

# РЕЗУЛЬТАТЫ НАЛАДОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТОПОК КИПЯЩЕГО СЛОЯ В РЕЖИМЕ ГАЗИФИКАЦИИ

П.К. Сеначин, А.М. Сидоров, Ф.В. Щербаков

*В работе приводятся некоторые результаты пуско-наладочных испытаний и опытной эксплуатации котельных установок с топками кипящего слоя, работающими в режиме газификации.*

Преимущества топок кипящего слоя достаточно подробно рассмотрены в работах, посвященных энергетическому сжиганию различных топлив органического происхождения и, прежде всего, энергетических низкосортных углей [1-4]. Теоретические основы процессов псевдооживления обобщены в работах [5-11]. Опыт освоения и испытаний энергетических котлов с кипящим слоем частично также освещался в литературе [12-15]. Ведущиеся в настоящее время разработки систем со сжиганием в кипящем слое сосредоточены на следующих направлениях:

1. расширение диапазона регулирования нагрузки;
2. сокращение времени ответной реакции на колебания нагрузки;
3. повышение скорости сгорания на единицу площади слоя;
4. повышение эффективности сжигания топлива (степени выгорания);
5. упрощение систем подготовки топлива к сжиганию;
6. повышение надежности вспомогательных систем (связанных с перемещением материалов: уголь, известняк, шлак, зола);
7. снижение выбросов  $NO_x$ ;
8. повышение эффективности использования известняка для улавливания сернистых газов;
9. снижение эрозии и коррозии погруженных в слой трубных пучков.

Одним из вариантов повышения качества практически всех показателей топочного процесса является переход на сжигание топлива в режиме газификации в кипящем слое.

Недостаток кислорода в кипящем слое резко снижает (в несколько раз) образование окислов азота, образующихся из азотистых соединений топлива (рис.1). Поэтому с точки зрения образования  $NO_x$  такое сжигание топлива более предпочтительно.

Увеличение расхода топлива на 20...25 % уменьшает избыток воздуха в кипящем слое до единицы или даже менее. В этих условиях не все находящееся в слое топливо реагирует полностью до  $CO_2$  и начи-

нает преобладать пиролиз угля с образованием продуктов неполного сгорания ( $CO$  и в меньшей мере  $H_2$ ,  $CH_4$  и др.) которые выносятся в смеси с продуктами полного сгорания и мелочи в надслоевой топочный объем. Эти продукты газификации можно рассматривать как дополнительно поданное в надслоевой объем газообразное топливо. Организовать дожигание газообразных продуктов можно путем правильного распределения вторичного воздуха. Поскольку из объема кипящего слоя всегда выносятся мелочь топлива, то эти газообразные продукты являются стабилизирующим фактором для дожигания частиц углерода и уменьшают механический недожег даже без применения систем возврата уноса.

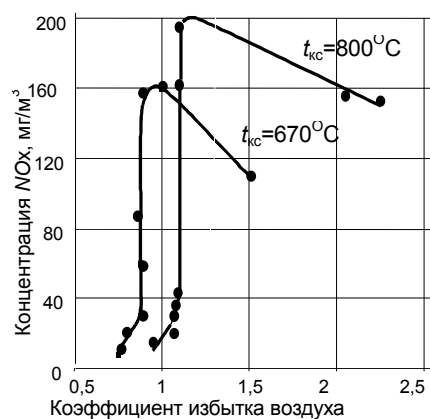


Рис. 1. Зависимость образования окислов азота от коэффициента избытка воздуха

Вторичный воздух обычно подают в надслоевой объем, распределяя его с помощью воздухораспределительных гребенок таким образом, чтобы обеспечить равномерную подачу его по сечению и по высоте топки начиная с надслоевой зоны.

В рассматриваемом примере режим газификации имеет место при довольно высокой температуре слоя – более  $1000^{\circ}C$ . Однако тепловое равновесие можно сместить сторону более низкой, и безопасной с точки зре-

ния шлакования слоя и уменьшения вредных выбросов температуры 850...950°C увеличивая количество теплообменных поверхностей в слое, наращивая циркуляцию золы или каким либо иным способом.

