

УДК 662.613.5:661.98

СОВРЕМЕННЫЕ МАЛОТОКСИЧНЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ ТОПЛИВ

Таранчук А.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Тарасевич Л.А.

Один из перспективных путей снижения выбросов оксидов азота (NO_x) при сжигании газа и мазута – создание горелок, конструкция которых позволяет подавлять образование NO_x непосредственно в процессе горения.

Горелки для сжигания природного газа и мазута

Для установки на паровых и водогрейных котлах малой и средней мощности разработана газомазутная горелка, обеспечивающая надёжную и экономичную работу котлов в диапазоне изменения нагрузок от 30 до 100 % номинальной (рисунок 1).

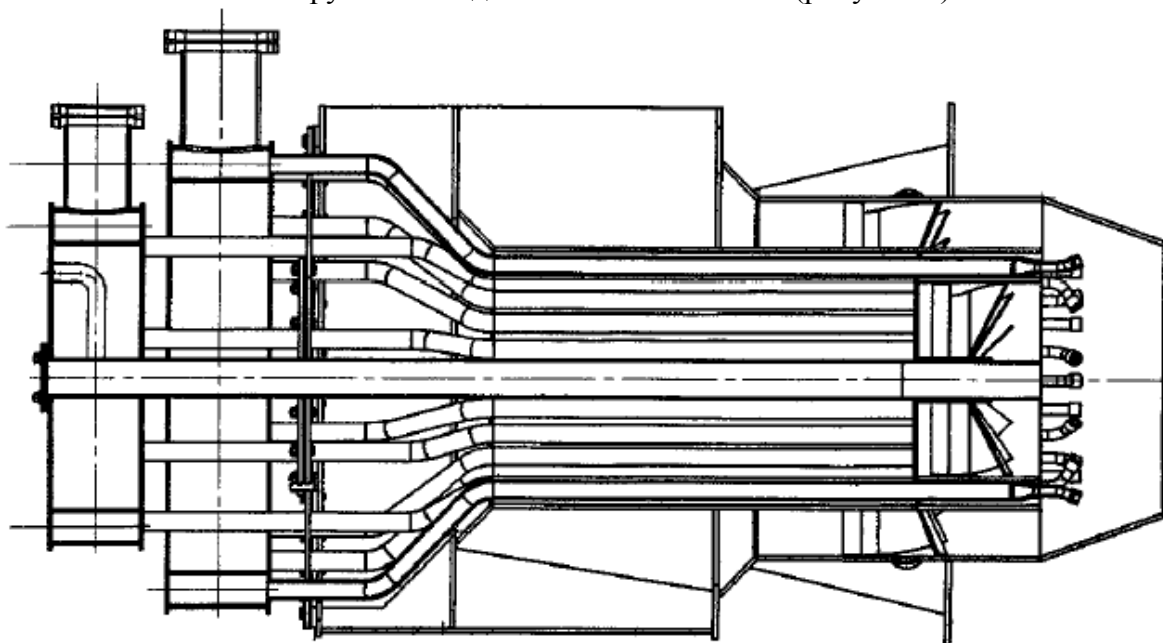


Рисунок 1. Газомазутная горелка ВТИ-ЗИО

Горелка выполнена двухканальной по воздуху. В центральном и периферийном каналах размещены аксиальные завихрители, с углом установки лопаток относительно оси потока 45 и 40° соответственно. По центральному каналу горелки подаётся треть общего расхода воздуха на горелку. В промежутке между каналами равномерно размещены газораздающие трубки. В горелке применена двухколлекторная раздача природного газа (малая газовая камера – центральный коллектор, большая газовая камера – периферийный коллектор). Предусмотрена возможность управления каждым потоком задвижками, установленными на подводящих газопроводах.

Из центрального коллектора в зону горения газ поступает по трубкам, концы которых загнуты к оси горелки в сторону центра, а из периферийного коллектора часть газа подаётся параллельно оси, а другая часть – под углом к оси горелки в поток воздуха периферийного канала. Горелка рассчитана на пропуск воздуха в смеси с дымовыми газами рециркуляции.

