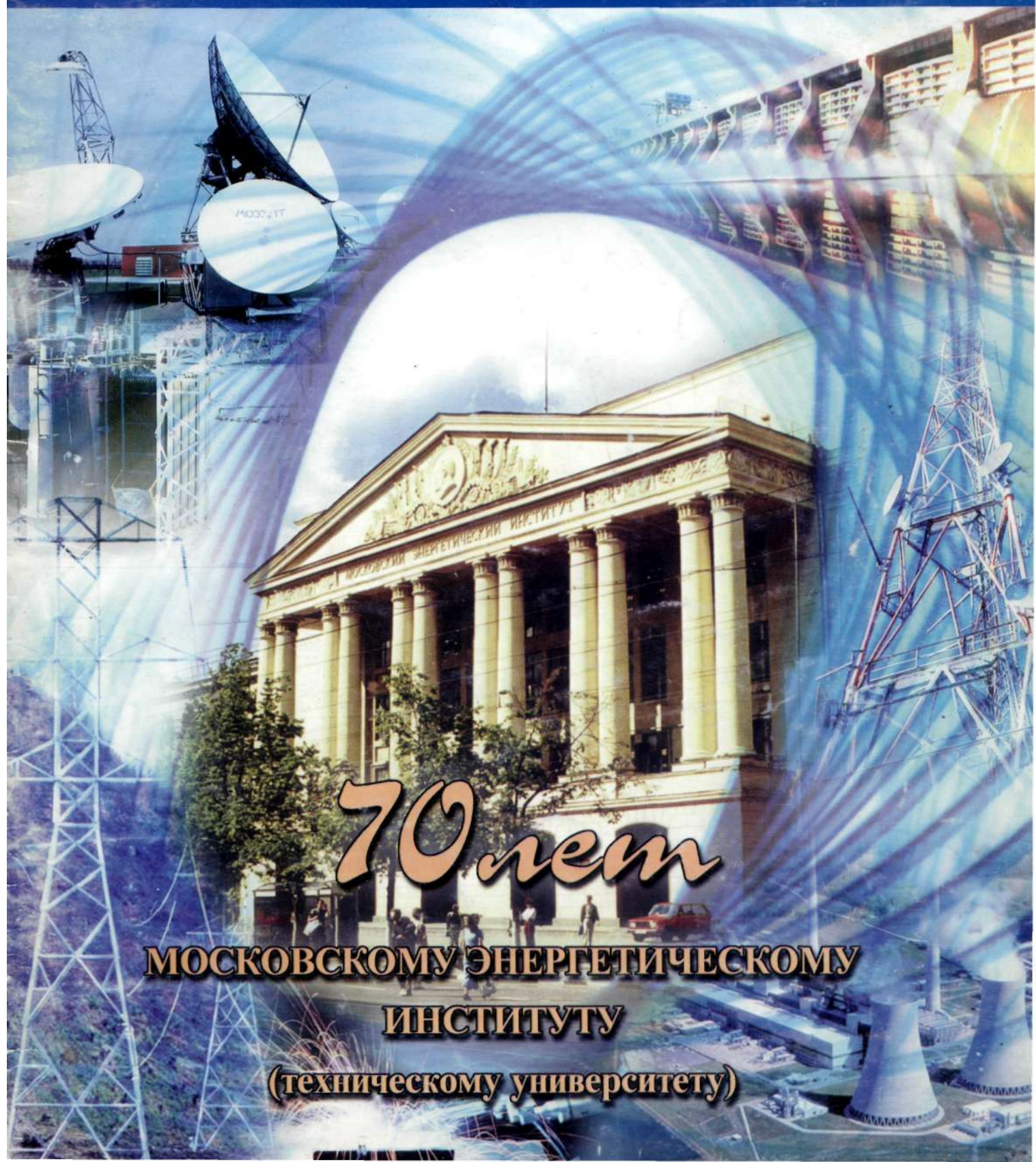


# ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

2002  
5



**70 лет**

**МОСКОВСКОМУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ  
ИНСТИТУТУ**

**(техническому университету)**





## ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

### Энергоэкологическая оптимизация сжигания топлива в котлах и печах регулированием соотношения топливо – воздух

Новиков О. Н., Артамонов Д. Г., кандидаты техн. наук  
НПФ “Уран”, Санкт-Петербург

Шкаровский А. Л., доктор техн. наук, Кочергин М. А., инж.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Окатьев А. Н., инж.