Необходимо помнить, что концентрация топлива в слое при снижении температуры несколько возрастает, но на практике при работе на углях в низкотемпературном кипящем слое и температурах в слое более 850°C она очень мала, и редко превышает 2...7 % от объема слоя т.к. стехиометрическая температура горения топлива в свободном пространстве значительно выше 900°C. Сущест-

вуют эмпирические зависимости расчета этой концентрации для различных условий.

Таким образом, дальнейшее увеличение подачи топлива в топку кипящего слоя, уменьшает избыток воздуха до значений менее единицы. Здесь уже более уместно говорить об **избытке топлива**, а не воздуха. В этом случае все дополнительно поданное топливо превращается в горючие газы. Температура слоя остается практически неизменной, назовем ее условно **критической температурой начала газификации** (рис. 2).

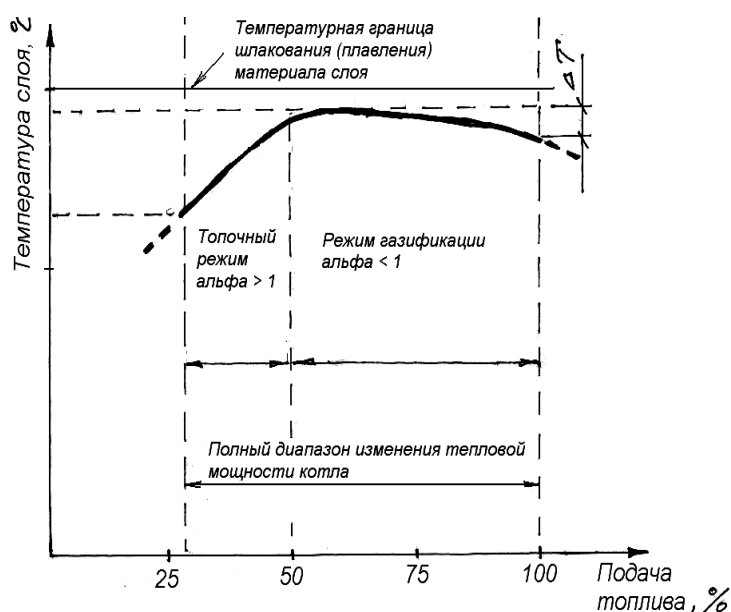


Рис. 2. Изменение температуры слоя от величины подачи топлива при неизменном расходе первичного воздуха в кипящий слой

При этом необходимо, чтобы температура была ниже температуры плавления материала слоя во всем диапазоне нагрузок топки. Дальнейшее увеличение подачи топлива не ведет к росту температуры слоя. На практике это означает, что тепловыделение в слое при увеличении подачи топлива остается постоянным, поскольку кислород закончился еще в глубине слоя, температурное равновесие не нарушается, а вынос продуктов газификации в надслоевое пространство увеличивается **пропорционально** дополнительно поданному топливу (рис.3). В этой же пропорции необходимо увеличивать подачу вторичного воздуха. Расход воздуха в слой остается практически неизменным. Концентрация горючих в слое несколько возрастает.

При высокой степени газификации топлива в слое ( $\alpha = 0,5$  и менее) и, следовательно-

но, большой подаче вторичного воздуха появляется возможность создавать низкотемпературное вихревое движение в топке над слоем. Образование вихря увеличивает время пребывания мелких частиц топлива в надслоевом объеме и дополнительно снижает механический недожег, даже не увеличивая степень возврата уносимых частиц. Появляется возможность уменьшения габаритов топки. Однако образование вихревого движения в расширяющихся топках происходит лишь при движении **всего объема газов** по траектории вихря (такое движение реализовано в котлах фирмы Дуклафлюид), либо в обычных топках при двух и более кратном превышении вторичного воздуха над первичным, с высокой скоростью, и полной его подаче в вихрь, что не всегда возможно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАЛАДОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТОПОК КИПЯЩЕГО СЛОЯ В РЕЖИМЕ ГАЗИФИКАЦИИ

