

В. И. НИКОЛАЕВ, В. П. ЛЕЙНИ, Н. Д. СЕРЕБРЯННИКОВ

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУКОКСОВАНИЯ СЛАНЦА В 1000-ТОННОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ

Процесс полукоксования сланца в газогенераторах\* протекает за счет физического тепла газов, поступающих из газификатора, и газового теплоносителя, приготовляемого в топках горячего простенка агрегата. Если газификация полукокса не применяется, как в 1000-тонном и некоторых других газогенераторах в ПО «Сланцехим» и на других заводах, то все требующееся для полукоксования тепло получают за счет сжигания части собственного генераторного газа с воздухом. Возможно использование для этой цели какого-либо иного топлива, например смолы, а также применение кислорода для повышения теплоты сгорания газа. Во избежание пиролиза образующейся смолы — целевого продукта полукоксования — продукты сгорания охлаждаются обратным газом. За счет этого увеличивается и количество теплоносителя, что повышает передачу тепла сланцу и интенсифицирует процесс.

Считается, что теплопередача от газового теплоносителя к кусковому твердому материалу зависит от температуры и количества (скорости) теплоносителя следующим образом:

$$\alpha = f(W^{0,9} T^{0,3}).$$

Как видно из графика, иллюстрирующего эту зависимость в пределах параметров реального процесса (рис. 1), даже существенные изменения температуры теплоносителя мало влияют на коэффициент теплопередачи, повышение же температуры процесса полукоксования способствует росту потерь тепла на протекающие с горячей стороны шахты эндотермические реакции, в том числе на более глубокое разложение карбонатов. Естественно поэтому стремление специалистов снижать температуру теплоносителя, увеличивая его количество, т. е. больше разбавлять продукты горения обратным газом.

Из опыта работы туннельных печей известно, что при высокой скорости пронизывающего слой сланца теплоносителя и небольшой разнице между его температурой и температурой нагреваемого сланца выход смолы в промышленных условиях приближался к лабораторному, т. е. был в 1,2—1,3 раза выше, чем при переработке сланца в газогенераторах. Однако снижению температуры теплоносителя в газогенераторах современных конструкций препятствуют два фактора: увеличение уноса частиц сланца и полукокса парогазовой смесью при высокой скорости теплоносителя и опасность срыва факела горения генераторного газа при температуре 650°C и ниже. Оба эти явления изучены недостаточно, поэтому при эксплуатации газогенераторов температуру теплоносителя обычно поддерживают на уровне 800 и даже 900°C.

\* Напомним, что название «газогенератор» сохранилось по традиции. Современные сланцевые газогенераторы представляют собой печи для полукоксования с частичной газификацией полукокса или без нее.