Испытания горелок номинальной производительностью 25 Гкал/ч на котле КВГМ-50, где они установлены в один ярус показали, что концентрация NO_x при сжигании газа не превышает 90 мг/м³ в пересчете на $\alpha = 1,4$ (при норме 125 мг/м³). Подача дымовых газов рециркуляции в горелки в смеси с общим воздухом (10÷11 %) дополнительно снижает концентрацию NO_x ещё в 2 раза (до 40 мг/м³).

Наблюдается существенное снижение концентрации NO_x и при сжигании мазута: без ввода газов рециркуляции она составляет 230–240 мг/м³, с подачей газов рециркуляции – 180–190 мг/м³ (при нормативном значении 250 мг/м³ ($\alpha = 1,4$)).

Горелки аналогичной конструкции были установлены на котлах Е-160-3,9-440 ГМ. Топочная камера этого котла оборудована четырьмя газомазутными горелками, расположенными в два яруса на фронтальной стене и направленными вверх под углом 12° к горизонтальной оси, а также соплами вторичного дутья, расположенными соответственно на фронтальной и боковых стенах и предназначенными для организации ступенчатого сжигания.

Результаты испытаний показали, что при работе котла с номинальной нагрузкой приведённая концентрация оксидов азота в уходящих газах при ступенчатом сжигании и доле рециркуляции дымовых газов, равной примерно 16 %, составила на природном газе 64 мг/м³, при сжигании мазута марки М-100 – 240 мг/м³.

Применённые на котле технологические методы подавления выбросов оксидов азота (рециркуляция дымовых газов, ступенчатое сжигание) не привели к заметному повышению содержания бенз(а)пирена, концентрация которого в уходящих газах котла Е-160-3,9-440ГМ при сжигании природного газа находилась в пределах 28–39 нг/м³, при сжигании мазута — 75–105 нг/м³(при $\alpha = 1,4$). Сажистые частицы не превышали 2 по шкале Бахареха. Все показатели ниже требований ГОСТ.

Для котлов большой мощности были созданы так называемые комбинированные горелки (рисунок 2). В них одновременно используются эффект, создаваемый газами рециркуляции, и эффект ступенчатости горения, так как кольцевой поток инертных газов отделяет на начальном участке факела наружный поток воздуха от внутреннего, который интенсивно смешивается с топливом и газами рециркуляции.