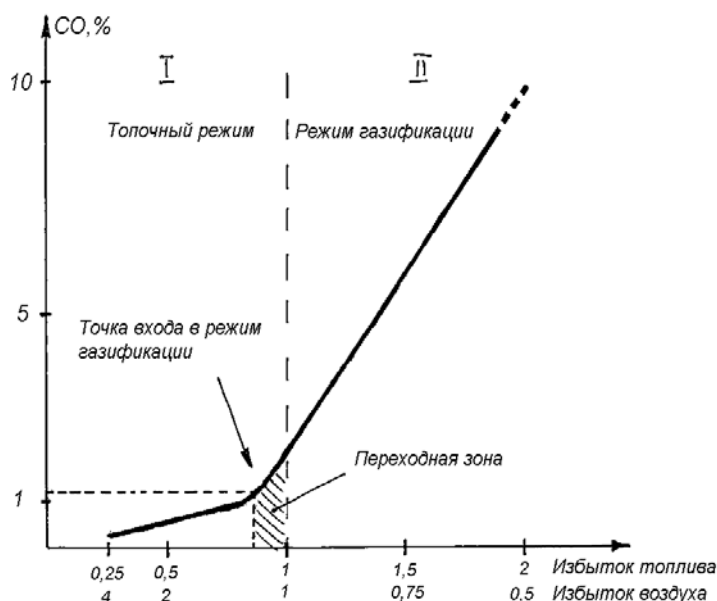


Рис. 3. Зависимость содержания CO в надслоевом объеме от избытка воздуха и топлива

Во всех случаях количество вторичного воздуха на горение в режиме газификации определяется при наладке котла по минимуму содержания CO в уходящих газах и низком мехнедожоге. Распределяя нужным образом подачу вторичного воздуха по высоте топки можно управлять температурами в надслоевом объеме и даже достичь повышения температур относительно слоевой, что на котлах работающих в топочном режиме практически невозможно. Эта особенность работы топки НТКС позволяет поддерживать температуру в надслоевом объеме и без подогрева вторичного воздуха. Конструкция котла при этом упрощается, а надежность работы значительно повышается.

Если расход первичного воздуха в процессе регулирования нагрузки котла неизменен (что весьма желательно с точки зрения управления топочным процессом), то соотношение топливо – воздух на котел устанавливается только вторичным воздухом (рис. 4). В этом случае управление котлом с кипящим слоем работающим в режиме газификации и регулирование его нагрузки упрощается.

Необходимо учитывать, что температура подаваемого топлива и воздуха в слой, агрегатное состояние топлива и особенно его влажность. Эти факторы оказывает значительное влияние на **критическую температуру** начала газификации.

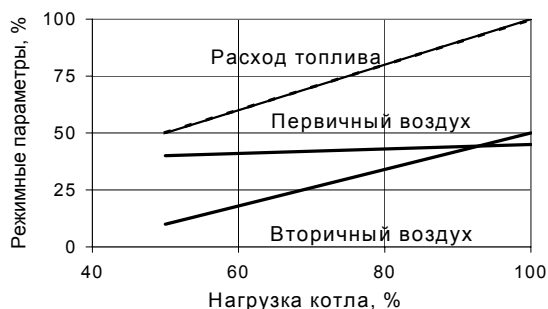


Рис. 4. Зависимости расхода первичного и вторичного воздуха и топлива от нагрузки котла

Существенным преимуществом режима газификации по сравнению с топочным режимом является следующее обстоятельство: поскольку суммарное тепловыделение в слое (определенной высоты) пропорционально **площади поперечного сечения**, а **тепловосприятие охлаждаемых стенок пропорционально периметру** слоя, то в большом прямоугольном или круговом цилиндрическом слое относительное тепловосприятие стенок меньше, чем в слое небольших габаритов или с узким сечением, характерных для режима газификации. Таким образом, в топке работающей в режиме газификации удается гораздо легче поместить в слое требуемое количество теплообменных поверхностей, а

площадь топки снизить в несколько раз при неизменных скоростях в слое. Небольшое количество теплообменных поверхностей гораздо легче защитить от износа.

Из литературных источников и собственных результатов авторов по наладке и исследованию топок кипящего слоя известны следующие факты:

1. Для котла работающего в режиме газификации характерна высокая устойчивость всех параметров работы. По стабильности теплотехнических параметров он близок к котлу, использующий в качестве топлива природный газ.