Санкт-Петербургский государственный технический университет

Практически любая промышленная и бытовая деятельность человека связана с потреблением топлива, а именно — с его сжиганием. Предприятия промышленности, энергетики, автомобильный транспорт и другая техника, используя энергию топлива, выбрасывают в воздушный бассейн продукты сгорания, содержащие десятки высокотоксичных химических соединений. В атмосфере многие из них включаются в естественные процессы трансформации, оказывающие заметное влияние на общий уровень загрязненности воздушного бассейна. Объемы выбросов вредных веществ связаны с качеством и количеством сжигаемого топлива, а также с эффективностью его использования.

Проблемы повышения эффективности использования топлива и уменьшения выбросов вредных веществ особенно актуальны в тех отраслях промышленности, где сжигание больших количеств топлива происходит с недостаточной полнотой и относительно низким к. п. д. К этой группе потребителей следует отнести прежде всего котельные коммунально-бытового сектора и промышленных предприятий с котлами мощностью от 2 до 20 МВт.

Главной проблемой в области совершенствования сжигания топлива является необходимость одновременного решения сложных и часто взаимоисключающих задач повышения экономичности его сжигания и уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу. В современной научно-технической терминологии одновременное решение этих задач формулируется как энергоэкологическая оптимизация сжигания топлива.

Основными вредными веществами, образующимися при сжигании органического топлива, являются оксиды азота, углерода и серы, сажа, канцерогенные вещества. С учетом токсичности и объемов выбросов вклад оксидов азота  $NO_x$  в загрязнение атмосферного воздуха городов при сжигании топлива можно оценить в 30–35 %, затем следуют  $SO_2$ ,  $CO$ , твердые частицы и другие вредные вещества, т. е. количество выбросов  $NO_x$  определяет уровень экологического совершенства котельного оборудования, особенно при сжигании газового топлива. Теория образования оксидов азота в пламени горящего топлива находится в непрерывном развитии, но в настоящее время можно выделить три основных механизма образования  $NO_x$ : термический, быстрый и топливный. При факельном сжигании природного газа в топках котлов образование оксида азота протекает по термическому и быстрому механизмам. При сжигании мазута к термическим и быстрым  $NO_x$  могут добавиться топливные (в зависимости от содержания азота в топливе).

Снижение интенсивности образования термических  $NO_x$  можно обеспечить уменьшением максимальной температуры горения и концентрации свободного кислорода в реакционной зоне. Выход топливных  $NO_x$  слабо зависит от температуры, но сильно — от избытка воздуха. Эти факты в значительной мере определяют логику авторов статьи в подходе к проблеме энергоэкологической оптимизации сжигания топлива. Можно выделить несколько направлений такой оптимизации:

автоматизация работы котла;

технологическое направление: режимные мероприятия, различные варианты ступенчатого сжигания топлива, рециркуляция дымовых газов и другие мероприятия, которые активно внедряются в последние годы на пылеугольных и газомазутных котлах;

конструктивное направление: совершенствование узлов котлоагрегата, топочных и горелочных устройств;

очистка продуктов сгорания, невыгодная с точки зрения энергетических затрат, но необходимая в некоторых случаях;

утилизация теплоты отходящих газов и снижение теплотеря.

Характерной особенностью внедрения энергосберегающих и природоохраных технологий на котлах малой и средней мощности является жесткое их ограничение по капитальным затратам. В соответствии с этим целесообразны решения, предусматривающие не замену существующего оборудования новым, а максимально возможное его использование при условии достижения современных показателей по эффективности сжигания топлива и охране воздушного бассейна. Один из авторов статьи назвал данное направление научно-технических разработок и исследований энергоэкологической реабилитацией действующего теплотехнического оборудования.

Почти все мероприятия по очистке выбросов, утилизации теплоты отходящих газов и конструктивному совершенствованию топочно-горелочного оборудования должны предусматриваться еще на стадии проектирования, что не соответствует принципам энергоэкологической реабилитации действующего теплотехнического оборудования. Исключение составляют только небольшие усовершенствования некоторых узлов горелочного устройства в ходе внедрения какого-либо технологического метода.

Наиболее перспективным направлением энергоэкологической оптимизации оборудования авторы считают технологическое, ориентированное на причины и механизмы образования вредных веществ. Ряд технологий позволяет добиться наибольшего эффекта при весьма ограниченных капиталовложениях с помощью автоматизации управления сжиганием топлива.

С учетом состояния действующего парка отопительных котельных, имеющих физически и морально устаревшие, но работоспособные системы автоматики регулирования, составной частью или начальным шагом комплексного решения может быть усовершенствование штатных систем автоматики.

