**УДК 621.18**

# СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ, ЗАКЛАДЫВАЕМЫЕ ОАО «СИБЭНЕРГОМАШ» В КОНСТРУКЦИЮ КОТЛОВ, СЖИГАЮЩИХ ЭКИБАСТУЗСКИЙ КАМЕННЫЙ УГОЛЬ

**Маслов К.В., Илясов В.А., Хрусталёв Г.Н., Сокол Е.А., Козлов Д.Л.**

*ОАО «Сибэнергомаш», Барнаул, Россия*

**АННОТАЦИЯ**

В данной работе представлен опыт ОАО «Сибэнергомаш» (ранее Барнаульского котельного завода) по проектированию котлов, предназначенных для сжигания высокозольного Экибастузского каменного угля от начала освоения этого угольного бассейна до наших дней.

В статье отражёны задачи, решаемые ОАО «Сибэнергомаш» на различных этапах освоения сжигания Экибастузского угля, а также представлены мероприятия, направленные на снижение вредных выбросов, при обеспечении максимальной экономичности. Каждый последующий проект является очередным шагом в улучшении экологических и экономических показателей работы котлов.

## ВВЕДЕНИЕ

Экибастузское месторождение является одним из крупнейших месторождений энергетических углей, на котором работают станции Казахстана, Урала и Западной Сибири. Основными особенностями данного топлива являются повышенная зольность, низкая влажность, высокая абразивность золы, отсутствие шлакования при избытке воздуха в зоне горения больше единицы ($\alpha_г$>1) и возникновение шлакования при избытке воздуха в зоне горения меньше единицы ($\alpha_г$<1). Эти свойства топлива предъявляют определённые требования к конструкциям топочно-горелочных устройств и оказывают заметное влияние на организацию его сжигания.

ОАО «Сибэнергомаш» (ранее Барнаульский котельный завод) имеет большой опыт проектирования котлоагрегатов, работающих на Экибастузском угле, так в настоящий момент на теплоэлектроцентралях России и Казахстана находятся в работе около шестидесяти паровых и водогрейных котлов, подтверждающих свою надёжную работу в течение долгого периода времени.

## СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ, ЗАКЛАДЫВАЕМЫЕ ОАО «СИБЭНЕРГОМАШ» В КОНСТРУКЦИЮ КОТЛОВ, СЖИГАЮЩИХ ЭКИБАСТУЗСКИЙ КАМЕННЫЙ УГОЛЬ

В первоначальный период освоения Экибастузского угольного бассейна Барнаульским котельным заводом были изготовлены для ТЭЦ котлоагрегаты моделей БКЗ 160-100, БКЗ 320-140, БКЗ 420-140 различных модификаций. Основной задачей проектирования котлоагрегатов на тот момент времени являлось обеспечение надёжной и экономичной работы.

Одним из наиболее полно удовлетворяющим всем требованиям заказчиков на тот период стал котлоагрегат БКЗ 420-140-5, проект которого в восьмидесятые годы был разработан Барнаульским котельным заводом. Этот котёл был изготовлен и поставлен на различные ТЭЦ. Компоновка такого котла выполнена по Т-образной сомкнутой схеме. Топка открытого типа, призматической формы верхняя её часть в горизонтальном сечении по осям труб противоположных экранов имеет размеры 15420х3860мм, а нижняя часть – 15420х8980 мм (рис.1).

Котёл оборудован индивидуальными системами пылеприготовления с прямым вдуванием. Размол и сушка угля осуществляется в молотковых мельницах. Сушка производится горячим воздухом. Топка оборудована вихревыми двухпоточными пылеугольными горелками, расположенными на боковых стенах в один ярус. Вторичный воздух в каждую горелку подаётся через два кольцевых канала. В наружном канале установлен аксиальный завихритель, выполненный из поворотных лопаток, обеспечивающих необходимую крутку воздуха. В следующем за ним кольцевом канале установлен завихритель, выполненный из неподвижных лопаток. Пылевоздушная смесь подаётся в два внутренние канала горелки. В пылевоздушных каналах горелки установлены аксиальные завихрители, выполненные из неподвижных лопаток.

Расчётная температура на выходе из зоны активного горения ($\vartheta''_{à.ã}$) равна 1590ºС, теплонапряжение сечения топки ($q_F$) равно 2,261 МВт/м$^2$, теплонапряжение зоны активного горения ($q_{ë.ã}$) равно 0,888 МВт/м$^2$.