2. Отмечается высокая маневренность котла и легкость изменения его нагрузки.

3. Нагрузка котла изменяется с большей скоростью, так как температура слоя **неизменна** и тепловая инерционность слоя не оказывает влияния на темп изменения нагрузки.

4. Регулирование нагрузки котлоагрегата, работающего в режиме газификации топлива, можно осуществлять **пропорциональным изменением подачи топлива и вторичного воздуха** при практически неизменном расходе воздуха под слой. Эти регулировки нетрудно автоматизировать. При необходимости вводится корректировка по содержанию  $CO$  в уходящих газах. Диапазон регулирования нагрузки легко может быть расширен по сравнению с традиционными котлами с кипящим слоем. Это справедливо для котлов любой производительности.

5. При расчете топки в **режиме газификации топлива в слое** необходимо учитывать температуру подаваемого в топку топлива и его агрегатное состояние (замороженное или нет) и температуру воздуха, поскольку это оказывает заметное влияние на критическую температуру начала газификации в «кипящем слое». Разница зимних и летних температур слоя под влиянием этих факторов достигает  $100...200^{\circ}C$ .

6. Вихревое движение в расширяющейся топке организуют при двух-трех и более кратном превышении расхода вторичного воздуха над первичным (при высокой степени газификации топлива т.е. при избытке топлива в слое более 3-х).

7. Практически на котлах с кипящим слоем газификация начинается уже при избытке расхода воздуха равном  $1,1...1,2$  по причине неравномерности прохождения пузырей воздуха через слой и ряда других факторов.

8. Топки, работающие в режиме газификации, проектируются т.о., чтобы в топочном режиме (до начала выхода на газификацию) они работали на нагрузке  $2...5$  раза меньше номинальной. Расчетная площадь топки при этом во столько же раз уменьшается. Т.о. имея топку кипящего слоя небольшой площади ( $3...5\text{ м}^2$ ) удастся получить суммарное тепловыделение в топочной камере котла до  $50...100\text{ МВт}$ , что недостижимо для котлов с топками НТКС работающими в топочном режиме.

9. Грамотно спроектированные топки, предназначенные для работы в режиме газификации, не имеют такого недостатка собственного кипящему слою как **шлакование**, поскольку температура в слое **выше критической не** увеличивается во всем диапазоне нагрузок (температура горения становится ниже температуры плавления золы).

10. В режиме газификации значительно (иногда в несколько раз) снижается эмиссия окислов азота по сравнению с топочным режимом работы кипящего слоя.

11. Некоторое изменение расхода воздуха в слой в режиме газификации не оказывает заметного влияния на режимы работы котла за исключением содержания  $CO$  в топке.

12. В тоже время недостаток вторичного воздуха для топок работающих в режиме газификации, как показала практика работы котлов, очень существенно сказывается на качественных показателях работы надслоевого объема (выше зоны расширенного слоя). Несоответствие установленного расхода вторичного воздуха режимной карте, приводит помимо резкого роста  $CO$ , еще и к увеличению концентрации горючих в уносимой золе до  $25...30\%$  (при нормальной работе эта концентрация не выше  $3...9\%$ ). Причем для подавления мехнедожега необходимо иметь избыток воздуха на  $0,1...0,2$  выше, чем для подавления  $CO$ . Котлы, работающие в топочном режиме менее критичны к подаче вторичного воздуха.

13. Топка кипящего слоя, работающая в режиме газификации, значительно менее критична к фракционному составу топлива и может работать на крупной фракции т.к. скорости в слое достаточно высоки. Топливо может не иметь мелочи, этим дополнительно снижается мехнедожег и упрощается система топливоподготовки.

В качестве примера ниже приводятся соотношения расходов воздуха на котел номинальной тепловой мощностью  $34\text{ МВт}$ , из-

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАЛАДОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТОПОК КИПЯЩЕГО СЛОЯ В РЕЖИМЕ ГАЗИФИКАЦИИ

меренные при различных нагрузках. Содержание CO во всем диапазоне регулирования нагрузки не превышает 150 ppm.

