

УДК 621.311.22

*А.С.ЗАВОРИН, С.А.БЕЛЯЕВ*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОПЛИВОИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА**

Изложены результаты научных работ, характеризующих состояние и развитие основных исследований по теплоэнергетике на кафедрах теплоэнергетического факультета.

Современное состояние использования топлив в теплоэнергетике характеризуется стремлением к повышению эффективности теплообмена в элементах и установках и актуализацией вопросов безопасности, надежности, совершенствования экологических характеристик их эксплуатации. Экономические стимулы поиска резервов ресурсо- и энергосбережения обуславливают введение в топливно-энергетический баланс низкосортных топлив и разработку технических решений по утилизации низкопотенциальной теплоты. Эти и смежные с ними вопросы определили содержание исследований и научно-технических разработок на кафедрах теплотехнического профиля.

Новые аспекты получили развитие в традиционных для ТПУ исследованиях свойств минеральной части энергетического топлива. Перспективность получения из низкосортных местных углей облагороженного твердого топлива, обладающего повышенной теплотой сгорания и улучшенной транспортабельностью, с учетом многообразия влияния золы на работу топливосжигающих установок выдвигает исследования свойств минеральных компонентов для продуктов переработки углей в ряд необходимых элементов обеспечения их энергетического использования. Эта направленность стимулируется требованиями улучшения экологических характеристик энергетических объектов. В число приоритетных концепций по использованию сибирских углей в энергетике входят проекты, предполагающие их внутрицикловую термическую обработку. К ним относятся парогазовые установки с внутрицикловой газификацией под давлением и с частичной газификацией в результате пиролиза, паротурбинные установки с предварительным прогревом угольной пыли при температуре более 500°C, а также другие технологии сжигания, которые привносят в состав котельных установок элементы с глубоким термохимическим воздействием на топливо в стадии его подготовки, что существенно изменяет физико-химическое состояние минеральной части.

Непременным условием осуществления каждой технической концепции по эволюции технологии теплоэнергетического производства является обеспечение утилизации отходов, в том числе извлечение ценных компонентов из золы и шлаков. Очевидно, что исследования минеральной части углей в различных условиях сжигания представляют собой часть развивающегося направления экологически чистой тепловой электрической станции. В связи с этим настоящее состояние проблемы освоения низкосортных твердых топлив с учетом свойств минеральной части характеризуется новыми особенностями. Одна из них определена потребностью в обобщении свойств минеральной части как комплексного теплотехнического параметра, необходимого для совершенствования технологии энергетического использования топлива. Другая особенность исходит из расширения возможностей для численного моделирования процессов, что потребовало систематизации базовых данных для прогнозирования поведения минеральной части при сжигании углей и для создания соответствующих информационных и экспертных систем. Достижимый эффект от компьютерного моделирования зависит не только от адекватности используемых моделей, но и от степени детализации данных о составе и свойствах минеральной части углей, что позволяет вести расчеты с учетом как совокупных, так и индивидуальных свойств частиц угля и золы. По сути дела речь идет о расширении номенклатуры и диапазона изменения характеристик различных состояний минеральной части углей, от исходного до развивающегося на определенной стадии под

влиянием температуры и других факторов. Получаемые при этом характеристики свойств должны сохранять преемственность с наиболее доступными и традиционно применяемыми в теплотехнике, так как это создает условия для использования в вопросах прогнозирования всего ранее наработанного задела.

Изложенные положения послужили в качестве исходных для комплексных исследований минеральной части широко используемых в теплоэнергетике бурых углей различных месторождений Канско-Ачинского бассейна, выполненных коллективом под руководством А.С. Заворина. По результатам фракционирования угля создана диаграмма распределения минеральных компонентов по степени связи с органическим веществом в диапазоне поставляемой зольности углей, по которой можно составить интегральную оценку содержания трех форм золообразующих макрокомпонентов: первичной составляющей внутренней зольности, внутренних тонкодиспергированных примесей и внешних механических примесей. Физико-химическими исследованиями в каждой из них выделены несколько групп минеральных веществ, для которых получены данные о количественном фазовом составе в широком диапазоне изменения зольности углей. Поскольку эти исследования подробно освещены в монографиях, в соответствии с обзорным характером настоящей работы остановимся на той их части, которая непосредственно относится к проблеме повышения тепловой эффективности поверхностей нагрева котельных агрегатов.