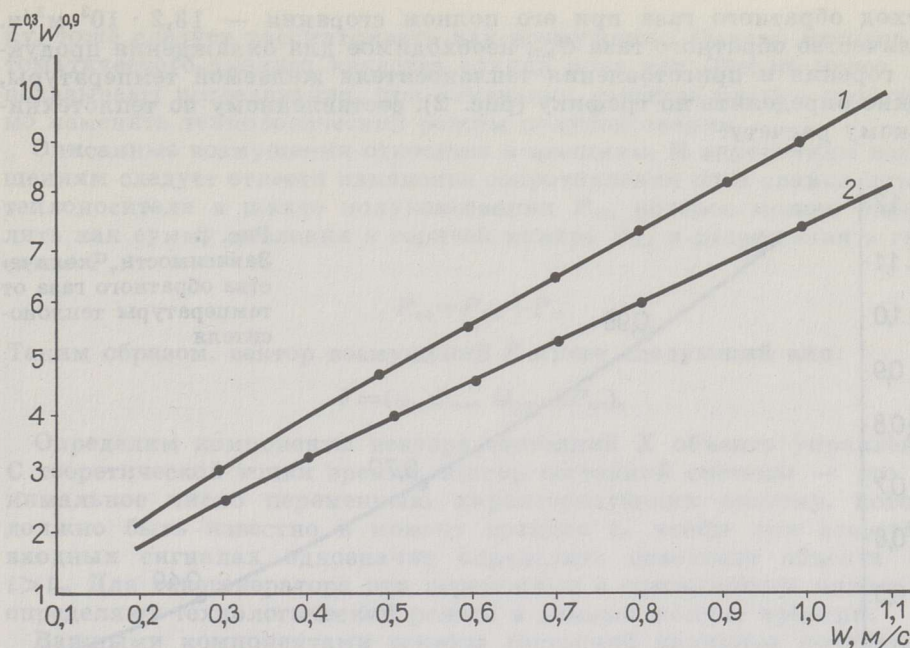


Рис. 1  
Зависимость  $T^{0,3}W^{0,9}$  от  $W$  при  $T$ , равной 1400 К (1) и 800 К (2)

Рассматривая проблемы регулирования режима работы газогенератора, невозможно обойти вопрос о том, сколько тепла требуется для процесса полукоксования теоретически и сколько — в реальных условиях работы данного газогенератора. Однозначного ответа пока нет, имеющиеся сведения, как теоретические, так и практические, довольно разноречивы. По данным работ [1—3], для полукоксования сланца тепла требуется от 630 до 780 кДж/кг. В действующих газогенераторах его расход, по сведениям различных авторов, составляет от 1000 до 1400 кДж/кг. Поэтому при составлении программы управления процессом мы исходили из произвольного расхода тепла, выбранного в указанных пределах, рассчитывая затем опытным путем подойти к оптимальному значению.

В ходе освоения технологии 1000-тонного газогенератора была разработана система автоматического управления процессом, которая функционирует в составе действующей уже длительное время автоматизированной системы управления технологическим процессом производства сланцевой смолы на газогенераторной станции № 5, оборудованной 200-тонными газогенераторами.

В качестве топлива для 1000-тонного газогенератора используется его собственный газогенераторный газ следующего состава, %, объемная доля: ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$ ) 16—17,  $\text{C}_m\text{H}_n$  0,8—1,  $\text{O}_2$  0,5—0,7,  $\text{H}_2$  6—7,  $\text{N}_2$  68—69,  $\text{CO}$  4,7—4,9,  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$  2,5—2,7. Газ содержит около 25 г/м<sup>3</sup> газового бензина, некоторое количество легкого генераторной смолы и насыщен водяным паром при 50°C. Теплота сгорания сухого газа  $Q^H$  равна 2,8—2,9 МДж/м<sup>3</sup>. Для упрощения расчетов с известной долей условности будем считать, что один кубометр воздуха, поданный в топочное устройство газогенератора, дает 4,2 МДж тепла. Тогда в качестве задания для системы регулирования примем удельный расход воздуха в 300 м<sup>3</sup> на 1 т загруженного в газогенератор сланца. При номинальной производительности газогенератора по сланцу 1000 т/сут, или 41,6 т/ч, расход воздуха составит  $12,5 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup>/ч, а



расход обратного газа при его полном сгорании —  $13,2 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Количество обратного газа  $G_{o.r.}$ , необходимое для охлаждения продуктов горения и приготовления теплоносителя желаемой температуры, можно определить по графику (рис. 2), составленному по теплотехническому расчету.

