

УДК 662.995:662.61

КОБЗАРЬ С.Г., ХАЛАТОВ А.А.

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА В ГАЗОВЫХ КОТЛАХ МЕТОДОМ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Проведено дослідження зниження викидів оксидів азоту методом рециркуляції димових газів. Встановлено, що оптимальне значення відносної частки рециркуляції для котла ДКВр-4/13 з пальниками ГМГ – 2 знаходиться поміж 15 та 20 %.

Проведено исследование снижения выбросов оксидов азота методом рециркуляции дымовых газов. Установлено, что оптимальное значение относительной доли рециркуляции для котла ДКВр-4/13 с горелками ГМГ – 2 находится между 15 и 20 %.

Investigation of the nitrogen oxides reduction by the flue gas recirculation technique was carried out. As found the optimal value of the recirculation rate for the DKVr-4/13 boiler with GMG-2 burners is between 15 and 20%.

$k$  – кинетическая энергия турбулентности;  
 $P$  – избыточное давление;  
 $T$  – абсолютная температура;

$v$  – полная скорость;  
 $\varepsilon$  – диссипация турбулентной энергии;  
 $\rho$  – плотность.

### **Введение**

Индустриализация общества приводит к увеличению загрязнения атмосферы в основном продуктами сжигания органических топлив. За исключением водяных паров, все остальные продукты сгорания активно влияют на окружающую среду. Оксиды азота являются наиболее опасными среди всех продуктов сгорания, которые загрязняют атмосферу, поэтому для уменьшения негативного влияния необходимо предпринимать меры по уменьшению образования оксидов азота в процессе горения. Это достигается усовершенствованием процесса горения (первичные методы) или путем очистки продуктов сгорания (вторичные методы). К первичным относятся следующие методы: дожигания, стадийной подачи воздуха, рециркуляции дымовых газов, модернизации горелок, впрыска воды или пара. Селективное некаталитическое и селективное каталитическое восстановления представляют группу вторичных методов.

*Метод дожигания* – один из эффективных первичных методов снижения эмиссии  $\text{NO}_x$ . Идея этого метода состоит в разделении расхода топлива на две части, а расхода окислителя – не менее чем на две части. На предварительном эта-

пе сжигания происходит сжигание основной массы топлива с выделением около 80% энергии. Коэффициент избытка воздуха в первичной зоне горения поддерживают на уровне 1,05 ... 1,2. Оксиды азота в первичной зоне образуются в количестве, которое зависит от условий горения и содержания азота в топливе. На второй стадии в зону дожигания подается только топливо в количестве, необходимом для формирования зоны восстановления, с коэффициентом избытка воздуха 0,7...0,9. Количество топлива на дожигание составляет около 20% от общей мощности котлоагрегата. При сжигании мазута данная технология обеспечивает 50% снижения выбросов  $\text{NO}_x$ . При сжигании пылеугольного топлива можно достигнуть до 50% снижения выбросов оксидов азота, а в случае сжигания природного газа снижение выбросов  $\text{NO}_x$  может составить 80%. К недостаткам данного метода следует отнести необходимость остановки котла на реконструкцию.

*Стадийная подача воздуха.* Данный метод заключается в разделении зоны горения на две: богатую и бедную. В первой зоне организуется сжигание топлива с недостатком кислорода и большим временем пребывания продуктов реакций. Частично охлажденные продукты неполного горения дожигаются в зоне дожигания с из-

бытком воздуха. Время пребывания продуктов горения во второй зоне должно быть значительно меньше, чем в первой. Следует отметить, что данный метод эффективен для топлив с постоянным содержанием азота в них. В случае изменения содержания азота в топливе суммарная эмиссия оксидов азота будет зависеть как от температурного режима в топке, так и от концентрации азота в топливе.