На сегодняшний день большинство отопительных котельных Санкт-Петербурга и Ленинградской области работают по режимным картам, согласно которым расход подаваемого на горение воздуха

не зависит от изменения характеристик топлива и состояния оборудования. Системы автоматики не оборудованы приборами контроля состава отходящих газов, а котлы нередко работают с ручным регулированием подачи топлива и воздуха на горение. При составлении режимной карты сознательно увеличивают расход воздуха, подаваемого на горение, для исключения химического недожога, вызываемого изменением теплоты сгорания топлива, температуры воздуха или иными причинами. В процессе эксплуатации оператор визуально определяет качество горения, в результате чего расход воздуха может увеличиться еще больше. Все это ведет к перерасходу топлива и повышенному выбросу загрязняющих веществ в атмосферу.

Приблизить работу котла к показателям режимно-наладочной карты можно, имея информацию о содержании свободного кислорода в уходящих газах. Такую информацию обеспечивает интеллектуальный анализатор качества горения ИАГ-1, разработанный фирмой "Уран". Он включает в себя анализатор кислорода, датчики температуры дымовых газов и воздуха и многоканальный микропроцессорный самописец, рассчитывающий и регистрирующий основные параметры сжигания топлива. Кроме поддержания режима согласно наладочной карте, данный анализатор позволяет оператору своевременно обнаружить серьезные неисправности в газовоздушном тракте технологического оборудования по расхождению параметров — заданных в режимной карте и рассчитанных анализатором. Возможность оперативного контроля технического состояния котла позволяет существенно повысить эффективность, надежность и экономичность работы теплогенерирующей установки.

Следующим логичным этапом энергоэкологической оптимизации сжигания топлива является внедрение технологических решений, направленных на организацию горения с низким или предельно низким коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ . Это — наиболее малозатратный и эффективный способ уменьшения образования вредных веществ в топке с одновременной экономией топлива. При этом необходимо поддерживать подачу воздуха так, чтобы значение коэффициента  $\alpha$  находилось в довольно узкой области, нижнюю границу которой определяет появление следов оксида углерода (на уровне 50–200 ppm), а верхнюю — рост потерь теплоты с уходящими газами и повышение интенсивности образования оксидов азота, сопутствующее росту концентрации свободного кислорода (рис. 1).

К проблемам применения данного способа стоит отнести сложность получения высококачественной топливо-воздушной смеси для исключения химического недожога. Особенно это важно при небольших нагрузках котла, когда в целях регулирования расхода давление воздуха снижают до



критического значения, при котором горелочное устройство не может обеспечить аэродинамические условия интенсивного смесеобразования в корне факела. Это может вызывать увеличение потерь теплоты от химического недожога топлива и снижение экологичности работы котлоагрегата вследствие выбросов высокотоксичного оксида углерода. Для избежания подобных ситуаций при наладке идут на увеличение расхода воздуха, что в свою очередь ведет к возрастанию потерь теплоты с уходящими газами.

Основной причиной, ограничивающей сжигание топлива с предельно низким коэффициентом избытка воздуха, является сложность поддержания оптимального соотношения топливо – воздух на границе возникновения химического недожога. Обеспечить это можно только на базе микропроцессорных систем регулирования, для организации работы которых в свою очередь необходима оперативная информация о составе уходящих газов.

Таким образом, высокой эффективности внедрения метода сжигания с низким и предельно низким значениями  $\alpha$  можно достичь даже на существующем газогорелочном оборудовании, но только при использовании систем непрерывного контроля и регулирования соотношения топливо – окислитель. Это требует разработки надежных, легких в управлении и быстро окупающихся систем регулирования подачи воздуха в топку котла. Известные системы такого типа можно классифицировать в соответствии с применяемыми корректирующими сигналами. В системах, получивших наибольшее распространение на мощных котлах энергетического назначения, в качестве корректирующего используется сигнал по содержанию свободного кислорода в дымовых газах. Однако результаты работы данных систем позволяют сделать вывод о недостаточной представительности такого корректирующего сигнала для условий отопительных и производственно-отопительных котлов, работающих в условиях часто и резко меняющихся нагрузок. Анализ других известных схем автоматического регулирования на соответствие их отмеченным выше требованиям показывает, что ни одна из них не отвечает принципам энергоэкологической оптимизации сжигания топлива.