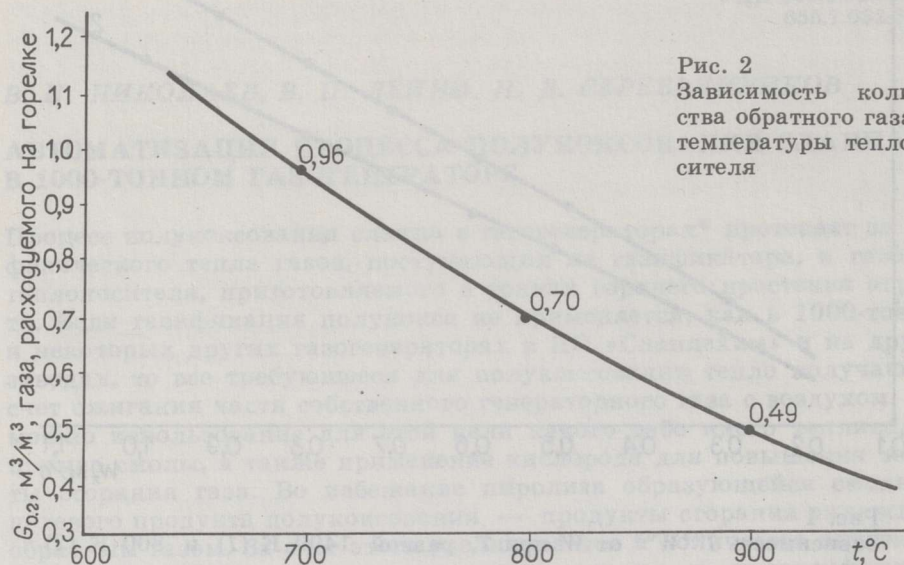


Рис. 2  
Зависимость количества обратного газа от температуры теплоносителя

Если возмущения отсутствуют, технологический режим работы газогенератора можно представить следующим образом. Равномерное пропускание через каждую шахту полукоксования 500 т/сут сланца обеспечивается выгрузкой каждым экстрактором соответствующего количества полукокса. В топочные устройства так же равномерно подаются указанные количества газа и воздуха, и к продуктам горения подмешивается обратный газ. Однако в реальных условиях промышленного производства установленный режим работы подвергается воздействию возмущений, вызванных различными причинами. Для предупреждения и устранения возмущений, а также минимизации их нежелательных последствий и требуется система управления.

Постановку задачи управления начнем с выбора и описания его информационной структуры. Определим вектор возмущений  $F$ , вектор управлений  $U$ , вектор состояний  $X$  и вектор выходов продуктов  $Y$ . В качестве компонент вектора возмущений выберем из действующих на объект те возмущения, которые можно измерять и учитывать в процессе управления. Одно из основных возмущающих воздействий — периодические простои устройств выгрузки и транспортирования в отвал полукокса. Обозначим это возмущение, имеющее ступенчатый и периодический характер, через  $\omega$ . Если  $\omega=1$ , то устройства золоудаления работают, а если  $\omega=0$ , то удаления полукокса не происходит и режим полукоксования нарушается — полукокк перегревается. Во избежание этого необходимо заблаговременно снижать подачу теплоносителя.

Другое возмущение режима — это изменение давления генераторного газа во внешней сети, характеризующее степень утилизации газа. Его можно контролировать через давление обратного газа  $P_{o.r.}$ , поступающего в газогенератор. При ограничении поступления газа в котлы-утилизаторы приходится снижать производительность газогенератора. Изменение теплоты сгорания сланца  $Q_{сл}$ , поступающего на переработ-



ку, тоже следует рассматривать как возмущение. Однако методов автоматического анализа качества сланца пока нет. Тем не менее, как показывают исследования, при изменении качества сланца необходимо изменять технологический режим полукоксования.

Описанные возмущения относятся к внешним. К внутренним возмущениям следует отнести изменение сопротивления слоя сланца потоку теплоносителя в шахте полукоксования  $P_{сл}$ , которое можно определить как сумму давления в горячей камере  $P_{г.к}$  и разрежения в газосливе  $P_{г}$ :

$$P_{сл} = P_{г.к} + P_{г}$$

Таким образом, вектор возмущений  $F$  имеет следующий вид:

$$F = (\omega, P_{о.г}, Q_{сл}, \Delta P_{сл}).$$

Определим компоненты вектора состояний  $X$  объекта управления. С теоретической точки зрения, вектор состояний системы — это минимальное число переменных, характеризующих систему, которое должно быть известно в момент времени  $t_0$ , чтобы при известных входных сигналах однозначно определить поведение объекта при  $t > t_0$ . Для газогенератора эти переменные в совокупности полностью определяют технологический режим в данный момент времени.

Важными компонентами вектора состояний являются показатели, характеризующие нагрузку газогенератора по теплоносителю  $G_T$  и, следовательно, определяющие температурный режим полукоксования сланца, от которого в основном зависит технический выход смолы  $S$ . Такими показателями являются температура теплоносителя  $T_T$  и удельный расход воздуха на процесс  $\alpha_B$ .  $\alpha_B = G_B / G_{сл}$  где  $G_B$  — расход воздуха в газогенератор,  $G_{сл}$  — расход сланца. В совокупности эти два показателя определяют количество теплоносителя.