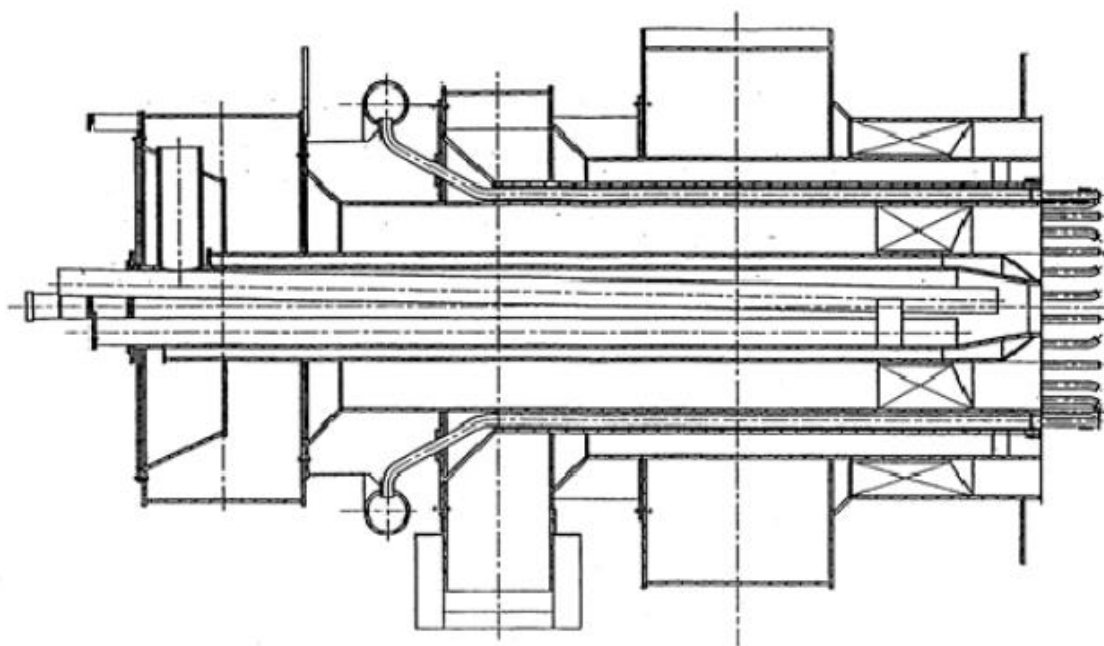


Рисунок 2. Комбинированная газомазутная горелка ВТИ-ТКЗ

Горелка выполнена с индивидуальными подводами воздуха и газов рециркуляции. Природный газ в горелку подводится по двойной схеме: в центральную часть – по кольцевому каналу через конический насадок с отверстиями и в среднюю часть – через входной коллектор в газораздающие трубки, концы которых загнуты под разным углом к оси горелки. Газовые трубки находятся в канале, расположенном между внутренним воздушным каналом и каналом газов рециркуляции. В центральную часть поступает 30% газа, в среднюю часть – 70%. В горелке предусмотрена возможность управления каждым потоком с помощью задвижек, установленных на подводящих газопроводах.

Газы рециркуляции поступают прямоотокком через канал, расположенный между каналами газораздающих трубок и периферийного воздуха. Воздух в горелку подаётся по трём каналам: центральному, среднему и периферийному. По центральному каналу воздух поступает прямоотокком. Во внутреннем и периферийном каналах потоки закручиваются аксиальными лопаточными аппаратами, лопатки в которых установлены под углом к оси потока соответственно 45 и 40°.

Комбинированные горелки испытаны на котлах ТГМП-314 ТЭЦ-23, номинальной паропроизводительностью 980 т/ч. В топке котла на фронтальной и задней стенах встречно, в два яруса установлены 16 горелок. Дополнительно на котле для снижения выбросов NO_x организовано ступенчатое сжигание топлива за счёт подачи 30–35% воздуха через 16 сопел вторичного дутья, расположенных встречно на фронтальной и задней стенах топки.

За счёт использования разработанных горелок, а также дополнительных средств подавления образования оксидов азота (рециркуляция дымовых газов в количестве 6–8% и двухступенчатое сжигание с долей воздуха 32%) удалось добиться приведённой концентрации оксидов азота в уходящих газах котла менее 100 мг/м³ в пересчёте на $\alpha = 1,4$.

Также проведены испытания по проверке работы горелки на мазуте, которые показали, что, как и при сжигании природного газа, горелочные устройства при сжигании мазута без применения средств подавления генерируют в 2,5–3 раза меньше оксидов азота, чем горелки других конструкций, установленные на аналогичных котлах.

При подаче в сопла вторичного дутья 7–8 % воздуха, необходимого для горения, приведённая концентрация оксидов азота на нагрузке, близкой к номинальной, составляет примерно 410 мг/м³. При вводе газов рециркуляции (порядка 14%) приведённая концентрация NO_x снижается до 216 мг/м³.

В эксплуатационных режимах содержание бенз(а)пирена в уходящих газах котла не превышало при сжигании газа - 63 нг/м³, при сжигании мазута и смеси топлив - 80 нг/м³. Сажевое число Бахараха было также ниже нормативных требований.

Горелки для нестандартных газообразных топлив

Для котлов ГМ-50-1 были разработаны специальные горелки для сжигания газообразных отходов нефтепереработки.