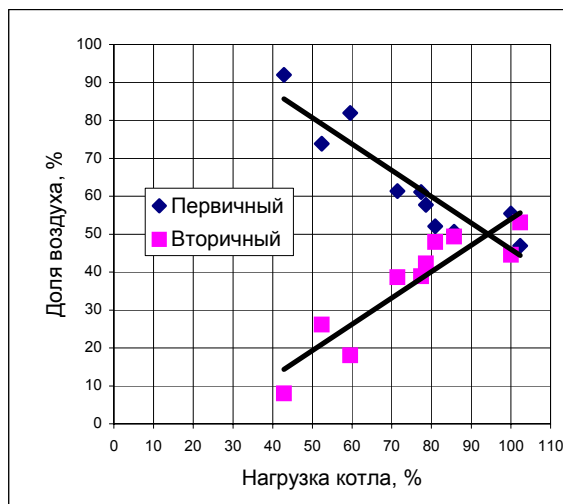


Рис. 5. Перераспределение воздуха в котел (первичный – вторичный) в зависимости от нагрузки котла

Как видно из графиков (рис. 5 и 6), на нагрузке до 15 МВт котел работает в топочном режиме, практически без подачи вторичного воздуха.

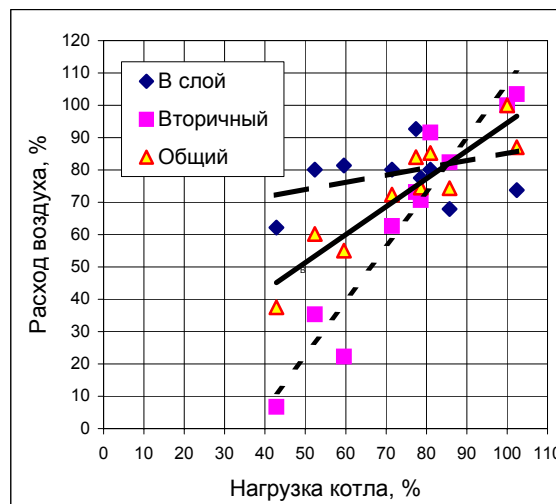


Рис. 6. Зависимость расходов воздуха в котле кипящего слоя от нагрузки

### ЛИТЕРАТУРА

1. Радованович М. Сжигание топлива в псевдооживленном слое: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.
2. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник / Под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
3. Бородуля В.А., Виноградов Л.М. Сжигание твердого топлива в кипящем слое. – Минск: Наука и техника, 1980. – 192 с.
4. Кубин М. Сжигание твердого топлива в кипящем слое: Пер. с чеш. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 188 с.
5. Эйтс Дж. Основы механики псевдооживления с приложениями: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 234 с.
6. Азров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Л., 1978. – 172 с.
7. Буевич Ю.А., Минаев Г.А. Струйное псевдооживление. – М.: Химия, 1984. – 228 с.
8. Забродский С.С. Высокотемпературные установки с псевдооживленным слоем. – М.: Энергия, 1971. – 184 с.
9. Куний Д., Левеншпиль О. Промышленное Псевдооживление: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 202 с.
10. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем. – Л.: Химия, 1981. – 296 с.
11. Сыромятников Н.И., Васанова Л.К., Шиманский Ю.Н. Тепло- и массообмен в кипящем слое. – М.: Химия, 1967. – 176 с.
12. Втюрин Ю.Н., Пронь Г.П. Опыт освоения энергетического котла с кипящим слоем БКЗ-420-140КС // Ползуновский вестник. – 2004. – № 1. – С. 110-116.
13. Антонов П.П., Скрябин А.А., Королев С.В. Испытание котла КВ-ТС-20 при сжигании низкосортных углей в кипящем слое // Ползуновский вестник. – 2004. – № 1. – С. 141-146.
14. Stingfellow T. Startur and Jnital Operation of Rivesville 30 MW Fluid Bed Boiler // Доклад на 4-й Международной конференции по сжиганию угля в кипящем слое. – Вашингтон, 1977.
15. Brien W.B., Hill M.K. TVA'S 160 MW Shawnee Atmospheric Fluidized Bed Combustion (AFBC) Demonstration Unit 20000 Hr of Operation – Fluidized Bed Combustion // ASME. – 1993. – Vol. 2. – P. 328-342.