Состояние газового режима характеризуют также расходы парогазовой смеси через левый и правый газосливы  $G_T^л$  и  $G_T^п$ .

Вектор состояний  $X$  газогенератора составляют в итоге следующие компоненты:

$$X = (\alpha_B, T_T, G_T^л, G_T^п).$$

Компонентами вектора управлений являются те входные переменные объекты управления, с помощью которых можно воздействовать на определенные переменные состояния или на группы этих переменных. Ниже определены управляющие воздействия для газогенератора.

— Число загрузок сланца в правую и левую шахты полукоксования  $n^п$  и  $n^л$ . С помощью этих величин можно задавать и поддерживать заданный расход сланца  $G_{сл}$ .

— Расход воздуха на горение  $G_B$ . С помощью этой переменной, а также переменных  $n^п$  и  $n^л$  можно регулировать удельный расход воздуха на процесс  $\alpha_B$ .

— Расход газа на горение и подмешивание  $G_B$ . Этой переменной можно регулировать температуру теплоносителя  $T_T$ .

— Разрежение в правом и левом газосливах  $P_T^п$  и  $P_T^л$ . С помощью этих величин можно регулировать переменные состояния  $G_T^п$  и  $G_T^л$ .

Теперь можно записать вектор управления в явном виде:

$$U = (n^п, n^л, G_B, G_T, P_T^п, P_T^л).$$

Вектор выходов  $Y$  объекта управления включает величины, характеризующие выходы основных и побочных продуктов полукоксования сланца. Непосредственное измерение выхода основного продукта (сланцевой смолы)  $G_{см}$  связано с трудностями, но полностью не ис-



ключается, учитывая возрастающие возможности современной измерительной техники. Пока же используется усредненное за определенный период времени (чаще всего за сутки) значение  $G_{см}$ . К побочным продуктам процесса переработки сланца в газогенераторе относятся генераторный газ и фенольная вода. Измерение их количеств  $G_{г.г}$  и  $G_{ф.в}$  проще.

Цель управления процессом переработки сланца в газогенераторе — это определение и стабилизация такого технологического режима, при котором достигался бы экстремум заданного критерия управления. Обычно в качестве такого критерия используются выработку целевого продукта — в нашем случае  $G_{см}$ . Цель достигается использованием реализуемой на ЭВМ системы оптимального управления с применением математических методов поиска экстремума.

Опыт разработки и применения систем управления технологией как в нашей стране, так и за рубежом показал, что желаемый эффект в большинстве случаев удается получить путем стабилизации технологического режима работы аппарата и организации логического управления с учетом известных взаимосвязей переменных состояний. Такой подход использован и для 1000-тонного газогенератора. Разработана и внедрена в производство система, содержащая ряд взаимосвязанных контуров регулирования и стабилизации переменных состояния газогенератора с учетом внутренних и внешних возмущений, а также основных закономерностей процесса полукоксования сланца. Часть контуров регулирования реализована на основе ЭВМ, часть — на базе серийно выпускаемых контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации.

Для 200-тонных газогенераторов ГГС-5 применен другой принцип управления. Расход воздуха на горелки и дутье устанавливается в зависимости от разрежения в газосливе, а расход сланца — в зависимости от расхода воздуха. Расход сланца является регулируемой величиной для температуры в газосливе. Принцип управления, примененный для 1000-тонного газогенератора, представляется более совершенным, но поскольку в ГГС-5 утилизация генераторного газа ограничена, регулирование расхода воздуха и сланца в зависимости от отбора газа в этом случае пока целесообразно.

Принцип управления 1000-тонным газогенератором заключается в том, что задается и стабилизируется подача сланца в газогенератор, а необходимое количество тепла, определяемое расходом воздуха, достигается в зависимости от расхода сланца. Одновременно, путем регулирования отдельных параметров, стабилизируется температурный и газовый режим. Новым в системе регулирования является и то, что ЭВМ решает задачу управления газогенератором в условиях перерывов в удалении полукокса, возникающих в результате производственных неполадок.