*Рециркуляция дымовых газов.* Один из самых дешевых и легко реализуемых методов снижения оксидов азота в котлах малой и средней мощности. Этот метод заключается в подаче инертной среды (дымовых газов) в зону горения при температуре ниже температуры пламени. Относительная доля рециркуляции определяется как отношение дымовых газов, которые идут на рециркуляцию, к суммарной массе дымовых газов, выходящих из топки. Температура дымовых газов, которые подаются на рециркуляцию, влияет на эффективность снижения эмиссии оксидов азота – эффективность повышается с уменьшением температуры дымовых газов. Вид топлива также оказывает влияние на эффективность. Лучшие результаты по уменьшению выбросов оксидов азота получаются при использовании газообразного топлива, меньшая эффективность достигается при сжигании жидкого топлива, а при сжигании каменного и бурого углей снижение выбросов составляет 15% и 10% соответственно.

*Модернизация горелок (низкоэмиссионные горелки).* Модернизация горелок приводит к изменению конструкции стандартных горелок с целью организации более длинного факела. Увеличение длины факела затягивает процесс горения и уменьшает пик температуры, что, в свою очередь, дает уменьшение генерации оксидов азота в зоне горения топлива. Данная технология может применяться на большинстве котлов, и наибольший результат по снижению выбросов оксидов азота получается для газообразного топлива.

*Впрыск воды/пара.* Впрыск воды или пара в факел приводит к снижению температуры пламени и тем самым снижает образование оксидов азота по термическому механизму и, как следствие, суммарную эмиссию. При сжигании природного газа этим методом можно достичь снижения

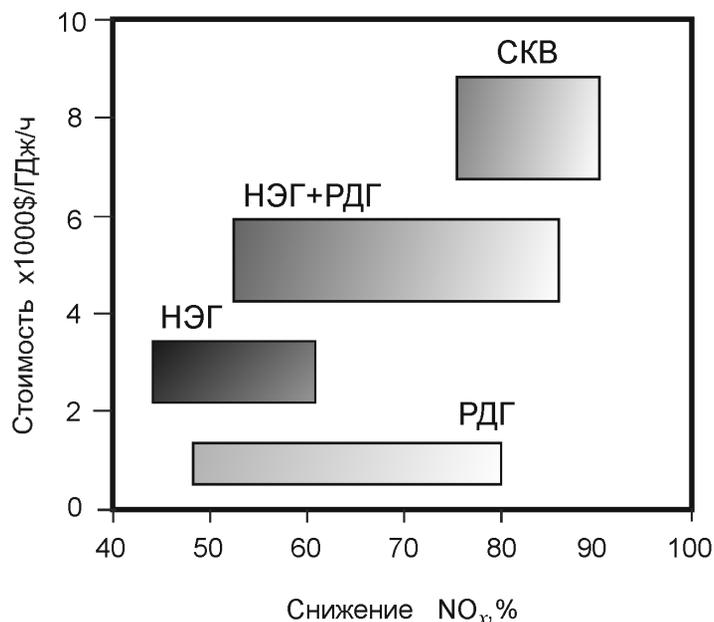
выбросов оксидов азота до 80%. Количество воды или пара ограничивается условием предотвращения конденсации. Впрыск воды или пара приводит к снижению КПД котла на 3...10%. Часто данный метод применяется вместе с методами модернизации горелок и рециркуляции дымовых газов.

*Селективное некаталитическое восстановление.* Данный метод заключается во впрыске реагента (аммиак или мочевины) в дымовые газы котла при температуре газов 750...900 °С. Реагент преобразует содержащийся в дымовых газах  $\text{NO}_x$  в молекулярный азот и воду. Метод позволяет снизить выбросы оксидов азота до 70%.

*Селективное каталитическое восстановление.* В основу метода положен впрыск аммиака в дымовые газы котла в присутствии катализатора. Катализатор позволяет снизить уровень выбросов  $\text{NO}_x$  при меньшей температуре, чем для селективного некаталитического восстановления. Селективное каталитическое восстановление может быть применено, в зависимости от вида катализатора, при температуре дымовых газов в диапазоне 260...650 °С. Данный метод позволяет снизить выбросы оксидов азота до 90%. Одним из недостатков данного метода является его высокая стоимость.

