

*Светлой памяти*

**В.В. Волгина, Н.И. Давыдова,**

**А.Т. Лебедева, В.А. Иванова,**

**В.Д. Миронова, В.Я. Ротача,**

**В.И. Скурихина, С.Г. Ушакова,**

**Валентины Тверской**

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

За истекшие два десятилетия со времени выхода первого издания книги<sup>1</sup> в мире автоматизации энергетического оборудования, теории и технологии АСУТП произошли существенные изменения.

Многофункциональные АСУТП энергоблоков создаются на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры, выполняют системообразующие функции и переведены в разряд основного оборудования электростанции. Вычислительный ресурс ПТК позволяет реализовать в составе АСУТП задачи технологического контроля, функциональной диагностики, адаптивного управления с эталонными математическими моделями, высокоточного автоматического регулирования и управления.

Проблема структурного синтеза сложных функций АСУТП определяется физическими трудностями формирования вектора необходимой и достаточной информации о текущем состоянии технологического объекта управления (ТОУ), многие параметры которого недоступны для непосредственного контроля, искажены разного рода нелинейностями и действием случайных возмущений.

---

<sup>1</sup> **Тверской Ю.С.** Автоматизация котлов с пылесистемами прямого вдувания. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 256 с.

Задача получения необходимых сведений о состоянии объекта управления до конца прошлого века решалась на основе опыта эксплуатации и/или путем экспериментальных исследований на действующем оборудовании. В современных условиях развития электроэнергетического рынка генерации проведение экспериментальных исследований стало практически невозможным по многим объективным и субъективным причинам. С одной стороны, по причине сложности постановки экспериментальных работ в структуре современной АСУТП, а с другой – вследствие существенных рисков потери дорогостоящего оборудования при низкой квалификации оперативного персонала. Поэтому приведенные в издании 1996 г. экспериментальные результаты исследований динамических характеристик тепломеханического оборудования и статистических характеристик реальных эксплуатационных возмущений остаются уникальными. Они широко используются как для решения разного рода задач анализа и синтеза локальных систем управления тепломеханического оборудования, так и с целью верификации и оценки меры адекватности математических моделей каналов регулирования при синтезе САУ на ранних стадиях функционального проектирования, а также компьютерных моделей и тренажеров энергетических объектов.

В настоящее время, когда мировая энергетическая стратегия и энергетическая стратегия России возвращаются к пониманию необходимости существенного увеличения доли угля в структуре потребляемого на ТЭС топлива и эффективности (конкурентоспособности) его использования, выходящая в свет книга остается практически единственным изданием, в котором представлено целостное рассмотрение проблем автоматизации управления тепловой нагрузкой пылеугольных котлов тепловых электростанций.

Второе издание книги переработано и дополнено.

В первой главе дополнительно рассмотрены вопросы работы котлов с промежуточным бункером пыли и пылесистемами с шаровыми барабанными мельницами.

Вторая, третья и четвертая главы остались практически без изменений. Пятая глава написана заново и посвящена ключевым вопросам начальной стадии создания АСУТП, решение которых позволяет исключить грубые ошибки в принятии последующих концептуальных решений.

В шестой, седьмой и восьмой главах представлены результаты новых разработок по теории и практике структурного синтеза систем регулирования тепловой нагрузкой прямоточных и барабанных пылеугольных котлов. Особое внимание уделено развитию методологии построения высокоточных нелинейных динамических моделей систем пылеприготовления, обладающих аккумуляцией топлива в каналах формирования потоков топливовоздушных смесей<sup>2</sup>.

В девятой главе впервые рассмотрены методологические особенности расчетов систем автоматического регулирования с оценкой их гарантированной технологической работоспособности.

Автор надеется, что книга окажется полезной для широкого круга междисциплинарных специалистов по проектированию, режимной наладке и эксплуатации многофункциональных АСУТП автоматизированного тепломеханического оборудования электростанций. Книга может быть использована в качестве учебного пособия аспирантами и студентами (инженерно-ориентированные бакалавры и магистры) технических университетов.

---

<sup>2</sup> В этой части работа была поддержана Грантом РФФИ (Проект № 07-08-00360 конкурса РФФИ 2007–2008 гг.).

**Предисловие к первому изданию 1996 г. (сокр.)**

На тепловых электрических станциях при подготовке твердого топлива к сжиганию в факельных топках паровых котлов преимущественное распространение получили индивидуальные замкнутые системы пылеприготовления, выполненные по схеме прямого вдувания.