Регулирование загрузки агрегата сланцем в заданном количестве с равномерным распределением его по обеим шахтам полукоксования осуществляется с помощью ЭВМ. Газогенератор оборудован четырьмя загрузочными устройствами, по два на каждую шахту. Загрузочное устройство включается при помощи штанги уровнемера, которая воздействует на гидравлический привод при понижении уровня сланца в шахте полукоксования. Выходной сигнал ЭВМ с помощью технических средств, как схематически показано на рис. 3, подается на регулятор скорости работы экстракторов полукокса. Тем самым регулируется число загрузок  $n$  — поступления фиксированных порций сланца в каждую из шахт за единицу времени.

Определение числа загрузок в текущий момент времени довольно сложно. ЭВМ опрашивает датчики о числе загрузок в дискретные моменты времени ( $k, k+1, k+2$ ) с периодом дискретности  $T$ . Если за

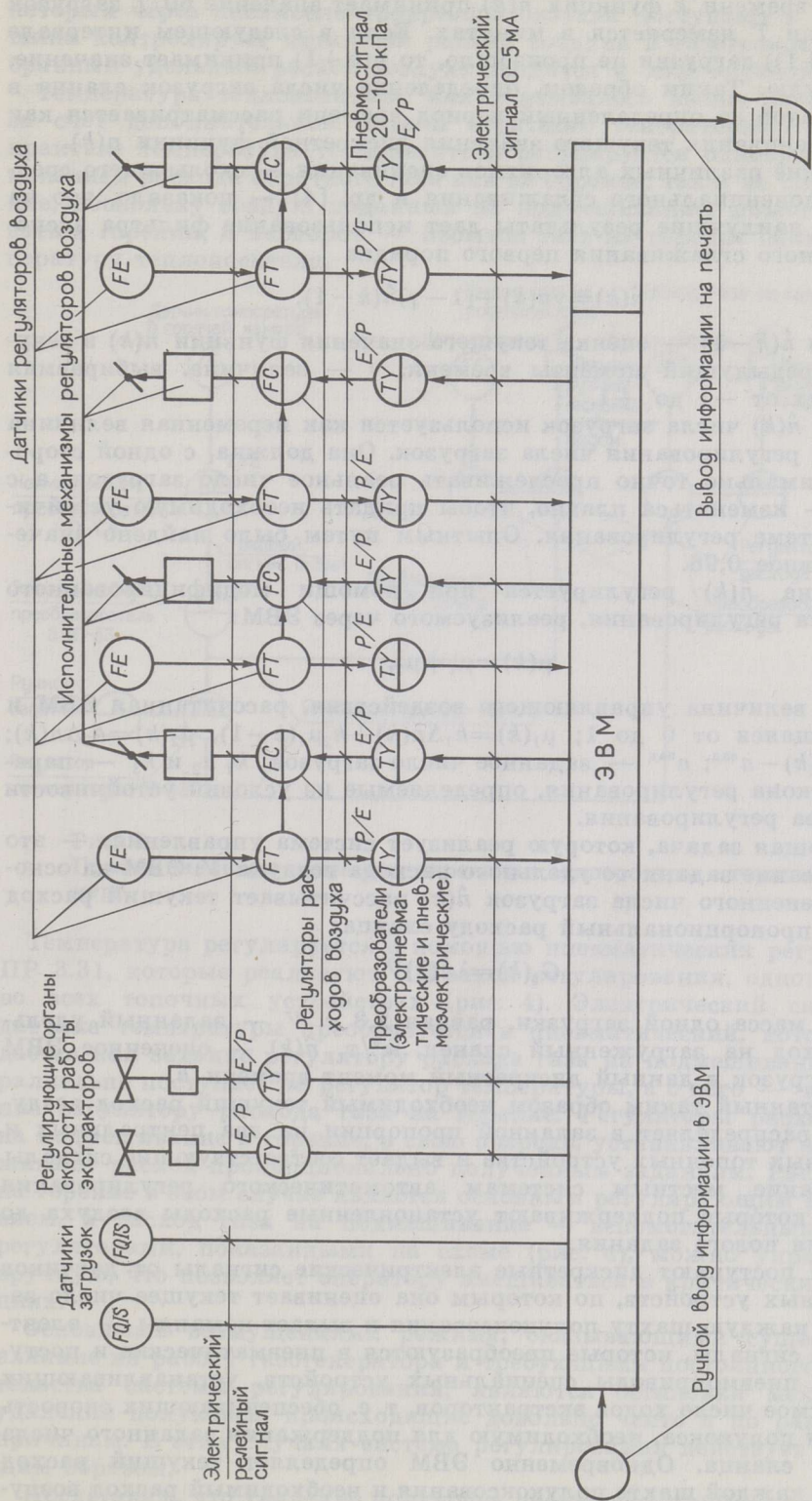


Рис. 3  
 Функциональная схема технической реализации регулирования производительности газогенератора и удельного расхода воздуха



период времени  $T=(k-1, k)$  загрузка произошла, то считается, что в момент времени  $k$  функция  $n(k)$  принимает значение  $60/T$  загрузок в час, если  $T$  измеряется в минутах. Если в следующем интервале ( $T=(k, k+1)$ ) загрузки не произошло, то  $n(k+1)$  принимает значение, равное нулю. Таким образом, определение числа загрузок сланца в газогенератор за определенный период времени рассматривается как задача оценивания текущего значения дискретной функции  $n(k)$ .

Сравнение различных алгоритмов оценивания — скользящего среднего, экспоненциального сглаживания и др. [4] — показало, что на практике наилучшие результаты дает использование фильтра экспоненциального сглаживания первого порядка

$$\hat{n}(k) = \gamma n(k) + (1 - \gamma)\hat{n}(k-1),$$