Финансовые затраты и эффективность уменьшения выбросов оксидов азота разными методами показаны на рис. 1 [1]. Из рис. 1 видно, что одним из эффективных и дешевых методов снижения выбросов оксидов азота является метод рециркуляции дымовых газов.

Работы [2, 3] подтвердили возможность снижения выбросов оксидов азота при использовании метода рециркуляции дымовых газов на котлах ТГМ-84, КВГМ-180, ДЕ-25-14Г, ДКВр-10/13 и ДКВр-4/13. Используя упрощенную схему рециркуляции с подачей дымовых газов на вход дутьевого вентилятора, экспериментально было показано, что организация рециркуляции дымовых газов в диапазоне 5...20% приводит к снижению выбросов оксидов азота на 45...80%. Преимущество упрощенной схемы рециркуляции заключается в малозатратности, отсутствии дополнительного вентилятора, хорошем перемешивании газов рециркуляции с дутьевым воздухом, возможности внедрения собственными



**Рис. 1. Финансовые затраты и эффективность снижения оксидов азота разными методами:**  
*РДГ* – рециркуляция дымовых газов;  
*НЭГ* – низкоэмиссионные горелки;  
*СКВ* – селективное каталитическое восстановление.

силами без привлечения специализированных организаций. Вместе с тем упрощенная схема менее экономичная по затратам энергии на тягу и дутье. Недостаточно изучено оптимальное соотношение относительной доли рециркуляции дымовых газов, степени уменьшения эмиссии оксидов азота и увеличения затрат энергии на организацию рециркуляции.

### Цель исследования

Данная работа посвящена изучению влияния содержания дымовых газов (доли рециркуляции) в дутьевом воздухе на образование оксидов в топке котла и определению оптимального соотношения доли рециркуляции, которая обеспечивает приемлемый уровень снижения выбросов оксидов азота при умеренных затратах энергии на обеспечение требуемого расхода смеси воздуха и дымовых газов. Анализ котельного оборудования, которое используется на промышленных предприятиях и в сфере жилищно-коммунального хозяйства, показал, что наиболее приспособ-

ленными для организации рециркуляции дымовых газов являются котлы серии ДКВр, в частности котел ДКВр-4/13.

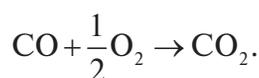
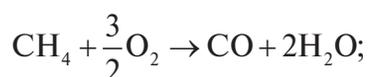
### Объект и методы исследования

Котел ДКВр-4/13 оснащен двумя газомазутными горелками ГМГ-2,0. Подача воздуха разделена на два потока: первичный воздух в объеме 10% от общего расхода подается в центральное круглое отверстие. Тракт первичного воздуха оснащен завихрителем с параметром закрутки 0,9. Газообразное топливо подается через кольцевую щель, расположенную между трактами первичного и вторичного воздуха. Тракт вторичного воздуха имеет завихритель с параметром закрутки 1,6.

Исследование проводилось с привлечением методов компьютерного моделирования с использованием пакета прикладных программ Phoenics 2008. Так как основной процесс сгорания происходит в топке котла, то исследование образования оксидов азота проводилось на модели топке котла. Топка котла была построена в препроцессоре в декартовой системе координат.

Для расчета полей скорости, концентрации и температуры решались осредненные уравнения движения Рейнольдса и уравнение энергии в форме энтальпии. Для замыкания гидродинамических уравнений использовалась RNG  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности, которая дает наилучшие результаты при расчете течений с закруткой. Радиационный теплообмен моделировался при помощи модели Radiosity [4]. Степень черноты стенок топке принималась постоянной и равной 0,9. Температура трубных поверхностей в топке принималась постоянной и равной 194 °С, что соответствует температуре кипения воды при избыточном давлении 13 МПа.