Принципиально новый подход к решению рассматриваемой проблемы заложен в концепции систем автоматического регулирования семейства “Факел”, разработанных фирмой “Уран”. Этот подход базируется на утверждении, что для получения оптимального регулирующего воздействия необходимо иметь информацию о содержании как свободного кислорода  $O_2$ , так и продуктов химического недожога  $CO + H_2 + CH_4$  в дымовых газах, сумму концентрации которых удобно представлять в виде эквивалентной концентрации оксида угле-

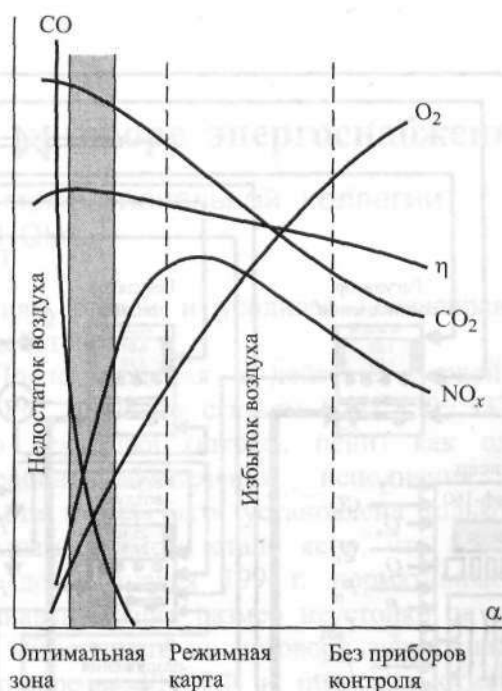


Рис. 1. Зависимости содержания основных компонентов продуктов сгорания и к. п. д. котлоагрегата  $\eta$  от коэффициента избытка воздуха

рода  $(CO)_{экв}$ . Диапазон измерения по  $O_2$  составляет  $0 \div 10\%$ , по  $(CO)_{экв}$  —  $0 \div 2000$  ppm.

Только имея комплексную информацию о содержании  $O_2$  и  $CO$  в продуктах сгорания, можно добиться экологически чистого и экономичного сжигания топлива с учетом технологического изменения нагрузки, состава топлива, температуры топлива и воздуха, климатических параметров и других условий, определяющих процесс горения. Для реализации этого разработана проектно компонованная система “Факел-1”, включающая анализаторы  $O_2$  и  $CO$  в дымовых газах, быстродействующий микропроцессорный регулятор и интеллектуальный регистрирующий прибор.

Завершающий этап оптимизации горения — создание автоматизированной системы управления топливосжигающим агрегатом, что было реализовано на котлоагрегате в системе “Факел-2000” (рис. 2). Для этого вслед за внедрением системы “Факел-1” потребовалось реконструировать типовую схему автоматики. Так, на котлах со щитами автоматики Щ-К2М нужно было заменить устаревшие и снятые с производства регуляторы типа Р. 25 (регулирование расходов топлива и воздуха, разрежения в топке и уровня воды в барабане котла) микропроцессорными регуляторами типа “Минитерм-400” Московского завода тепловой автоматики. Это дает возможность включения сигналов в кольцо интерфейсного обмена информации с выходом на управляющий персональный компьютер.