где  $\hat{n}(k)$  и  $\hat{n}(k-1)$  — оценка текущего значения функции  $n(k)$  в текущий и предыдущий моменты времени,  $\gamma$  — величина, выбираемая в пределах от  $-1$  до  $+1$ .

Оценка  $\hat{n}(k)$  числа загрузок используется как переменная величина в системе регулирования числа загрузок. Она должна, с одной стороны, максимально точно проследживать реальное число загрузок, а с другой — изменяться плавно, чтобы придать необходимую устойчивость системе регулирования. Опытным путем было найдено значение  $\gamma$ , равное  $0,96$ .

Величина  $\hat{n}(k)$  регулируется при помощи модифицированного ПИ-закона регулирования, реализуемого через ЭВМ:

$$\mu(k) = \mu_1 + \mu_2,$$

где  $\mu$  — величина управляющего воздействия, рассчитанная ЭВМ и изменяющаяся от  $0$  до  $1$ ;  $\mu_1(k) = k_1 \Delta n(k) + k_2 \mu_1(k-1)$ ,  $\mu_2(k) = k_3 \Delta n(k)$ ;  $\Delta n(k) = n(k) - n^{\text{зад}}$ ;  $n^{\text{зад}}$  — заданное число загрузок;  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  — параметры закона регулирования, определяемые из условий устойчивости и качества регулирования.

Следующая задача, которую реализует система управления, — это регулирование заданного удельного расхода воздуха  $V$ . ЭВМ на основании оцененного числа загрузок  $\hat{n}(k)$  рассчитывает текущий расход воздуха, пропорциональный расходу сланца:

$$G_B(k) = \lambda \hat{n}(k) V,$$

где  $\lambda$  — масса одной загрузки, равная  $2,3$  т,  $V$  — заданный удельный расход на загруженный сланец,  $\text{м}^3/\text{т}$ ,  $\hat{n}(k)$  — оцененное ЭВМ число загрузок в данный дискретный момент времени  $k$ .

Рассчитанный таким образом необходимый текущий расход воздуха ЭВМ распределяет в заданной пропорции на два центральных и два боковых топочных устройства и выдает соответствующие сигналы как задание местным системам автоматического регулирования (рис. 3), которые поддерживают установленные расходы воздуха до получения нового задания.