Для моделирования процесса горения природного газа в топке котла ДКВр использовался двухстадийный механизм горения метана [5]:



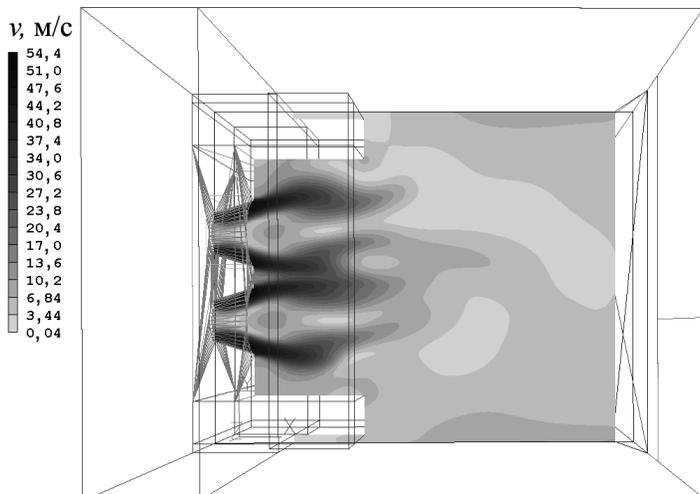


Рис. 2. Поле полной скорости.

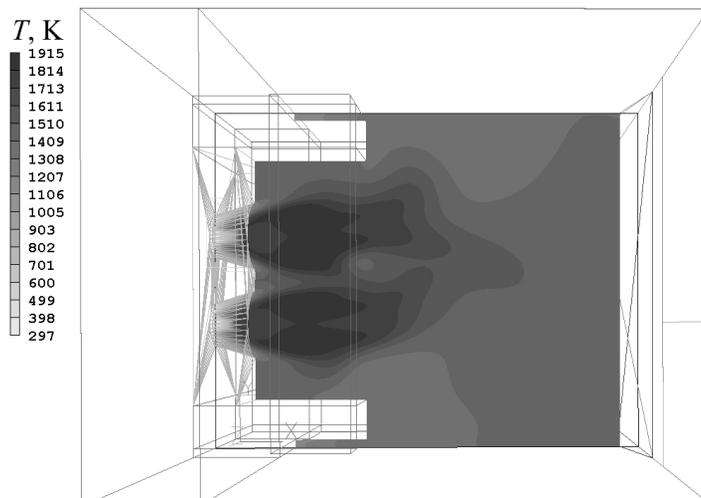


Рис. 3. Поле температуры.

Средняя скорость первой реакции горения метана определялась при помощи стандартной модели разрушения вихрей (EBU) [6,7] с константой модели  $C_{EBU} = 2,0$ :

$$R_{CH_4} = -C_{EBU} \min\left(CH_4; \frac{O_2}{3,0}\right) \rho \frac{\varepsilon}{k} \quad [кг/(м^3 \cdot с)],$$

а средняя скорость реакции окисления СО до углекислого газа определялась как минимальное значение скорости реакции по модели разрушения вихрей и закону Аррениуса:

$$R_{CO} = - \min(R_{EBU}, R_{Ar}),$$

где

$$R_{Ar} = 5,4 \cdot 10^9 \exp\left(-\frac{15000}{T}\right) [CO][O_2]^{0,25} [H_2O]^{0,5}$$

[кмоль/(м<sup>3</sup>·с)] [6].

Моделирование эмиссии оксидов азота проводилось с учетом двух основных механизмов образования: термического и *Prompt* [8 – 10]. При этом считалось, что  $NO_x$  имеет молекулярную массу  $M_{NO} = 30$ .

### **Влияние рециркуляции дымовых газов на эмиссию оксидов азота**

*Базовый вариант.* На первом этапе проведен анализ работы топки котла ДКВр-4/13 на номи-

нальном режиме без системы рециркуляции дымовых газов. Было принято, что горелки работают при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,15$ , суммарном расходе топлива  $G = 0,0912$  кг/с, что соответствует мощности котла 4 МВт при значении КПД 90%. Результаты расчета базового варианта показаны на рис. 2 – 4. Все результаты компьютерного моделирования представлены на рисунках в горизонтальном сечении, расположенном на высоте осей горелок.