Существующие горелки этих котлов были ориентированы на сжигание в основном мазута, и к тому же, не отвечали современным экологическим требованиям по снижению образования вредных выбросов, в первую очередь, оксидов азота. Замена на стандартные горелки, используемые на энергетических газомазутных котлах, невозможна, поскольку эти горелки не рассчитаны на сжигание легких водородосодержащих газов нефтепереработки (до 70% водорода в газе). Основные трудности применения такого топлива как газообразные отходы нефтепереработки связаны с проблемами раздачи и распределения топлива и окислителя в начальном сечении факела.

Принцип разработанной в ВТИ горелки заключается в формировании вихревой центральной зоны начального участка факела, с некоторым переобогащением по топливу (с избытком воздуха $\alpha < 1,0$), обеспечивающей надежное и устойчивое воспламенение и горение газообразных отходов нефтепереработки и мазута (рисунок 3).

Сжигание основной части топлива осуществляется за счет последовательного смешения продуктов горения топлива с периферийным прямооточным потоком воздуха. Раздача топливного газа от коллекторов до места ввода в воздушный поток, учитывая высокую скорость распределения пламени водородосодержащего газа, выполнена по отдельным трубкам со специальными выходными наконечниками из жаропрочной стали. Выходные участки газовых труб имеют различную ориентацию по отношению к воздушному потоку для достижения, заданного распределения полей концентраций газообразного топлива по сечению факела. Низкая токсичность горелки, связанная, прежде всего, с уменьшенным образованием оксидов азота, достигается за счет создания условий на начальном участке факела, замедляющих процесс генерации NO_x .

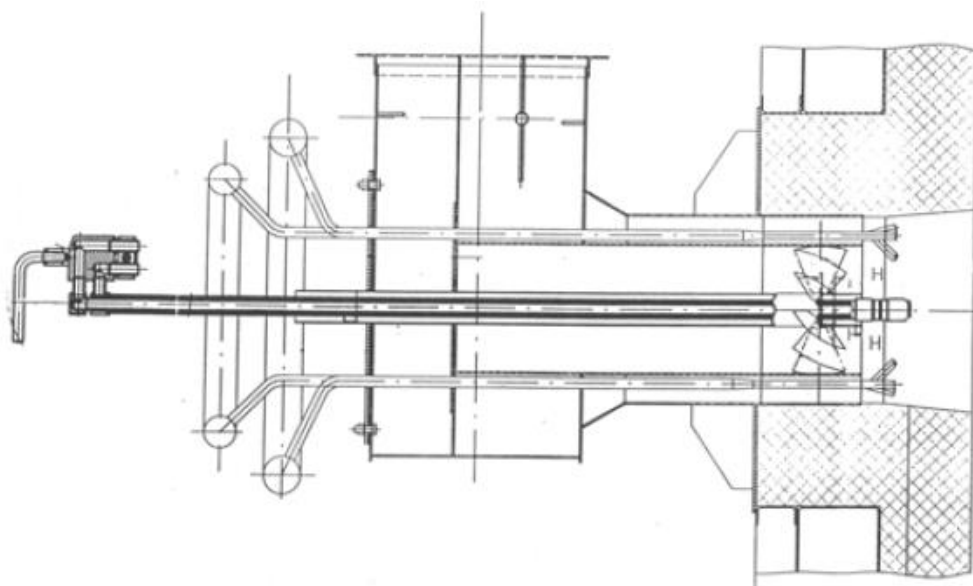


Рисунок 3. Горелка для сжигания побочных продуктов нефтепереработки

Опыты на котле ГМ-50-1 показали, что газообразные отходы нефтепереработки и газойль могут надежно сжигаться в одной горелке практически в любых соотношениях, а при организации двухступенчатого сжигания топлива путем подачи около 20-25 % воздуха, необходимого для горения, через специальные сопла, установленные на 2-2,5 м выше осей горелок, удалось обеспечить снижение выбросов токсичных оксидов азота в 1,5 – 2 раза.