В ЭВМ поступают дискретные электрические сигналы от датчиков загрузочных устройств, по которым она оценивает текущее число загрузок в каждую шахту полукоксования и выдает команды — электрические сигналы, которые преобразуются в пневматические и поступают на пневмоприводы специальных устройств, устанавливающих необходимое число ходов экстракторов, т. е. обеспечивающих скорость выгрузки полукокса, необходимую для поддержания заданного числа загрузок сланца. Одновременно ЭВМ определяет текущий расход сланца в каждой шахте полукоксования и необходимый расход воздуха в каждое топочное устройство. Далее, через электропневмообразователь ЭВМ выдает задания локальным системам автоматического



регулирования расходов воздуха. Через датчики расходов, сигналы которых через пневмоэлектропреобразователи поступают в ЭВМ, машина контролирует истинный расход воздуха в газогенераторе. Выбранный удельный расход воздуха вводится в ЭВМ вручную.

Температура теплоносителя, как указывалось выше, регулируется за счет дополнительной подачи обратного генераторного газа. На практике температура теплоносителя регулируется одновременно изменением расхода обратного газа как на горение, так и на подмешивание, поскольку воздух, поданный на подмешивание, может участвовать в горении, и наоборот — избыток газа на горение снижает температуру теплоносителя.

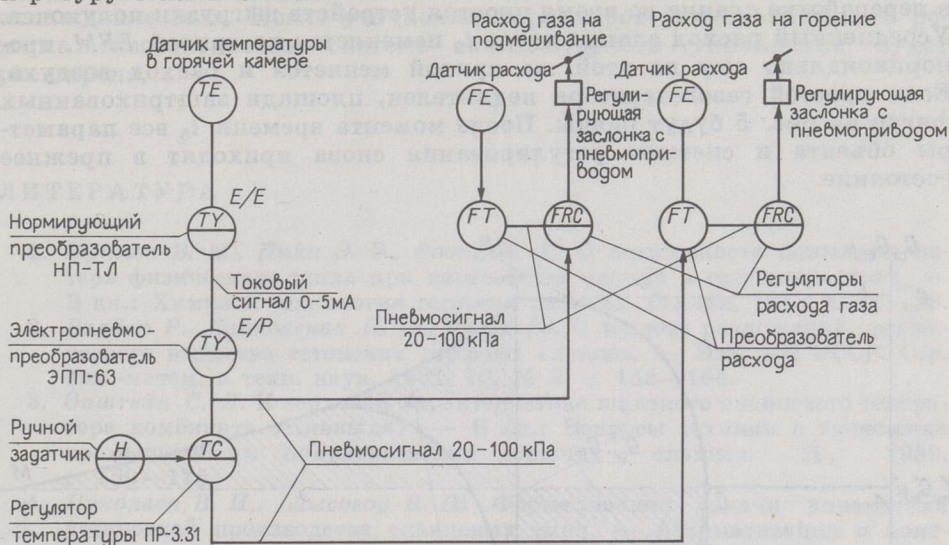


Рис. 4  
Принципиальная схема регулирования температуры в горячей камере

Температура регулируется с помощью пневматических регуляторов ПР 3.31, которые реализуют ПИ-закон регулирования, одновременно во всех топочных устройствах (рис. 4). Электрический сигнал от датчика температуры преобразуется в пневматический, который подается как задание регулятору расхода газа на подмешивание, и параллельно поступает на регулятор температуры, а с него — как задание регулятору расхода газа на горение. Регуляторы расхода газа на подмешивание и горение, в свою очередь, устанавливают и поддерживают расход пропорционально полученным заданиям. Расход газа на горение в этом случае является основным регулирующим воздействием, а расход газа на подмешивание — вспомогательным. Всеми регуляторами, показанными на схеме (рис. 4), можно управлять и вручную, что позволяет оператору вмешиваться в критических ситуациях.

Основными возмущениями режима, оказывающими существенное влияние на работу газогенератора и требующими постоянного вмешательства системы регулирования, являются остановки механизмов удаления полукокса, происходящие довольно часто и по различным причинам. В этих случаях система регулирования действует следующим образом.