Расчеты гидродинамики топки котла ДКВр-4/13 показали сложный и трехмерный характер потока в нем (рис. 2). Закрученные потоки от двух горелок “раскрываются” с образованием зоны обратного течения на оси каждой горелки. В зоне обратного течения наблюдается повышенная генерация турбулентности, что позитивно влияет на перемешивание топливно-воздушной смеси и горения топлива, о чем свидетельствуют результаты расчета поля температуры (рис. 3). Совместная работа горелок образует два отдельных факела длиной около 1,5 м.

Анализ полей концентрации топлива показал, что основная часть топлива сгорает на расстоянии 0,5 м от среза горелок, а процесс дожигания оксида углерода длится дольше и в основном завершается на расстоянии 1,2 м от среза горелок.

Результаты расчета полей концентрации оксидов азота (рис. 4) показали, что основная масса их образуется в области около оси каждой горелки (в зоне высокой температуры), а в дальней-

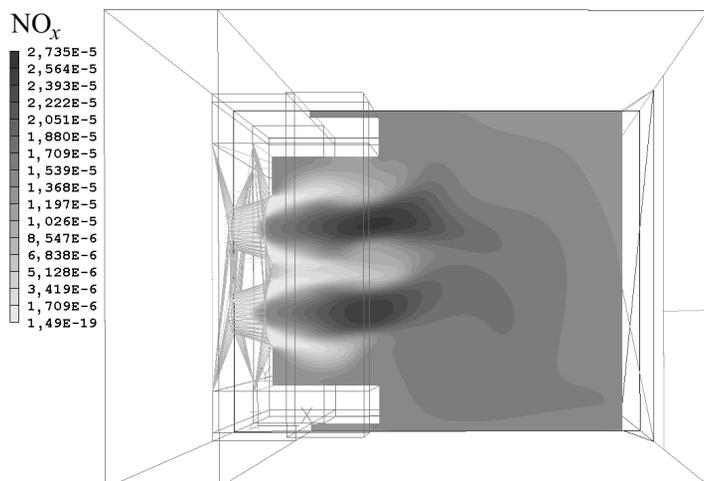


Рис. 4. Поле концентрации оксидов азота.

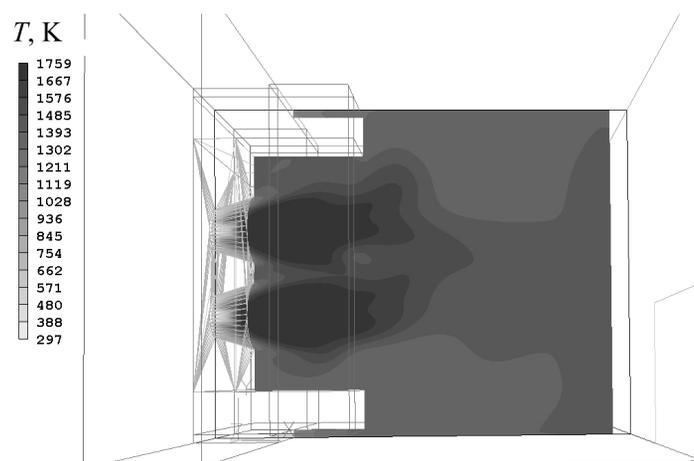


Рис. 5. Поле температуры. Доля рециркуляции 20%.

шем под действием вихревого потока они распределяются по всему объему топки.

Анализ распределения объемной скорости образования оксидов азота по термическому и *Prompt* механизмам показал, что основной вклад в образование оксидов азота вносит термический механизм. Можно выделить две зоны максимальной генерации оксидов азота: первая (основная) расположена по границе движения вторичного воздуха и топлива; вторая – на оси горелки на расстоянии одного диаметра тракта первичного воздуха горелки.