Имеющиеся представления о механизме образования и свойствах натрубных золовых отложений при сжигании низкосортных углей, которые являются причиной резкого увеличения термического сопротивления при передаче теплоты от продуктов сгорания к теплоносителю, сосредоточивают внимание прежде всего на минералогических формах железо- и кальцийсодержащих соединений. Своеобразие связи дисульфида железа с угольным веществом может быть причиной неоднозначного поведения этого соединения в топочном процессе в зависимости от степени измельчения, от состава среды, от аэродинамических и температурных факторов. Минеральные соединения внутренней зольности обладают различной прочностью связи металлов с органическим веществом. Применительно к технологии сжигания это проявляется в наибольшей устойчивости железоорганических соединений при деструкции и окислении угольных частиц.

Преобразования минеральной части при термической подготовке бурого угля к сжиганию исследованы Л.Г. Захаровой на базе экспериментальной установки с реактором бескислородного нагрева свободно падающего потока угольной пыли. Выполнены серии опытов с уровнем температур в рабочем пространстве реактора 550 – 750°C и временем пролета угольных частиц 1,5 – 2 с. С целью наиболее полного выявления изменений в минеральной части твердого термпродукта принята та же методика, что и для количественной оценки минералогических компонентов в их исходном состоянии.

Анализами фиксируются довольно глубокие преобразования минеральной части. Увеличивается содержание диоксида углерода, а содержание серы общей уменьшается, причем это происходит за счет перераспределения массовой доли ее разновидностей (органической, сульфатной, колчеданной). Выход золы и ее химических составляющих во фракции различной плотности существенно отличается от такового для натурального угля. В частности, уменьшается содержание золообразующих компонентов в легких фракциях (плотность менее 1600 кг/м<sup>3</sup>) за счет соответствующего увеличения в тяжелых фракциях, с усилением этой тенденции по мере увеличения температуры обработки.

Перераспределение неорганических макрокомпонентов угля также характеризуется несколькими особенностями. Увеличивается выход силикатных и железистых соединений во фракции плотностью более 1600 кг/м<sup>3</sup> за счет взаимодействия компонентов внутренней составляющей зольности и их реагирования с газообразными продуктами.

Классификация преобладающих минералогических групп выполнена с учетом выявленных отличий от натурального угля по трем группам:

- органо-минеральные комплексы (компоненты, удерживаемые в составе карбоксильных групп частично разложившихся остатков гуматов и гетерополярных солей);
- оксиды (кроме кварца) и карбонаты;

- кварц, сульфиды и силикатные комплексы ( к последним относятся как новообразования, так и неразложившиеся остатки глинистых минералов).

За исключением кремнекислоты все другие макрокомпоненты минеральной части угля представлены в твердом термопродукте в каждой минералогической группе и в зависимости от температуры в реакторе. По мере ее повышения резко сокращается доля компонентов в составе органических веществ в связи с их разложением. За счет этого увеличивается доля новообразований, прежде всего кальций- и магнийсодержащих силикатов, а также группы оксидов и карбонатов. К последней относятся оксиды кальция, магния, железа и алюминия, а карбонатная форма играет подчиненную роль (содержание  $\text{CO}_2$  в минеральном составе не превышает 1%). На состав группы силикатов влияет трансформация глинистого вещества, железосодержащих минералов группы слюд, твердофазные реакции с участием кварца.

Сжигание термопродукта выполнено в лабораторном огневом стенде, представляющем собой вертикальную цилиндрическую камеру горения с нижним выходом дымовых газов в горизонтальный конвективный газоход прямоугольного сечения. Для отбора золовых отложений использованы охлаждаемые зонды, установленные перед входом дымовых газов в конвективный газоход и непосредственно в конвективном газоходе, а также неохлаждаемые зонды. Летучая зола улавливалась в циклоне и тканевом фильтре. Эксперименты на огневом стенде выполнены при избытках воздуха в камере горения от 0,9 до 1,2 и температурах сжигания от 1200 до 1500°C.

Массовая скорость роста золовых отложений на зондах в условиях эксперимента при сжигании термопродукта в 1,5 раза меньше по сравнению с натуральным углем.

Сравнение значений напряжений разрушения на сжатие образцов золы, полученных в результате спекания при различных температурах, позволяет отметить меньшую склонность золы термопродукта к упрочнению по сравнению с золой от сжигания натурального угля. По мере повышения температуры сжигания это различие сглаживается в связи с возрастанием прочности образцов и понижением температуры, при которой проявляются признаки интенсивного упрочнения.

В области температур 500 – 650°C зола от сжигания термопродукта обладает пониженной склонностью к реакции сульфатизации и соответственно упрочнению за счет этого фактора по сравнению с золой от сжигания натурального угля.