Котлы этой модели показали высокую надёжность в эксплуатации, КПД их находился на уровне 92,5%. По отдельным измерениям, выполняемым во время испытаний, концентрация оксидов азота ($NO_x$), за котлом составляла 1100-1300 мг/нм$^3$ (при α=1,4).

Восьмидесятые годы предыдущего столетия характеризовались началом борьбы за экологию. В нормативных документах появились требования по предельно допустимым выбросам оксидов азота за котлом. Выбросы реально достигнутые на котлах оказались намного выше нормативных значений. Соответственно и заказчики в требованиях к поставляемым котлам стали уделять большое внимание снижению вредных выбросов.

С целью снижения выбросов окислов азота, ОАО «Сибэнергомаш» в 2003 году изготовил для Астанинской ТЭЦ-2 котёл новой модификации БКЗ 420-140-5А ст. №6 (рис.2).

Компоновка, форма и размеры топки, а также система пылеприготовления остались аналогичными с моделью БКЗ 420-140-5.

С учётом имеющихся у ОАО «Сибэнергомаш» наработок, для организации топочного процесса топка оборудована прямоточными пылеугольными горелками и соплами нижнего дутья. Пылеугольные горелки расположены тангенциально на боковых стенах топки в два яруса и имеют разворот осей, создающий в плане топки два вихря. Каждая пылеугольная горелка представляет собой блок с четырьмя прямоугольными каналами пылевоздушной смеси, расположенными в канале вторичного воздуха. Сопла нижнего дутья (СНД) расположены по встречно-смещённой схеме на скатах холодной воронки.

Расчётная температура на выходе из зоны активного горения равна 1529ºС, теплонапряжение сечения топки равно 2,246 МВт/м$^2$, теплонапряжение зоны активного горения равно 0,821 МВт/м$^2$.

Котёл пущен в эксплуатацию в 2007 году.

При использовании прямоточных горелок и сопел нижнего дутья без проведения каких-либо режимно-наладочных работ удалось снизить выбросы $NO_x$ при номинальной нагрузке до 600-700 мг/нм$^3$, при обеспечении надёжной и экономичной работы котла.

Ввиду того, что заявленные показатели по выбросам окислов азота не были достигнуты, ОАО «Сибэнергомаш» произвело реконструкцию топочно-горелочного устройства. Была смонтирована система сопел третичного дутья, с целью разбить процесс сжигания топлива на две зоны (зону горения топлива с недостатком кислорода и зону дожигания). Сопла третичного дутья расположены над основными горелками по тангенциальной схеме. Направление крутки совпадает с направлением крутки основных горелок.

В 2011 году, по окончании монтажа системы сопел третичного дутья, специалистами «УралВТИ» совместно со специалистами ОАО «Сибэнергомаш» проведен комплекс режимно-наладочных испытаний, целью которого являлась оценка эффективности реконструкции котла (совместное влияние системы сопел нижнего и третичного дутья на уровень концентрации окислов азота в дымовых газах).

По результатам режимной наладки можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальные расходы воздуха на сопла нижнего и третичного дутья составляют на номинальной нагрузке 30% и 10% от общего воздуха, идущего на котёл соответственно.

Выдерживание отмеченных режимных параметров обеспечивает надёжную работу котла с номинальными параметрами пара на нагрузке 420т/ч, КПД котла составляет 91,0%, при этом выбросы оксидов азота $NO_x$ в уходящих газах, приведенные к α=1,4 не превышают значение 550 мг/нм$^3$.

2. С увеличением расхода воздуха на третичное дутьё концентрация $NO_x$ снижается, при этом чем больше доля нижнего дутья, тем больше эффект от увеличения доли третичного дутья, но влияние третичного дутья заметно слабее по сравнению с влиянием нижнего дутья (при выполненном на данном котле конструктивном оформлении вводов воздуха). Так, при расходе воздуха на сопла третичного дутья примерно 5-10% от общего воздуха, эффективность верхнего дутья составляет примерно:

12 % (снижение концентрации $NO_x$ с 740 до 650 мг/нм$^3$ при расходе воздуха на нижнее дутьё равном 5% от общего – охлаждение);

16 % (снижение концентрации $NO_x$ с 680 до 570 мг/нм$^3$ при расходе воздуха на нижнее дутьё равном 15% от общего);

23 % (снижение концентрации $NO_x$ с 610 до 480 мг/нм$^3$ при расходе воздуха на нижнее дутьё равном 20% от общего).

