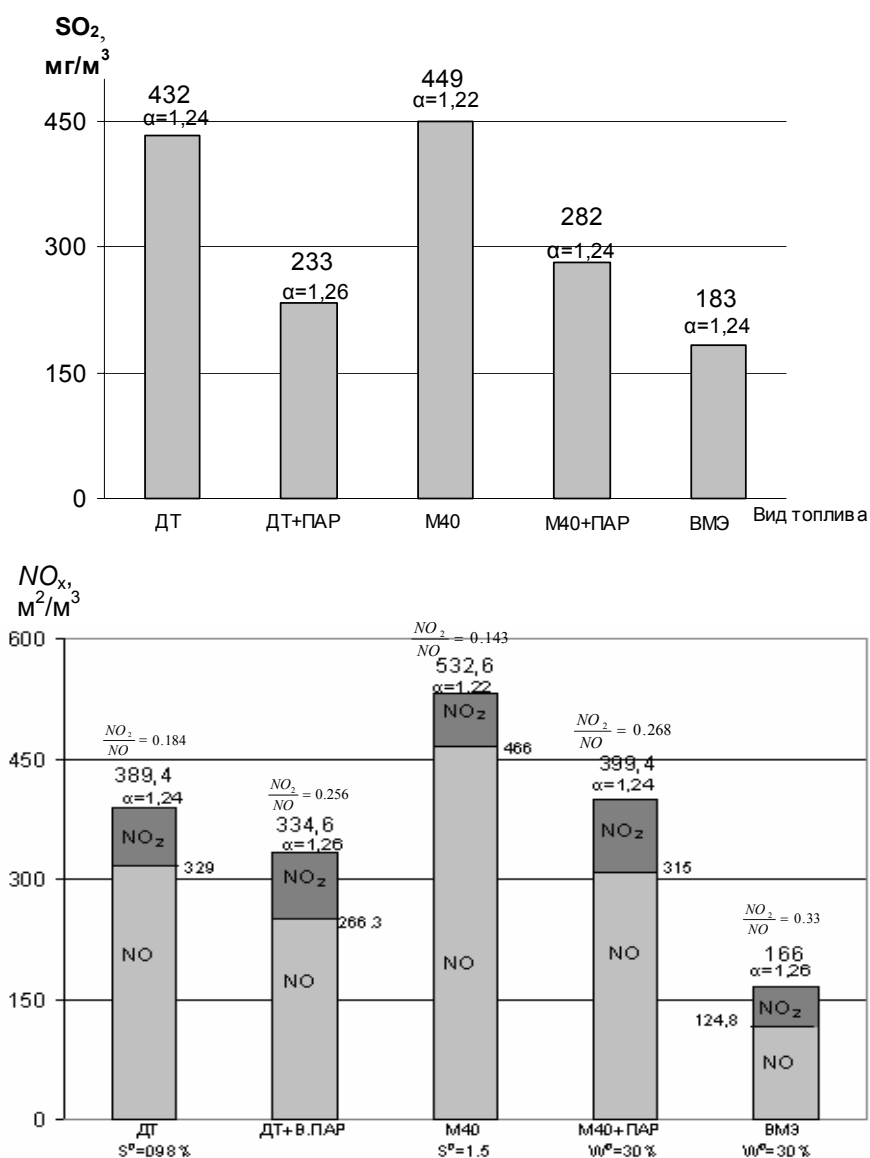


Рис. 2. Влияние ввода водяных паров, сжигания водомазутных эмульсий на эмиссию NO_x, SO₂

жении концентрации NO_x и SO₂ увеличивается содержание аэрозоля серной кислоты H₂SO₄, который улавливается электрофильтрами (например, при производстве серной кислоты нитрозным методом). При охлаждении дымовых газов по тракту котла может происходить конденсация паров серной кислоты в объеме с образованием аэрозолей. Ядрами гетерогенной конденсации могут являться частички золы и сажи с размерами 10⁻³...10⁻⁶ см. При этом необходимое переохлаждение газов по отношению к температуре насыщения над

плоской поверхностью составляет 2...3°C [2]. Чем меньше частица, тем менее интенсивно идет на ней конденсация. При сжигании ВМЭ размеры частиц из-за явления “микровзрывов” значительно меньше, чем при сжигании необводненного. В этом случае возможна гомогенная конденсация. При пересыщении, соответствующем этому процессу (при переохлаждении на 16...18°C), начинается образование новых ядер конденсации и соответственно более интенсивная конденсация кислоты в объеме дымовых газов.

Результаты исследований содержания в потоке дымовых газов NO_x , SO_2 , аэрозоля H_2SO_4 при увеличении содержания воды в эмульсии до 30% представлены на рис. 3.

При этом необходимо отметить, что появление аэрозоля H_2SO_4 было зафиксировано при содержании воды в эмульсии выше 10%.