Использование результатов исследования для анализа поведения минеральной части угля применительно к технологии пылесжигания должно исходить прежде всего из того факта, что значительная часть преобразований минеральных компонентов проходит на стадии термической подготовки. При этом в термохимические взаимодействия вовлекаются и компоненты, в обычных условиях сжигания определяющие склонность золы к образованию прочных отложений. Такие процессы приводят при сжигании к изменению состава золы, в частности, уменьшается содержание несвязанного оксида кальция и сульфидной серы. Следствием этого является уменьшение массовой скорости образования золовых отложений на экспериментальных зондах стендовой установки. Подобный эффект при сжигании натурального угля достигается лишь при высокотемпературном сжигании, однако ценой получения стабилизированного первичного упрочненного слоя. Оказалось, что и при высокотемпературном сжигании термопродукта упрочнение образцов золы от спекания намного больше, чем при низкотемпературном процессе. Однако при этом выигрыш от снижения интенсивности образования отложений становится несущественным, что объясняется связыванием многих активных компонентов минеральной части еще на стадии предгорелочной термической подготовки. В итоге с учетом капитальных и эксплуатационных затрат для осуществления того или иного метода сжигания технология с предварительной термической обработкой угля по условиям поведения минеральных компонентов наиболее совместима с низкотемпературным топочным процессом. Другие варианты могут быть оправданными в случае сжигания термопродукта в системе комплексного энерготехнологического производства с высокой степенью безотходности, предполагающего полную утилизацию шлака.

Свойства продуктов преобразования минеральной части угля позволяют извлекать из термопродукта 5 – 10% его минеральной массы без существенного изменения схемы пылесжигания ко-

тельной установки, то есть проводить внутрицикловое обогащение топлива с утилизацией извлекаемого материала.

Использование обширных данных о вещественном составе и термических свойствах неорганических компонентов в топливе и продуктов их термических преобразований в качестве базы для компьютерного моделирования позволяет намного сократить трудоемкость и повысить вариативность получения многих эксплуатационных характеристик работы котла, определяемых свойствами и поведением минеральной части топлива. В ряду этих задач моделирование шлакообразования и расчет коэффициента шлакоулавливания являются ключевыми, поскольку от их результата зависит эффективность моделирования всех последующих взаимодействий минеральной составляющей топлива с поверхностями нагрева в топке и газоходах. Доля золы топлива, осаждающаяся в топке в виде шлака и называемая коэффициентом шлакоулавливания, в тепловых расчетах котлов принимается как нормативная величина в зависимости от способа сжигания и типа топочного устройства. Она определяется при пусконаладочных испытаниях головных образцов или специальными исследованиями путем весьма трудоемкого и продолжительного эксперимента. Поэтому вопросы изменения величины коэффициента шлакоулавливания для топков разного типа в зависимости от изменения условий эксплуатации и качества топлива встречаются в литературе крайне редко. Вместе с тем использование ограниченного числа значений, а чаще одного, фиксированного коэффициента шлакоулавливания не всегда удовлетворяет при решении разнообразных инженерных задач, связанных с проектированием и реконструкцией котельных установок, например, при переводе на повышенную нагрузку, при модернизации топочного устройства или системы золоулавливания и др. Совершенствование используемых математических моделей шлакообразования и программных средств их реализации позволит на стадии проектирования новых топочных устройств, а также при выборе вариантов реконструкции наиболее полно учитывать эксплуатационные средства управления степенью шлакоулавливания.

Один из подходов к моделированию шлакоулавливания в топке базируется на численной методике А.В. Старченко. Математическая модель, описывающая процессы в зоне активного горения топки, состоит из двух систем уравнений. Первая из них, предназначенная для исследования пространственного стационарного турбулентного движения газовой среды в объеме топки, базируется на уравнениях Рейнольдса и « $k$ - $\varepsilon$ »-модели турбулентности и записывается в декартовых координатах следующим образом:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \rho \frac{\partial k}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad j=1,2,3;$$

$$\rho = \frac{P}{RT};$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (r U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_T}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \rho \varepsilon;$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (r U_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G - \rho C_{\varepsilon 2} \varepsilon);$$

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon},$$

где  $\rho$ ,  $P$ ,  $T$  – плотность, давление и температура газа;  $\mu$ ,  $\mu_T$  – молекулярная и турбулентная вязкость;  $U_i$ ,  $U_j$  – компоненты вектора осредненной скорости;  $x_i$ ,  $x_j$  – декартовы координаты;  $k$ ,  $\varepsilon$  – соответственно кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации;  $R$  – газовая по-

стоянная;  $G = \mu_{\tau} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$  – генерация энергии турбулентности. По повторяющимся индексам производится суммирование от 1 до 3.

Модель турбулентности « $k, \varepsilon$ » содержит пять эмпирических констант:  $C_{\mu} = 0,09$ ;  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ;  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ;  $\sigma_k = 1,0$ ;  $\sigma_{\varepsilon} = 1,3$ .