Так же отмечено, что с увеличением расхода воздуха, как на нижнее дутьё, так и на третичное дутьё происходит увеличение механического недожога ($q_4$), однако это увеличение определяется тониной помола пыли.

Наряду с использованием прямоточных горелок, с целью снижения выбросов $NO_x$, ОАО «Сибэнергомаш» решает эту же проблему с применением вихревых горелок. Так, в настоящее время, по проекту ОАО «Сибэнергомаш» на Павлодарской ТЭЦ-3 завершается реконструкция котлоагрегата БКЗ-420-140-1 ст. №1. Модернизированное топочно-горелочное устройство представлено вихревыми горелками, системой сопел нижнего дутья и воздушными соплами третичного дутья.

Компоновка котла, выполнена по той же схеме, что и в вышеописанных котлах, система пылеприготовления аналогична предыдущим.

Нижняя часть топки имеет в плане по осям труб размеры 15744х9050 мм, верхняя часть-15744х3776 мм.

Однопоточные пылеугольные горелки установлены на боковых стенах топки в один ярус. Вторичный воздух в каждую горелку подаётся через наружный кольцевой канал горелки, в котором установлен аксиальный завихритель, выполненный из поворотных лопаток и обеспечивающих необходимую крутку воздуха. Пылевоздушная смесь подаётся во внутренний кольцевой канал горелки. В пылевоздушном канале горелки установлен аксиальный завихритель, выполненный из неподвижных лопаток, расположенных под углом к оси горелки. Сопла нижнего дутья расположены по встречно-смещённой схеме на скатах холодной воронки. Сопла третичного дутья, расположены на боковых стенах топки над пылеугольными горелками. Каналы для подачи третичного воздуха выполнены в виде круглых сопел.

Расчётная температура на выходе из зоны активного горения равна 1580ºС, теплонапряжение сечения топки равно 2,17 МВт/м$^2$, теплонапряжение зоны активного горения равно 1,013 МВт/м$^2$.

Планируемая величина выбросов $NO_x$ после реконструкции ожидается в пределах нормативных значений.

Пуск реконструированного котла намечен на осень 2011 года.

В 2005 году ОАО «Сибэнергомаш» изготовил и поставил паровой котёл БКЗ 280-9,8-510 ст. №6 на ТЭЦ АО «ССГПО» г. Рудный, Республики Казахстан. Данный котёл выполнен по П-образной схеме. Топка открытого типа, призматической формы имеет в плане по осям труб размеры 8220х6730 мм (рис.3).

Котёл оборудован индивидуальными системами пылеприготовления с промбункером и подачей пыли высокой концентрации под давлением (ПВКд). Размол и сушка угля осуществляется в шаровых барабанных мельницах. Сушка угля осуществляется горячим воздухом.

Для организации топочного процесса топка оборудована прямоточными пылегазовыми горелками, установленными тангенциально на фронтовой и задней стенах топки вблизи углов, сбросными соплами и соплами нижнего дутья. Воздушный канал горелки разбит на две части. В центре узкой части установлена труба к которой подводится пылепровод ПВКд. На выходе из трубы ПВК в устье горелки установлен направляющий наконечник. Отработавший сушильный агент подаётся в топку через четыре прямоточных сбросных сопла, расположенные по оси боковых стен на отметках пылегазовых горелок. Сбросное сопло расположено в воздушном канале, в который подаётся горячий воздух, необходимый для охлаждения сбросного сопла при отсутствии подачи через него отработавшего сушильного агента. Оси сбросных сопел направлены по касательной к воображаемой окружности горелок. Сопла нижнего дутья расположены по встречно-смещённой схеме на скатах холодной воронки.

Расчётная температура на выходе из зоны активного горения равна 1528ºС, теплонапряжение сечения топки равно 3,724 МВт/м$^2$. теплонапряжение зоны активного горения равно 0,874 МВт/м$^2$.

Котёл был пущен в эксплуатацию в 2010 году.