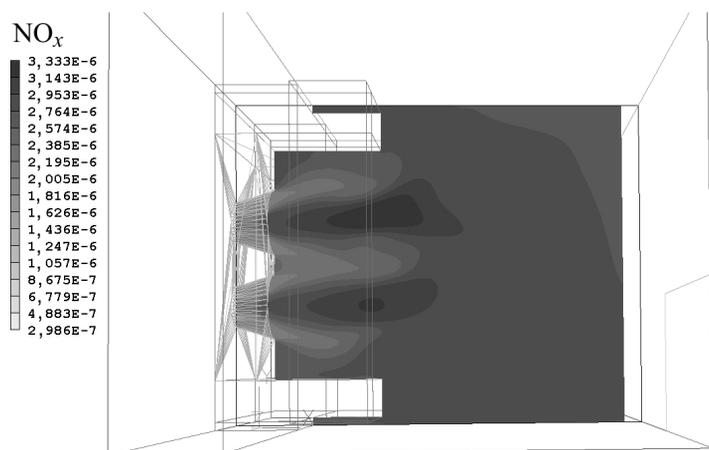
Интегрируя результаты расчетов на выходе из топки, для базового варианта были получены следующие значения: концентрация  $\text{CO} = 5,94 \text{ мг/нм}^3$ ; концентрация  $\text{NO}_x = 166 \text{ мг/нм}^3$ ; максимальная температура в топке  $T_{\text{max}} = 1915 \text{ К}$ ; давление на прокачку  $\Delta P = 700 \text{ Па}$ . Результаты базового варианта взяты за основу при изучении влияния рециркуляции дымовых газов на экологические характеристики котла. Эти данные использовались в дальнейшем при обобщении результатов расчетов при различных условиях рециркуляции продуктов сгорания.

*Влияние рециркуляции дымовых газов.* Анализ результатов базового варианта привел к выводу о необходимости исследования двух способов подачи продуктов сгорания для рециркуляции. Первый способ заключается в равномерном разбавлении дымовыми газами дутьевого воздуха (равномерная рециркуляция), а второй – в подаче дымовых газов только в тракт вторичного воздуха горелки (рециркуляция во вторичный воз-

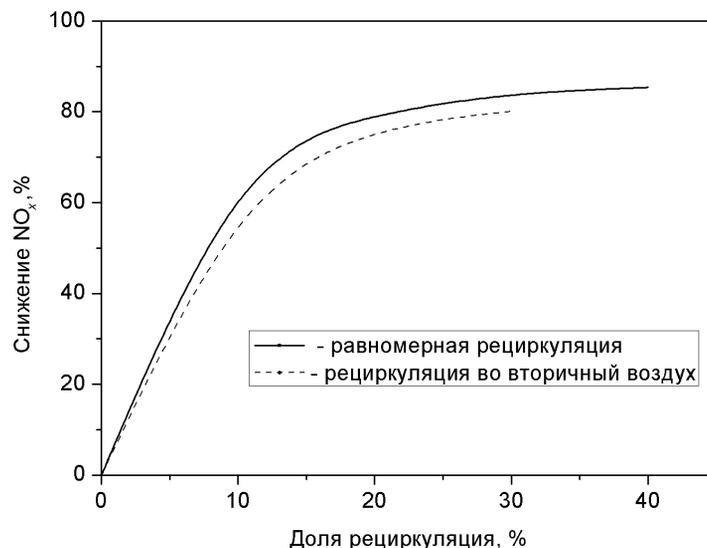
дух). Для обоих случаев расчеты выполнены при различных значениях доли рециркуляции дымовых газов. Температура дымовых газов принималась равной  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ , массовые концентрации химических соединений в первичном и вторичном воздухе пересчитывались с учетом их концентрации в дымовых газах и количества дымовых газов, которое взято для рециркуляции.

Результаты расчета полей температуры и концентрации оксидов азота для 20 % равномерной рециркуляции представлены на рис. 5 и рис. 6. Анализ полученных результатов показал, что для различных способов подачи дымовых газов гидродинамика существенно не изменяется, а уменьшение пика локальной температуры больше при равномерной рециркуляции.