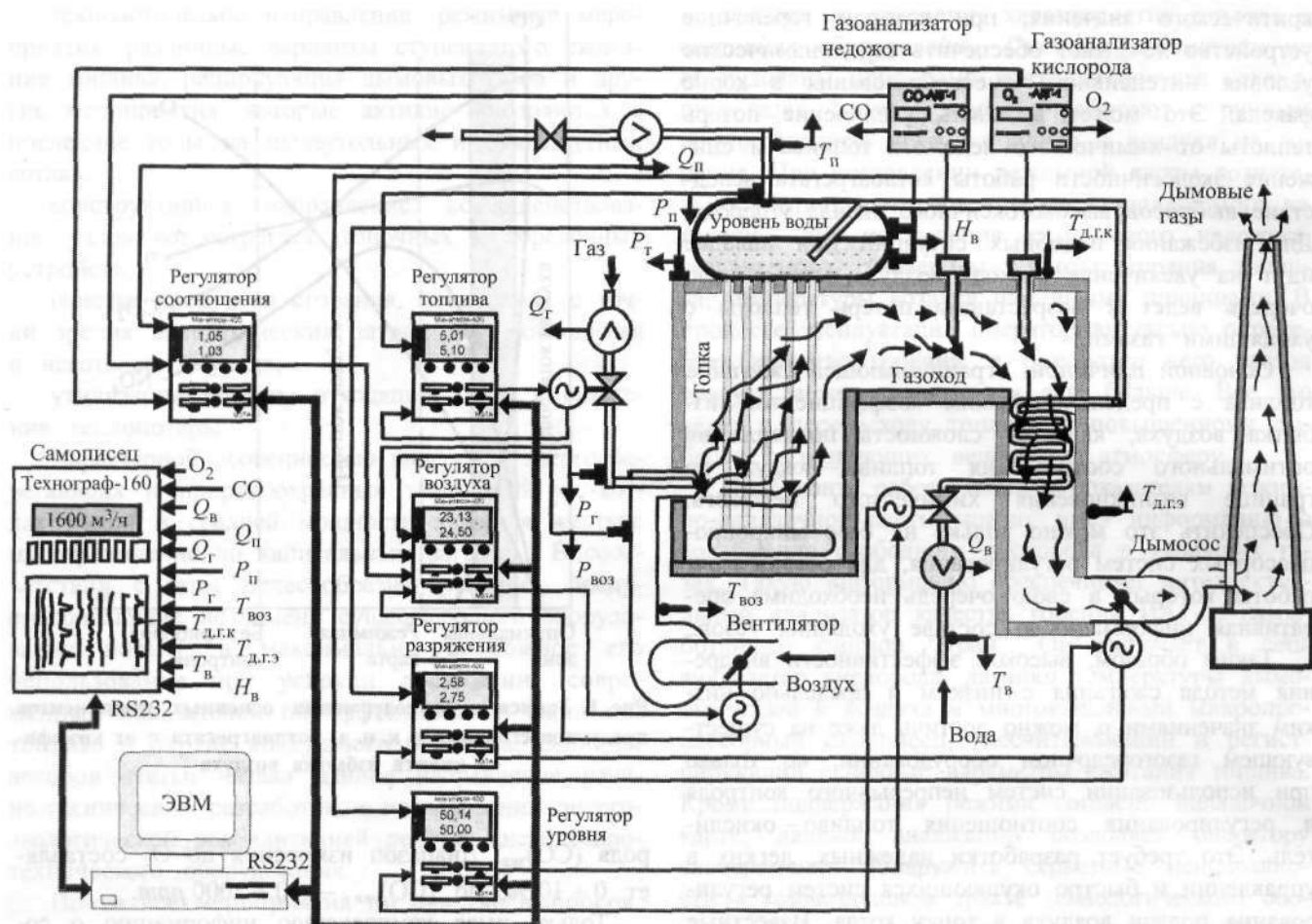


Рис. 2. Схема автоматизированной системы контроля и регулирования котлоагрегата "Факел-2000":

$Q_v$  и  $T_v$  — расход и температура воды;  $Q_{п}$ ,  $P_{п}$ ,  $T_{п}$  и  $Q_{г}$ ,  $P_{г}$ ,  $T_{г}$  — расход, давление, температура пара и газа;  $P_{воз}$  и  $T_{воз}$  — давление и температура воздуха;  $P_{т}$  — разрежение в топке;  $H_v$  — уровень воды в котле;  $T_{д.г.к}$  и  $T_{д.г.э}$  — температуры дымовых газов после котла и экономайзера

Автоматическую коррекцию соотношения топливо-воздух осуществляет дополнительно установленный регулятор, который получает сигналы от анализаторов остаточного кислорода и продуктов химического недожога в дымовых газах. Датчики кислорода и оксида углерода устанавливаются непосредственно в газоход за котлом на пробоотборные зонды в наиболее представительных точках. Выход этого регулятора соединяется с третьим входом регулятора воздуха, осуществлявшего в прежней системе "грубое" регулирование подачи воздуха по сигналам от датчиков давления топлива и воздуха. Микропроцессорные регуляторы и многоканальный микропроцессорный самописец "Технограф-160" Челябинского завода "Теплоприбор" объединены в систему регулирования с выходом на персональный компьютер.

Данная система регулирования позволяет реализовать общую концепцию энергосберегающей работы котлоагрегатов в непрерывном режиме;

экономить до 6–10% топлива в течение года; сократить, на 30–40% выбросы оксидов азота в атмосферу;

уменьшить на 20–35% потребление электроэнергии вентиляторами и дымососами;

повысить надежность работы теплотехнического и механического оборудования за счет диагностики и контроля работы газозвушных трактов, датчиков, исполнительных механизмов и др.

По результатам анализа полная окупаемость затрат на внедрение систем "Факел-1" и "Факел-2000" достигается за 4–12 мес. Системы автоматического контроля и управления экономичным сжиганием топлива семейства "Факел" выполнены на современном техническом уровне с использованием отечественной элементной базы. Они экспонировались на международных выставках "Энергетика и электротехника" в 1997–1999 гг. в Санкт-Петербурге и вызвали большой интерес специалистов.