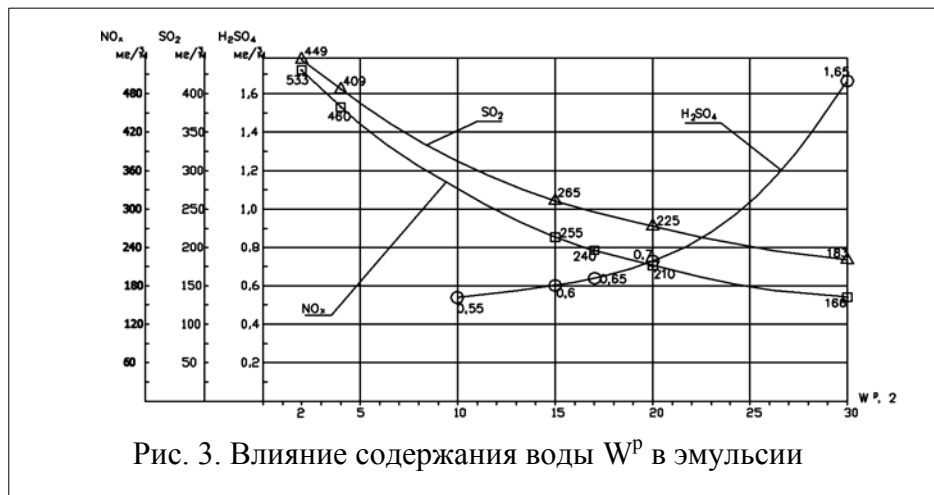


Рис. 3. Влияние содержания воды W^p в эмульсии

4. Выводы и перспективы дальнейшего использования результатов

1. Ввод в зону горения влаги в виде водяных паров или воды при сжигании водомазутной эмульсии существенно снижает эмиссию оксидов азота и серы в атмосферу.
2. Сжигание водомазутной эмульсии приводит к большему снижению эмиссии NO_x и SO_2 (при одинаковом содержании влаги).
3. При сжигании ВМЭ увеличивается доля NO_2 в оксидах азота.
4. Ввод водяных паров к корню факела и особенно сжигание водомазутной эмульсии улучшают процесс горения (при необходимом избытке воздуха), что приво-

дит к уменьшению эмиссии продуктов неполного горения.

5. С увеличением содержания воды в эмульсии увеличивается эмиссия аэрозоля серной кислоты, который может быть эффективно уловлен электрофилтрами.
6. Сжигание водомазутной эмульсии является наиболее эффективным средством снижения эмиссии NO и SO_2 благодаря более равномерному распределению по объему факела концентраций компонентов и необходимой скорости снижения температуры в факеле.

Литература

1. Авдеевский В.С., Пирумов У.Г., Папуша А.И., Григорьев В.А., Волков Э.П., Кормилицын В.И. Снижение выбросов окислов азота от энергетических установок путем ввода воды в зону горения факела // Московский энергетический институт. – 1984. – №50. – С. 3-19.
2. Альшевский В.Н. Образование аэрозолей серной кислоты в дымовых газах котлов // Теплоэнергетика. – 1980. – С. 43-45.
3. Ведрученко В.Р., Кокшаров М.В., Крайнов В.В. Каталитическое воздействие водной фазы водотопливных эмульсий и мобильные схемы их приготовления // Промышленная энергетика. – 1998. – С. 47-49.
4. Гаврилов А.Ф., Горбаненко А.Д., Туркестанова Е.Л. Влияние влаги, вводимой в горячий воздух, на содержание оксидов азота в продуктах сгорания газа и мазута // Теплоэнергетика. – 1983. – №10. – С. 13-15.
5. Гуревич Н.А., Жолудов А.С., Яковлев В.С., Домбровская Э.Л., Качурин А.Х., Ляскоронский В.Г., Нехамин М.М. Исследование выхода окислов азота в высокотемпературной камере сгорания тепловой мощностью 1,5 МВт // Теплоэнергетика, 1980. – №10. – С. 31-34.
6. Кормилицын В.И., Лысков М.Г., Збраилов И.Г., Тишина Т.А., Зарецкий В.З., Енякин Б.П., Попова И.Ф. Подавление оксидов азота впрысками воды в зону горения на паровом котле ТГМП-314Ц // Тр. МЭИ. – 1986. – №110. – С. 43-51.
7. Кормилицын В.И., Лысков М.Г., Новиков В.М., Кудрявцев Н.Ю. Подавление оксидов азота дозированной впрыском воды в зону горения топки котла // Теплоэнергетика. – 1990. – №10. – С. 73-78.
8. Отс А.А., Егорова Д.М., Саар К.Ю. Исследование образования окислов азота из азотосодержащих соединений топлива и факторов, влияющих на этот процесс // Теплоэнергетика. – 1982. – №12. – С. 15-18.
9. Рейсиг В.А., Сигал И.Я. Кинетические особенности образования оксидов азота в теплоэнергетических установках // Теплоэнергетика. – 1993. – №1. –