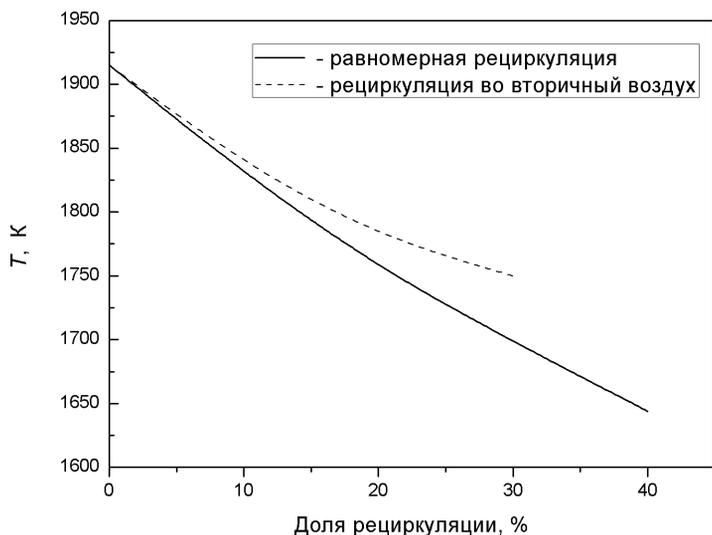
Уменьшение выбросов оксидов азота достигается вследствие уменьшения локальных пиков температуры. На рис.7 представлено изменение максимальной температуры в топке в зависимости от относительной доли рециркуляции дымовых газов. Из рис. 7 следует, что для случая равномерной рециркуляции, рост рециркуляции на 10% приводит к снижению максимальной температуры в среднем на 50 градусов. В случае рециркуляции дымовых газов во вторичный воздух наблюдается уменьшение максимальной температуры в среднем на 35 градусов на каждые 10% рециркуляции. Снижение локальной температуры приводит к уменьшению образования оксидов азота по термическому механизму, который вносит



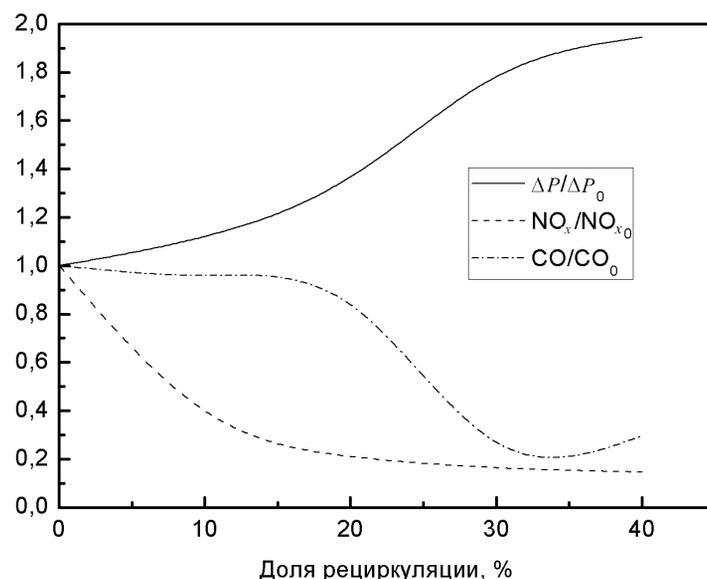
**Рис. 6. Поле концентрации оксидов азота. Доля рециркуляции 20%.**



**Рис. 8. Снижение оксидов азота в зависимости от относительной доли рециркуляции дымовых газов и способа ее организации.**



**Рис. 7. Изменение максимальной температуры пламени в топке котла в зависимости от доли рециркуляции дымовых газов.**



**Рис. 9. Зависимость основных интегральных характеристик работы топки котла ДКВр-4/13 от доли рециркуляции дымовых газов при равномерной рециркуляции.**

основной вклад в общее количество оксидов азота при сжигании природного газа. На рис. 8 представлена зависимость снижения оксидов азота от относительной доли рециркуляции дымовых газов. Эти данные показывают, что существует возможность снижения выбросов оксидов азота до 80 % при использовании метода рециркуляции дымовых газов.