В начальный период работы котла БКЗ 280-9,8-510, из-за нестабильной работы системы подачи пыли высокой концентрации, было невозможным достижение устойчивого горения Экибастузского угля (большие скачки разрежения в топке), поэтому изначально для поддержания устойчивого горения производилось совместное сжигание каменного угля и природного газа. Изначально нагрузка котла составляла 210-240 т/ч при сжигании газа равным примерно 0,3*$D_{ном}$, при этом наблюдалось шлакование нижней части топки. Выполненная пирометрия показала, что температура в районе холодной воронки оказалась в пределах 1300-1400ºС. В последствие нижняя часть котла оказалась полностью зашлакованной. Осмотр остановленного котла показал, что очагами шлакования являются бетон в районе горелок и сопел нижнего дутья. После расшлаковки котла было решено внедрить ряд наладочных и конструктивных решений, направленных на недопущение шлакования и улучшения работы ПВКд таких как: ревизия установки сопел ПВКд, выполнение перевязки двух нижних пылепроводов в воздушные короба верхних горелок, установка рассекателей пыли другой конструкции.

После выполнения вышеуказанных мероприятий котёл был пущен в эксплуатацию. Проведённая пирометрия показала, что температура в районе холодной воронки существенно уменьшилась и стала в пределах 900-1000ºС.

В дальнейшем проводился ряд работ по улучшению работы системы ПВКд, который заключается в более точной регулировке положения сопел в смесителях ПВКд для устранения пульсаций при подаче пыли и повышения их производительности, для обеспечения устойчивой работы котла на номинальной нагрузке без подсветки природным газом. Результатом этой работы явилось отсутствие пульсаций в топке. После начала стабильной работы системы ПВКд подсветка газом была прекращена. Котёл вышел на номинальную нагрузку с обеспечением номинальных параметров пара ($D_{пе}$=280т/ч, t=510ºС) при работе на Экибастузском угле, при этом имеется запас по производительности питателей пыли.

Предварительная пусковая наладка показала, что котёл обеспечивает экономичное и надёжное сжигание в широком диапазоне нагрузок, при этом концентрация $NO_x$ оказалась в пределах 600-650 мг/м$^3$ (при $\alpha$=1,4). В дальнейшем на данном котле планируется проведение режимно-наладочных испытаний специалистами ОАО «Сибэнергомаш» и УралВТИ.

Продолжением работ по совершенствованию топочно-горелочных устройств является выполняемая в настоящее время ОАО «Сибэнергомаш» реконструкция (с сохранением существующего каркаса и барабана) котла БКЗ 220-100-4 ст. №6 Петропавловкой ТЭЦ-2. Котёл выполнен по П-образной схеме, топка открытого типа, призматической формы имеет в плане по осям труб размеры 9536х6656 мм (рис.4).

Котёл оборудован индивидуальными системами пылеприготовления с промбункером и подачей пыли отработавшим сушильным агентом. Размол и сушка осуществляется в шаровых барабанных мельницах. Сушка производится горячим воздухом.

Для организации топочного процесса топка оборудована прямоточными горелками, соплами нижнего дутья и воздушными соплами третичного дутья. Пылеугольные горелки установлены на фронтовой и задней стенах вблизи углов топки в два яруса. Оси горелочных устройств направлены тангенциально к воображаемой окружности в центре топки. Направление крутки - по часовой стрелке. Пылеугольная горелка состоит из воздушного короба и встроенного в него канала пылевоздушной смеси, который разделяет пылевоздушную смесь на два потока.

Расчётная температура на выходе из зоны активного горения равна 1538ºС, теплонапряжение сечения топки равно 3,214 МВт/м$^2$, теплонапряжение зоны активного горения равно 0,891 МВт/м$^2$.

Для обеспечения нормативных выбросов окислов азота на котле кроме установки по тангенциальной схеме прямоточных горелок, организовано ступенчатое сжигание топлива за счёт подачи части воздуха, необходимого для выгорания, через сопла нижнего и третичного дутья.

Воздушные сопла системы нижнего дутья расположены по встречно-смещённой схеме на скатах холодной воронки. Воздушные сопла третичного дутья установлены над основными горелками на фронтовой и задней стенах вблизи углов топки. Оси воздушных сопел третичного дутья расположены тангенциально к воображаемой окружности в центре топки. Направление крутки – против часовой стрелки.

Такая конструкция топочно-горелочного устройства по нашему мнению создаст условия для устойчивого воспламенения топлива и сжигания его с заданной экономичностью, а так же обеспечит экологические показатели.