Для котлов, оборудованных пылесистемами прямого вдувания, характерны наличие в рассредоточенном топливоподающем канале технологических (мельничных) систем измельчения, в которых формируются потоки первичной топливовоздушной смеси с заданными характеристиками, и способность аккумулировать готовое измельченное топливо. Эти особенности выделяют паровые котлы с пылесистемами прямого вдувания в класс технологических объектов управления, для которых режим работы пылесистемы полностью определяется тепловой нагрузкой котла, а остановка или изменение пылеподачи любой мельницы оказывает значительное влияние на процессы горения и тепловыделения в топке (аэродинамику, тепловую неравномерность в газовых потоках).

Опыт эксплуатации, экспериментальные исследования показали, что с ростом единичной мощности энергоблоков значительно возрастает количество перерабатываемого на ТЭС твердого топлива, соответственно растут объемы уходящих газов, золы, шлаков. С ухудшением качества топлива существенно возрастают его потоки для сжигания, что также ведет к повышенным нагрузкам топливоприготовительного оборудования, возникновению разного рода технологических ограничений. При этом возникает комплекс проблем структурного синтеза систем автоматического управления. Эти проблемы связаны с согласованием подачи сырого топлива и воздуха при

изменении тепловой нагрузки котла, производительности мельниц и состава группы топливоприготовительного оборудования, с поддержанием беззавального режима работы мельниц и с обеспечением оптимального соотношения «топливо — воздух» в рассредоточенных топливовоздушных потоках первичной аэросмеси, со стабилизацией аэродинамической структуры факела в топке котла.

Достижение эффективной эксплуатации пылеугольных котлов ТЭС возможно только путем совместного решения комплекса задач создания автоматизированного объекта. Проектирующие организации традиционно разрабатывают проект энергоблока и его АСУТП до самого нижнего уровня детализации (датчика, исполнительного механизма) для всех его основных функциональных подсистем. При этом сложность объекта проектирования не позволяет учесть всю совокупность технологических факторов, что, в свою очередь, приводит к необходимости доработки проектов по ходу их реализации.

Целостное рассмотрение проблем автоматизации паровых котлов с пылесистемами прямого вдувания в отечественной литературе и в зарубежных публикациях отсутствует. Последняя книга, в которой излагались эти вопросы, вышла в середине 1960-х гг. под редакцией В.Д. Пивня [3]. В книге Г.П. Плетнева [63], вышедшей в начале 1980-х гг., вопросы автоматизации котлов с пылесистемами прямого вдувания изложены лишь фрагментарно. В настоящей книге автором предпринята попытка целостного рассмотрения проблемы автоматизации котлов с пылесистемами прямого вдувания как особого класса сложных технологических объектов управления.

Справедливость принципиальных решений, изложенных в книге, подтверждается опытом эксплуатации новых систем управления пылеугольных котлов с пылесистемами прямого

вдувания, а также тенденцией применения в схемах прямого вдувания шаровых барабанных мельниц под давлением.

При написании книги использованы в основном результаты собственных исследований автора и его учеников. Исследования проведены, особенно в их экспериментальной части, при неоценимой помощи эксплуатационного персонала электростанций и наладочных организаций, конструкторского бюро Сызранского завода тяжелого машиностроения, а также сотрудников Ивановского государственного энергетического университета.

Автор выражает благодарность рецензентам доктору технических наук С.А. Таламанову и заведующему кафедрой систем управления ИГЭУ, кандидату технических наук, доценту А.В. Голубеву, замечания которых способствовали улучшению рукописи, а также инженерам кафедры систем управления И.В. Алениной, О.В. Злыдарь, магистру М.А. Иванковой и кандидату технических наук И.К. Муравьеву за неоценимую помощь в подготовке второго издания книги к печати.

Все замечания и пожелания просим направлять на E-mail: tverskoy@su.ispu.ru, y.tverskoy@me.com, tverskkoj@mail.ru, kafsu@su.ispu.ru.

*Ю.С. Тверской*

## ГЛАВА I

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ

#### 1.1. Принципиальные схемы воздушно-газовых трактов котлов с пылесистемами прямого вдувания

Различие энергетических углей в отношении реакционной способности, зольности, абразивности, влажности приводит к необходимости применения различных технологических схем пылесистем прямого вдувания и способов сушки топлива [34, 45, 46, 67].