Данные рис. 8 подтверждают принципиальную возможность снижения оксидов азота методом рециркуляции дымовых газов, но они не дают возможности оценить оптимальное значение доли рециркуляции. Для проведения оптимиза-

ционного анализа результаты расчетов по перепаду давления, эмиссии оксидов углерода и азота были нормированы соответствующими значениями расчета базового варианта котла ( $\Delta P_0$ ,  $NO_{x0}$ ,  $CO_0$ ). Результаты обработки представлены на рис. 9. Анализ данных рис. 9 позволяет сделать вывод, что оптимальное значение доли рециркуляции для котла

ДКВр-4/13, оснащенного горелками ГМГ-2, находится между 15 и 20 %. Это значение рециркуляции обеспечивает снижение эмиссии оксидов азота на 50...70% при увеличении давления на обеспечение расхода в трактах воздушного дутья горелок только на 20...30%. Дальнейшее увеличение доли рециркуляции приводит к незначительному снижению выбросов оксидов азота при значительном увеличении требуемого давления нагнетания.

Существует также предельное значение доли рециркуляции (35...40 %), при котором еще можно применять метод рециркуляции дымовых газов. После 40 % доли рециркуляции массовая доля кислорода в потоке, который идет на горение, становится ниже 17%, что ведет к ухудшению условий сгорания топлива, о чем свидетельствует рост концентрации оксида углерода.

### Выводы

1. Проведен анализ методов снижения выбросов оксидов азота в атмосферу при сжигании углеводородов в котлах. Метод рециркуляции дымовых газов имеет лучшее соотношение эффективность – стоимость.

2. Исследование двух способов рециркуляции дымовых газов в котле ДКВр-4/13, оснащенного горелками ГМГ – 2, показало, что:

- ◆ равномерное разбавление дутьевого воздуха дымовыми газами обладает несколькими лучшими характеристиками по снижению выбросов оксидов азота в атмосферу;

- ◆ оптимальное значение доли рециркуляции находится в области 15...20 %. При этом обеспечивается снижение эмиссии оксидов азота на 50...70% при увеличении давления на прокачку дутьевой смеси на 20...30 %;

- ◆ после 40 % рециркуляции массовая доля кислорода в потоке, что идет на горение, становится ниже 17%, что приводит к ухудшению условий сгорания топлива.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Frederick N, Agrawal R.K., Wood P.E., Wood S.C.* Induced Flue Gas Recirculation for NO<sub>x</sub> Control:

Application on Boilers and Process Heaters// Energy Texas Industries press. – Report 03 ETEC. – 2004. – 24 p.

2. *Котлер В. Р., Кругляк Е.Д., Беликов С.Е., Васильев Б.Н.* Упрощенная схема рециркуляции дымовых газов как средство сокращения выбросов оксидов азота// Энергетика. – 1995. – № 1. – С.16–17.

3. *Фаткуллин Р.М.* Оценка потерь энергии при рециркуляции с подачей дымовых газов на всас дутьевого вентилятора// Теплоэнергетика. – 1997. – № 2. – С.37–40.

4. *PHOENICS Reference Guide Version 3.6.* CHAM, London – 2004.

5. *Халатов А. А., Кобзарь С. Г., Коваленко Г.В., Демченко В. Г.* Применение компьютерных технологий при проектировании и модернизации котлов и камер сгорания/ Материалы международной конференции “Актуальные проблемы прикладной математики и механики” 23– 26 октября 2006 г., Харьков, Украина.

6. *Spalding D.B.* Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames. In 13th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1971. – P. 649– 657.

7. *Долинский А.А., Халатов А.А., Кобзарь С.Г., Назаренко О.А., Мещеряков А.А.* Использование компьютерного моделирования при малозатратной модернизации котла НИИСТУ-5 // Пром. теплотехника. – 2007. – Т. 29, № 5. – С. 80 – 91.

8. *Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М.* Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980. – 478 с.

9. *Williams A., Clarke A.G. and Pourkashanian M.* The mechanism of NO<sub>x</sub> formation during combustion of coal, NO<sub>x</sub> Generation and Control in Boiler and Furnace. – Plant Symposium, 8th September, Portsmouth, 1988.

10. *De Soete G.G.* Overall reaction rates of NO and N<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen, 15th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, 1975. – P. 1093 –1102.

Получено 16.02.2009 г.