Пуск реконструированного котла намечен на 2012 год.

Кроме использования собственного опыта по совершенствованию топочно-горелочных устройств в настоящее время ОАО «Сибэнергомаш» совместно с немецкой фирмой Steinmuller Engineering GmbH разрабатывает проект котла БКЗ 550-13,8-560 ст. №7 для ТЭЦ-2 АО «Астана-энергия». Этот котёл башенной компоновки, топка открытого типа, призматической формы имеет в плане по осям труб 11370х11260.

Котел оборудован индивидуальными системами пылеприготовления с прямым вдуванием. Размол и сушка осуществляется в молотковых мельницах. Сушка угля производится горячим воздухом. В проекте предусмотрена подача угольной пыли от каждой мельницы к двум горелкам одного яруса, расположенным на противоположных стенах.

Котёл оборудован топочно-горелочными устройствами компании Steinmuller Engineering GmbH.

В данном котле заложена принципиально новая схема сжигания Экибастузского угля. Топочно-горелочное устройство представлено малотоксичными горелками, воздушными соплами бокового дутья и соплами третичного дутья. Малотоксичными горелками являются прямоточно-вихревые горелки, установленные в два яруса по тангенциальной схеме вблизи центра каждой стены. Такая схема размещения прямоточно-вихревых горелок отличается от ранее применяемых схем расположения вихревых горелок (одностороннее или встречное). При тангенциальном расположении прямоточно-вихревых продукты сгорания каждой горелки наряду с круткой горелок перемешиваются со встречными потоками в горизонтальной плоскости, поэтому время пребывания угольной пыли и газов в топке увеличивается и улучшается выгорание топлива.

Расчётная температура на выходе из зоны активного горения равна 1460ºС, теплонапряжение сечения топки равно 3,12 МВт/м$^2$, теплонапряжение зоны активного горения равно 0,7 МВт/м$^2$.

Для обеспечения выбросов $NO_x$ на выходе из котла помимо конструктивных характеристик горелки особым образом организована подача в неё воздуха, а именно ступенчатое поступление воздуха в околостехиометрическом количестве.

Для сжигания топлива в горелке часть воздуха подается во внутренний канал вторичного воздуха, другая часть во внешний канал вторичного воздуха, при этом скорость на выходе из каналов и крутка различные. Такой способ поступления воздуха в горелку приводит к образованию первичного и вторичного пламени.

Возле каждой горелки расположены боковые воздушные сопла. Скорость воздуха на выходе из сопел бокового дутья создает сверх стехиометрическую атмосферу возле стен топки, что защищает их от износа, коррозии и шлакования.

Сопла третичного дутья двухступенчатые и расположены над верхним ярусом горелок. Они расположены таким образом, что перекрывают поднимающиеся дымовые газы на всем сечении топки. К тому же, сопла сконструированы так, что выдерживают повышенные тепловые нагрузки и обеспечивают глубокое смешивание воздуха с восходящими дымовыми газами.

Воздух, подаваемый с большой скоростью, способствует смешиванию дымовых газов с этим дополнительным воздухом, что приводит к полному сжиганию остаточного СО и оставшихся частиц топлива от первичного сгорания. Кроме того, высокая скорость воздуха на выходе из сопел в топку уменьшает искривление струи потока.

После проведения режимно-наладочных испытаний ожидается достижение нормативных значений окислов азота.

Пуск данного котла запланирован на 2012 год.

ОАО «Сибэнергомаш» постоянно совершенствует свою продукцию, обеспечивая наиболее экономичное сжигание высокозольного топлива с сокращением выбросов вредных веществ в атмосферу за счёт модернизации топочных процессов, при этом широко используется математическое моделирование, которое строится на результатах испытаний уже работающих котлов.