Выбор типа мельницы определяется в основном физическими свойствами топлива. При подготовке к сжиганию низкосортных влажных топлив (бурые угли, лигниты и др.) рекомендуется использовать мельницы-вентиляторы (М-В). Подавляющее большинство зарубежных ТЭС при размоле каменных углей оборудуется среднеходными мельницами (СМ) с центробежными сепараторами.

На отечественных ТЭС (табл. 1.1) почти половина сжигаемого твердого топлива с самым широким спектром характеристик измельчается в молотковых мельницах (ММ) с встроенным сепараторами (гравитационным, инерционным, центробежным). Отечественные молотковые мельницы и мельницы-вентиляторы типизированы, отличаются отработанностью конструкций и режимов эксплуатации.

Перспективно применение в автоматизированных пылесистемах прямого вдувания шаровых барабанных мельниц (ШБМ) из-за их более высокой эксплуатационной надежности и повышенных некоторых других показателей [104, 140, 144, 145, 149, 150].

ГЛАВА I. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ  
ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ

---



---

**Таблица 1.1.** Использование мельниц для размола различных топлив [46, 89]

Топливо	Тип мельницы			
	ШБМ	ММ	СМ	М-В
Антрацит АШ	100,0	—	—	—
Уголь	тощий	97,8	1,2	1
	каменный	85,5	9,7	4,5
	экибастузский	27,3	72,7	—
	бурый	17,1	80,0	2,9
Сланцы	—	100	—	—
Торф	—	97,7	—	2,3
Итого:				
натуральное	47,9	49,9	1,2	1,0
условное	59,3	38,5	1,6	0,6

Рассмотрим технологические особенности основных вариантов принципиальных схем индивидуальных замкнутых пылесистем прямого вдувания (рис. 1.1).

**Вариант 1** (рис. 1.1, а) – пылесистема прямого вдувания с молотковыми мельницами, оснащенными гравитационными (шахтными) сепараторами пыли, работает под разрежением с воздушной сушкой топлива (торф, сланцы, бурье угли).

**Вариант 2** (рис. 1.1, б) – пылесистема прямого вдувания с молотковыми мельницами с инерционными сепараторами пыли, работает под давлением, создаваемым общим дутьевым вентилятором (ДВ), с воздушной сушкой топлива (бурые угли, сланцы).

**Вариант 3** (рис. 1.1, в) – пылесистема прямого вдувания с молотковыми (среднеходными) мельницами с центробежными сепараторами пыли, работает под давлением, создаваемым установленным непосредственно перед мельницей индивидуальным вентилятором горячего воздуха.

**Вариант 4** (рис. 1.1, г) – пылесистема с молотковыми (среднеходными) мельницами с центробежными сепараторами пыли, работает под давлением, создаваемым установленным перед воздухоподогревателем первичного воздуха вентилятором общего первичного воздуха, с воздушной сушкой топлива (каменные угли).