Замещение мазута газообразными отходами нефтепереработки на котлах ГМ-50-1 позволило не только решить проблему с их утилизацией, но и в целом по ТЭЦ сократить выбросы оксидов серы, диоксида углерода («парниковых» газов) и канцерогенных веществ (прежде всего бенз(а)пирена).

Для термической утилизации газообразных продуктов сланцепереработки фирмой ENTEH Engineering AS разработано несколько типов горелок, позволяющих сжигать газ с теплотой сгорания от 2720 до 54470 кДж/м³.

Следует сказать, что в настоящее время освоены и успешно эксплуатируются две основные технологии переработки сланца – пиролиз крупнокускового сланца в газогенераторах, где теплоносителем является пиролизный газ (процесс KIVITER) и пиролиз мелкого сланца во вращающихся ретортах, где теплоносителем является горячая зола остатков пиролиза (процесс GALOTER). И в том, и в другом случае кроме основных продуктов пиролиза (сланцевое масло различных фракций) получают побочные газообразные продукты. Для процесса KIVITER - это низкокалорийный генераторный газ с теплотой сгорания 650 – 800 ккал/м³ (2720 – 3350 кДж/м³) и с содержанием основных компонентов – $H_2 = 5 - 7\%$, $CO = 5 - 7\%$, $CH_4 = 1 - 2\%$, $N_2 = 65 - 68\%$, $CO_2 = 16 - 18\%$, $H_2S = 0,3 - 0,5\%$, остальное составляют предельные и непредельные углеводороды. Важная особенность генераторного газа – наличие большого количества балласта в виде газообразного азота N_2 . Для процесса GALOTER – это высококалорийный газ, который называют ретортным или иногда полукоксовым. Низшая теплота сгорания ретортного газа, включая газовую и частично сконденсировавшуюся фазу высокомолекулярных углеводородных компонентов, достаточно высока и составляет 10500 – 13000 ккал/м³ (43900 – 54470 кДж/м³). Содержание основных компонентов газовой фазы меняется в пределах: $H_2 = 10 - 16\%$, $CO = 9 - 11\%$, $CH_4 = 14 - 16\%$, $N_2 = 2 - 16\%$, $CO_2 = 8 - 12\%$, $H_2S = 1,0 - 3,0\%$, остальное составляют предельные и непредельные углеводороды. Концентрация частично сконденсировавшихся паров высокомолекулярных углеводородов составляет в газе до 200 г/м³.

На четырех котлах БКЗ-75-39ФСл ЭС сланцеперерабатывающего комбината в г. Кохтла-Ярве установлены разработанные горелки для сжигания генераторного газа,

тепловой мощностью – до 20 МВт (расход генераторного газа на каждую горелку составляет 20 000 м³/ч). Всего было установлено восемь горелок (по две на каждом котле). Горелки в работе с 2005 года. На низкокалорийном газе проблем с выбросами NO_x нет. Концентрации NO_x составляют 50 – 80 мг/нм³. На этих же котлах с 2010 года (после пуска в работу установок, работающих по технологии GALOTER) начали устанавливать специально разработанные горелки для высококалорийного газа. Мощность горелок – 14 МВт. Конструкция достаточно проста – центральная газораздаточная труба с несколькими рядами разнокалиберных газораздаточных отверстий на конце, небольшим завихрителем первичного воздуха и прямоточным основным потоком вторичного воздуха. К настоящему времени в работе 12 горелок на четырех котлах (по четыре горелки на двух котлах и по две на двух). Эти простые горелки нельзя отнести к малотоксичным, при их работе нормы по выбросам NO_x обеспечиваются за счет режимных мероприятий (комбинирование с работой горелок на низкокалорийном газе и двухступенчатое сжигание).