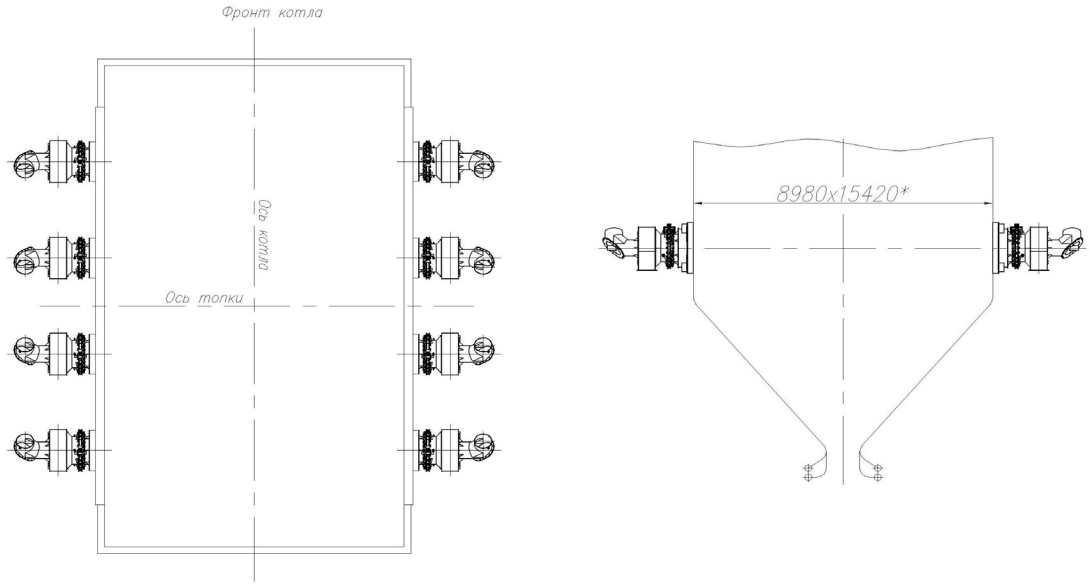


Рис.1 Схема топочно-горелочного устройства котла БКЗ 420-140-5.

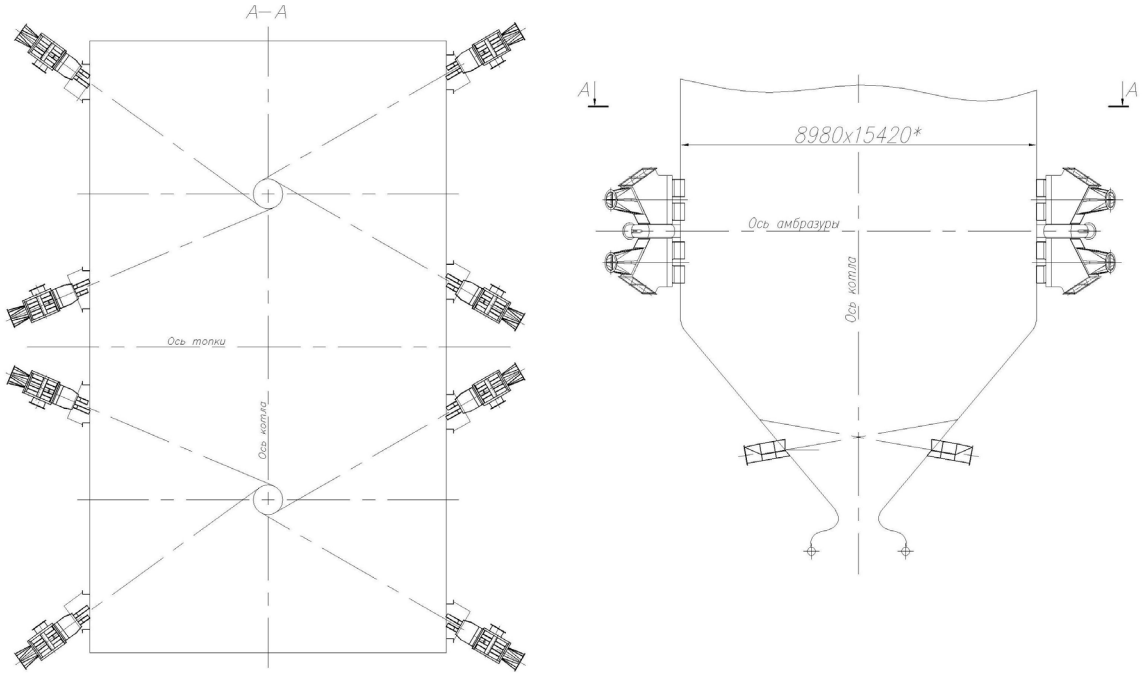


Рис.2 Схема топочно-горелочного устройства котла БКЗ 420-140-5А.