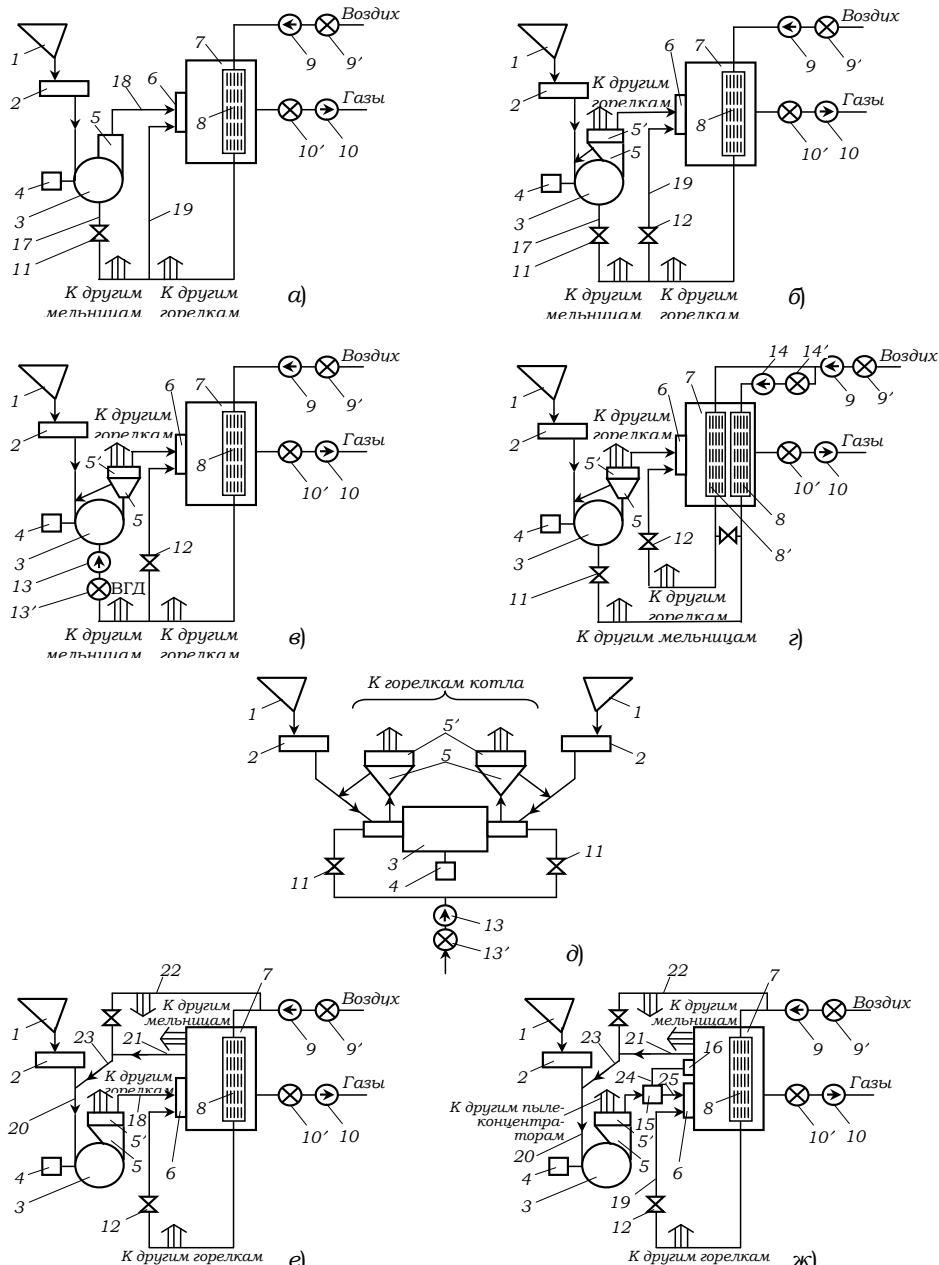
**Вариант 5** (рис. 1.1, *д*) – пылесистема прямого вдувания с ШБМ с центробежными сепараторами пыли, работает под давлением, создаваемым дополнительным вентилятором первичного воздуха, с воздушной сушкой топлива или его смесью с дымовыми газами (абразивные высокозольные каменные угли с высокой сопротивляемостью размолу).

**Вариант 6** (рис. 1.1, *е*) – пылесистема прямого вдувания с мельницами-вентиляторами с инерционными сепараторами пыли, работает под разрежением с сушкой топлива дымовыми (топочными) газами или их смесью с воздухом (влажные бурьи угли, лигниты). При установке в тракте за мельницей-вентилятором мельничного вентилятора тракт до мельничного вентилятора находится под разрежением, а тракт после мельничного вентилятора – под давлением.

**Вариант 7** (рис. 1.1, *ж*) – пылесистема прямого вдувания с мельницами-вентиляторами с инерционными сепараторами пыли и пылеконцентраторами, работает под разрежением с сушкой топлива топочными газами или их смесью с воздухом.

Газовоздушный тракт котлов с пылесистемой прямого вдувания на базе молотковых мельниц с гравитационными сепараторами пыли (шахтными мельницами, см. рис. 1.1, *а*) имеет незначительное аэродинамическое сопротивление, для преодоления которого оказывается достаточно полезного напора, развиваемого дутьевым вентилятором.

Пылесистема работает под разрежением или незначительным давлением, значение которого в воздуховоде перед мельницей не превышает 100–200 Па. Низкое аэродинамическое сопротивление системы пылеприготовления определяет небольшой удельный расход электроэнергии на пневмотранспорт пыли в топку котла. Отличительная особенность такой схемы – высокая чувствительность аэродинамического сопротивления к изменениям загрузки мельницы, определяемой массой топлива, циркулирующего в системе «мельница – сепаратор».