Малотоксичные горелки для высококалорийного газа сланцепереработки (тот же процесс GALOTER) были разработаны специально для котла ТП-101 Эстонской ЭС для совместного сжигания газа и сланца. В этой горелке применена рециркуляция дымовых газов в поток вторичного воздуха. Конструкция горелки выполнена двухпоточной по воздуху, и газу. В центральную часть (пилотная горелка) подается чистый воздух, который закручивается аксиальным завихрителем и полукоксовый газ в количестве до 10% для обеспечения стабильности горения. Оставшийся воздух в смеси с газами рециркуляции поступает в топку через периферийный канал горелки. Там же через отдельные трубки с газораздаточными наконечниками на концах подается полукоксовый газ. Всего изготовлено 6 горелок мощностью по 19 МВт, которые в работе с лета 2014 года.

Проведённые испытания разработанных горелок показали, что технико-экономические показатели котлов при замещении сланца горючими газами практически не изменились. Концентрация оксидов азота в продуктах сгорания в самих горелках ниже предельно допустимых для сланцевых котлов (менее 200 мг/нм³).

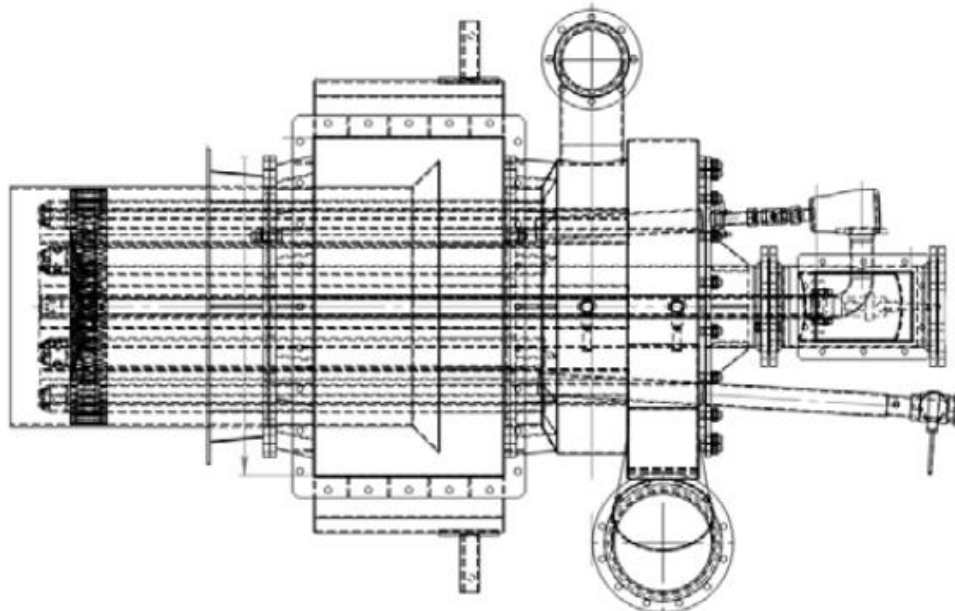


Рисунок 4. Горелка для сжигания генераторного и полукоксового газов

На основании обобщения опыта длительной эксплуатации горелок для сжигания газообразных продуктов сланцепереработки были разработаны рекомендации, позволившие разработать комбинированную горелку для энергетически эффективного и экологически безопасного сжигания полукоксового и генераторного газа в одной горелке (рисунок 4).

Выполненные расчеты показали, что концентрация оксидов азота при использовании этих горелок для котла Е-135-3,2-420ДГ составит 80...103 мг/нм³ (при 3% O_2) в диапазоне его нагрузок от 60 до 100 %.

Таким образом, показано, что за счет применения малотоксичных горелок в сочетании с другими методами подавления имеется возможность обеспечить нормативные показатели по концентрации NO_x в уходящих газах, как при сжигании природного газа и мазута, так и нестандартных газообразных топлив, без ухудшения других экологических показателей и без существенного снижения экономичности и надёжности работы котла в целом.