Представим, что удаление полукокса прервалось в момент времени  $t_1$  (рис. 5) и возобновилось в момент времени  $t_2$ . До  $t_1$  расход сланца и воздуха, скорость выгрузки полукокса имели какие-то устано-





Задача дальнейшего совершенствования управления газогенератором — оптимизация режима в целях увеличения выхода смолы и минимизации расхода топлива и энергии. Подлежат уточнению расход тепла на процесс, температура и количество теплоносителя, режим подачи газа в зону теплообмена. Требуется определить алгоритмы машинного управления газогенератором в условиях различных других возмущений технологического режима.

Система регулирования с применением ЭВМ пока не охватывает отделение конденсации парогазовой смеси, где еще не достигнут четкий температурный режим, неудовлетворительно отделяется от фенольной воды смола, нестабильно орошение газосливов и конечное охлаждение газа. После уточнения параметров технологического режима газогенератора система компьютерного управления будет расширена.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Ефимов В. М., Пийк Э. Э., Роокс И. Х.* О возможности снижения потери физического тепла при переработке сланца в газогенераторах. — В кн.: Химия и технология горючих сланцев. Таллин, 1973, с. 16—28.
2. *Валдек Р., Луцковская Н. Л., Эйзен Ю.* О теплоте разложения органического вещества эстонских горючих сланцев. — Изв. АН ЭССР. Сер. физ.-матем. и техн. наук, 1961, 10, № 2, с. 158—166.
3. *Эпштейн С. Л.* К тепловой характеристике шахтного сланцевого генератора комбината «Кивийли». — В кн.: Вопросы техники и экономики промышленного полукоксования горючих сланцев. Л., 1959, с. 150—175.
4. *Николаев В. И., Лысогор В. Н.* Формализация задачи управления установкой производства сланцевых смол. — Автоматизация и контрольно-измерительные приборы / ЦНИИТЭнефтехим, 1975, № 7, с. 11—13.
5. *Райбман Н. С., Чадеев В. М.* Построение моделей процессов производства. — М., 1975, с. 376.

*Производственное объединение  
«Сланцехим» им. В. И. Ленина  
г. Кохтла-Ярве*

Поступила в редакцию  
9. 04. 1985



### AUTOMATIC PROCESS CONTROL FOR OIL SHALE LOW-TEMPERATURE CARBONIZATION IN 1000 T/D GAS GENERATOR

A computer-operated control system for processing lumpy oil shale in a 1000 t/d gas generator is described. The system is based on the stabilization of specific heat consumption for the oil shale low-temperature carbonization process. The temperature and amount of the heat carrier gas produced in the gas generator by burning the recycle gas in built-in combustion chambers are also stabilized by computer.

Production Association  
«Slantsekhim»

1. Брайко В. М., Лукич С. С., Рогов Н. X. О возможности применения цифровых автоматов при переработке сланца в газогенераторах. В кн.: Химия и технология топливных сланцев. Ташкент, 1973, с. 19-23.
2. Байков П., Умаровская Н. А., Садырбаев К. О тонкостях разработки сланцевых аппаратов. В кн.: Труды Института сланцевых сланцев. Изд. АН СССР, СФРП, М., 1971, № 2, с. 158-168.
3. Байков П., Садырбаев К. О тонкостях разработки сланцевых аппаратов. В кн.: Труды Института сланцевых сланцев. Изд. АН СССР, СФРП, М., 1971, № 2, с. 158-168.
4. Байков П., Садырбаев К. О тонкостях разработки сланцевых аппаратов. В кн.: Труды Института сланцевых сланцев. Изд. АН СССР, СФРП, М., 1971, № 2, с. 158-168.
5. Байков П., Садырбаев К. О тонкостях разработки сланцевых аппаратов. В кн.: Труды Института сланцевых сланцев. Изд. АН СССР, СФРП, М., 1971, № 2, с. 158-168.

Получена в редакцию  
9.04.1973

Применовственное издание  
«Слантсехим» им. В. И. Ленин  
г. Костанай-Росс