**Рис. 1.1.** Принципиальные схемы индивидуальных замкнутых пылесистем прямого вдувания

## 1.1. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ВОЗДУШНО-ГАЗОВЫХ ТРАКТОВ КОТЛОВ С ПЫЛЕСИСТЕМАМИ ПРЯМОГО ВДУВАНИЯ

---

*а* – с молотковыми мельницами с гравитационными (шахтными) сепараторами пыли: работают под разрежением, с воздушной сушкой топлива (торф, сланцы, бурые угли);

*б* – с молотковыми мельницами с инерционными сепараторами пыли: работают под давлением, создаваемым общим дутьевым вентилятором, с воздушной сушкой топлива (бурые угли, сланцы);

*в* – с молотковыми или среднеходными мельницами с центробежными сепараторами пыли: работают под давлением, создаваемым установленным непосредственно перед мельницей индивидуальным вентилятором горячего воздуха, с воздушной сушкой топлива (каменные угли);

*г* – с молотковыми или среднеходными мельницами с центробежными сепараторами пыли: работают под давлением, создаваемым установленным перед воздухоподогревателем первичного воздуха вентилятором общего первичного воздуха, с воздушной сушкой топлива (каменные угли);

*д* – с шаровыми барабанными мельницами с центробежными сепараторами пыли: работают под давлением, создаваемым дополнительным вентилятором первичного воздуха, с воздушной сушкой топлива или его смесью с дымовыми газами, с двусторонним (односторонним) подводом сырого топлива и первичного воздуха (абразивные каменные угли);

*е* – с мельницами-вентиляторами с инерционными сепараторами пыли: работают под разрежением – тракт до мельничного вентилятора и под давлением – тракт после мельничного вентилятора, с сушкой топлива дымовыми (топочными) газами или их смесью с воздухом (влажные бурые угли, лигниты);

*ж* – с мельницами-вентиляторами с инерционными сепараторами пыли и пылеконцентраторами: работают под разрежением, с сушкой топлива топочными газами или их смесью с воздухом.

Обозначено:

1 – бункер сырого угля; 2 – питатель; 3 – мельница; 4 – электропривод мельницы; 5, 5' – сепаратор с пыледелителем; 6 – горелка; 7 – топка парового котла; 8, 8' – воздухоподогреватель; 9, 9' – дутьевой вентилятор с направляющим аппаратом; 10, 10' – дымосос с направляющим аппаратом; 11 – регулирующий орган расхода первичного воздуха, поступающего в мельницу; 12 – регулирующий орган расхода вторичного воздуха, поступающего в горелку; 13, 13' – индивидуальный вентилятор первичного горячего воздуха, поступающего в мельницу, с направляющим аппаратом; 14, 14' – вентилятор общего первичного воздуха с направляющим аппаратом; 15 – пылеконцентратор; 16 – сбросная горелка; 17 – канал потока первичного воздуха к мельницам; 18 – канал потока топливовоздушной смеси к горелкам (аэросмесь); 19 – канал потока вторичного воздуха к горелкам; 20 – труба-сушилка сырого топлива, подаваемого в мельницу; 21 – канал потока топочных газов, отбираемых из топки на сушку сырого топлива; 22 – канал присадки холодного (слабоподогреветого, горячего) воздуха; 23 – сушильный агент; 24 – канал отработанного (сбросного) сушильного агента; 25 – поток концентрированной аэросмеси к горелкам.

Шахтные мельницы до сих пор широко используются на прямоточных и барабанных котлах небольшой паропроизводительности (до 320 т/ч) при сжигании высокореакционных топлив (с содержанием летучих веществ более 28%), для экономичного сжигания которых требуется грубый помол ( $R_{90}$  более 40%) пыли.

Воздушно-газовые тракты котлов с пылесистемами прямого вдувания на базе современных молотковых мельниц с инерционными (для бурых углей, см. рис. 1.1, б) и центробежными (для каменных углей, см. рис. 1.1, в, г) сепараторами имеют развитую систему пылепроводов в связи с подключением к одной мельнице через делитель пылевоздушной смеси нескольких горелок. Аэродинамическое сопротивление пылесистемы составляет 3–3,5 кПа (300–350 мм вод. ст.). Для преодоления этого сопротивления устанавливаются дополнительные вентиляторы первичного воздуха, в воздуховодах горячего воздуха за воздухоподогревателем – вентиляторы горячего дутья (ВГД), в воздуховодах холодного воздуха перед воздухоподогревателем – вентиляторы общего первичного воздуха (ВПВ).