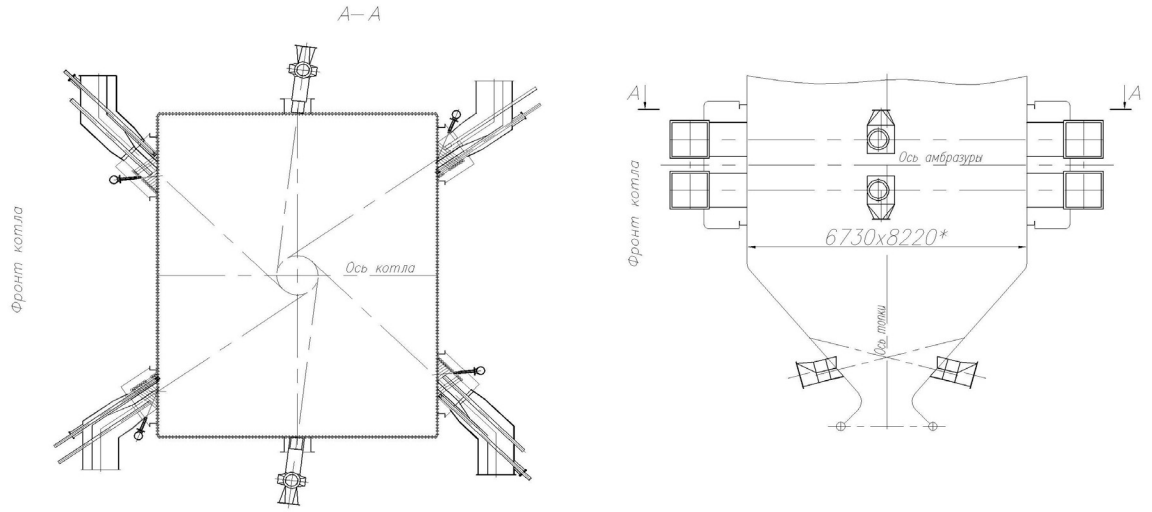


Рис.3 Схема топочно-горелочного устройства котла БКЗ 280-9,8-510

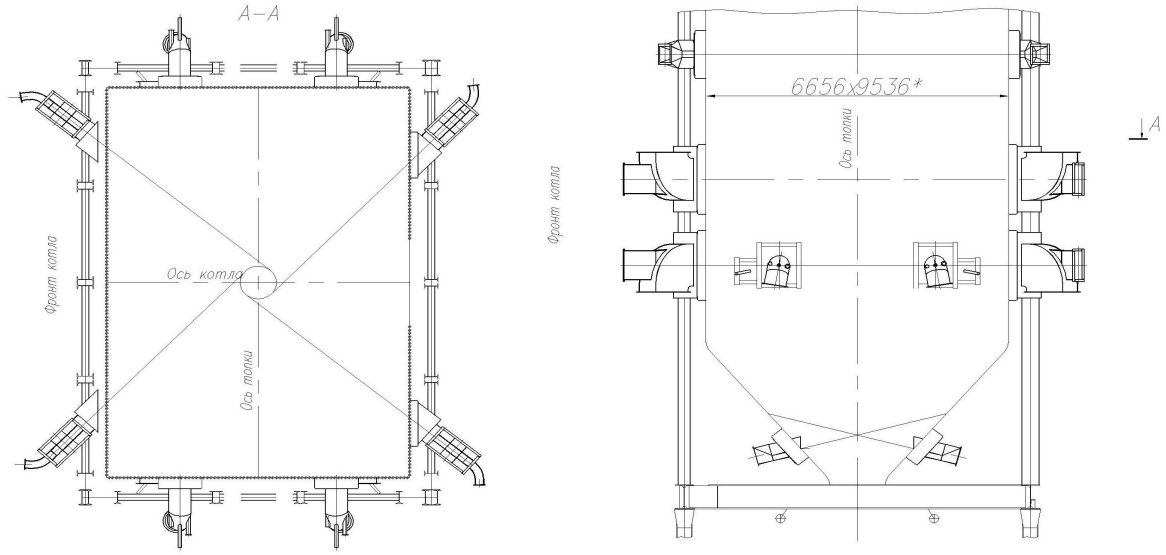


Рис.4 Схема топочно-горелочного устройства котла БКЗ 220-100-4