Применение в пылесистемах прямого вдувания среднеходовых мельниц с центробежными сепараторами (см. рис. 1.1, в, г) является, по существу, альтернативным техническим решением для аналогичных схем с молотковыми или шаровыми барабанными мельницами. Среднеходовые мельницы расходуют меньше электроэнергии на размол, но с точки зрения эксплуатационной надежности более критичны к засоренности топлива твердыми породными и металлическими включениями.

В последнее время котлостроительные фирмы начали применять в пылесистемах прямого вдувания шаровые барабанные мельницы [104, 119–123]. Например, двухсторонняя шаровая барабанная мельница (см. рис. 1.1, д) состоит из двух

симметричных контуров размола, которые могут работать независимо. В каждом контуре сырой уголь из бункера сырого угля подается сначала в смешивающий короб, где подсушивается горячим воздухом, затем вводится непосредственно в мельницу. Первичный воздух разделяется при этом на два-три потока: вентилирующий (транспортирующий, мельничный), подаваемый непосредственно в барабан мельницы, байпасный – вводится в канал мельничного продукта (на вход сепаратора), и сепараторный (специальный), вводимый в зону поддува сепаратора. Система «мельница – сепаратор» находится под давлением, что определяет высокий уровень требований к конструктивному совершенствованию уплотнений барабана мельницы. Размол угля осуществляется путем трения и раздавливания металлическими шарами при вращении шароугольной массы. Корпус шаровых барабанных мельниц вращается от электропривода, который может иметь несколько скоростей. Замена среднеходных и молотковых мельниц на шаровые барабанные мельницы позволяет существенно увеличить эксплуатационную надежность пылесистемы, снизить затраты на ремонт. Однако решающим в идее использования шаровых барабанных мельниц в схеме прямого вдувания стал, как будет обосновано ниже, фактор апробации нового принципа управления, разработанного для рассматриваемого класса технологических объектов управления (ТОУ) [11, 101].

Интенсивное использование низкосортных влажных топлив (бурых углей КАТЭК, лигнитов) с высокими значениями выхода летучих,  $V_L > 40\%$ , допускающих относительно грубый помол пыли  $R_{90} = 40\text{--}50\%$ , в котлах мощных энергоблоков (300–800 МВт) вызвало повышенный интерес к пылесистемам с мельницами-вентиляторами. Этими пылесистемами оборудованы в основном котлы ТЭС Сибири и Дальнего Востока.

Мельницы-вентиляторы широко распространены за рубежом (Болгария, Германия, в странах Средней Азии и бывшей Югославии).

Газовоздушный тракт котлов с пылесистемами на базе мельниц-вентиляторов, использующих в качестве агента сушки высокотемпературные продукты сгорания, имеет дополнительные каналы холодного (слабоподогретого) и высокотемпературного сушильного агента (см. рис. 1.1, е), отработанного сбросного сушильного агента и концентрированной аэросмеси (см. рис. 1.1, ж). При этом имеет место совмещение процессов размола и сушки с транспортом пылегазовоздушной смеси в одном агрегате. Однако большая доля отбора продуктов сгорания на сушку ведет к балластировке зоны горения инертными продуктами сгорания и водяными парами, которые могут снизить устойчивость процесса воспламенения и горения.

Установка для ликвидации этого недостатка пылеконцентраторов, позволяющих подать примерно 30% сушильного агента с 85–90% угольной пыли в основную горелку, а остальные 70% сушильного агента с 10–15% более тонкой угольной пыли через сбросные горелки в топку, ведет к появлению особо опасных возмущений. Лучшими показателями среди пылесистем с пылеконцентратором будет обладать, по-видимому, схема пылесистемы [49], в которой примерно 80% сушильного агента поступает вместе с пылью в горелки, 20% глубоко обеспыленных продуктов сушки и водяных паров подается на всас мельницы с соответствующей термической обработкой. Идея термической обработки отработанного сушильно-вентилирующего агента [6, 12] получает, как видим, практическое использование в различных схемах подготовки топлив.

Рассматривая в целом использование в пылесистемах различного типа мельниц и анализируя деятельность ведущих зарубежных фирм, можно сделать вывод, что предпочтение то-

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)