Способ задания граничных условий для системы уравнений определяется типом границы. Для входных границ (сечения ввода первичного и вторичного воздуха) использовались однородные распределения для всех характеристик течения. На выходе из расчетного объема ставились мягкие граничные условия, причем расположение выходной границы должно быть достаточно удалено от зон возможной рециркуляции потока. В качестве граничных условий на стенках топочной камеры использовался метод пристеночных функций Лаундера-Сполдинга.

Модель была протестирована на экспериментальных данных визуализации течения, полученных И.И.Федецким при гидравлическом моделировании топки котла БКЗ – 220 – 100 ЖШ. Результаты тестовых расчетов дают основания применять данную модель для численного исследования аэродинамики топок.

Другая система уравнений описывает движение частиц в рамках лагранжева подхода с учетом динамического и теплового скольжения относительно газа и с учетом их горения. При этом частицы считаются сферическими, а столкновения их между собой не учитываются:

$$\begin{aligned} \frac{dx_j^p}{dt} &= U_j^p, \quad j=1,2,3; \\ \frac{dU_j^p}{dt} &= \frac{U_j - U_j^p}{\tau_p} + g \cos \gamma_j, \quad j=1,2,3; \\ \frac{dT^p}{dt} &= -\frac{6}{\rho_p^0 C_p d} \left[ -\frac{1}{2} \rho_p^0 Q_H^0 \bar{W} + \frac{\text{Nu}_p \lambda}{\delta} (T^p - T) + \varepsilon_p [(T^p)^4 - T_c^4] \right]; \\ \frac{d\delta}{dt} &= -\bar{W}; \quad \tau_p = \frac{\rho_p^0 d^2}{18 \mu f_D}; \\ f_D &= \begin{cases} 1 + 0,15 \text{Re}_p^{0,687}, & \text{Re} \leq 1000; \\ \frac{0,44 \text{Re}_p}{24}, & \text{Re} > 1000; \end{cases} \\ \text{Re}_p &= \rho |U_j U_j - U_j^p U_j^p| \frac{d}{m}; \quad \text{Nu}_p = 2 + 0,6 \text{Re}_p^{0,5} \text{Pr}^{0,33}; \\ \bar{W} &= \begin{cases} 0,75 \frac{\rho C_{O_2}}{\rho_p^0} \frac{A_k A_D}{A_k + A_D}, & \delta < \delta_{\text{зола}}; \\ 0, & \delta = \delta_{\text{зола}}; \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x_j^p$  – координаты положения угольной частицы;  $U_j^p$  – компоненты вектора скорости;  $t$  – время;  $T^p$  – температура частицы;  $\delta$  – размер частицы;  $\rho_p^0$  – плотность частицы;  $T_c, \varepsilon_p$  – температура стен топки и степень черноты;  $\bar{W}$  – скорость горения угля;  $A_D = 16 \cdot 10^{-6} \left( \frac{T}{273} \right)^{1,9}$ ;  $A_k = k_0 \exp \left( -\frac{E_A}{RT^p} \right)$ ;  $\text{Pr}$  – число Прандтля;  $C_{O_2}$  – концентрация кислорода;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\cos \gamma_j$  – косинус угла между направлением действия силы тяжести и осью  $Ox_j$ ;  $C_p$  – теплоемкость.

В качестве начальных условий для системы (2) используются значения  $x_j^p, U_j^p, T^p$  и  $\delta$ , соответствующие местоположению, скорости, температуре и размеру частицы в выходном сечении го-

релки. Система уравнений (1) вместе с граничными условиями решается численно на неравномерной шахматной сетке. Конечно-разностные аналоги получаются с помощью метода контрольного объема. Значения исходных величин в узлах конечно-разностной сетки определяются методом Патанкара и Сполдинга. Движение частиц и их положение в расчетной области отслеживаются с помощью метода Рунге-Кутты. Расчет траектории частицы считается оконченным, если частица пересекает выходное сечение расчетного объема топки или частица сталкивается со стенкой топки.

Численные решения модели были реализованы применительно к топке котла БКЗ-320-140 ПТ в виде многовариантных расчетов траекторий для полидисперсных горящих и инертных частиц в пределах восьмигранного предтопка. Частицы, траектория которых обрывается столкновением со стенкой, считались осевшими на пленку расплава на поверхности шлакового гарнисажа камеры горения. Суммирующий подсчет массы этих частиц относительно массы всех частиц дает величину коэффициента шлакоулавливания.

Расчетные значения коэффициента шлакоулавливания, определенные по итогам численного моделирования траекторий частиц, при сопоставимых условиях показали полное совпадение с результатами натурного эксперимента, выполненного на котлах Иркутской ТЭЦ-6. Расчеты показали, что перераспределение топлива по ярусам горелочного блока и изменение гранулометрического состава угольной пыли дают возможность изменять значения коэффициента шлакоулавливания в исследованной топке от 0,05 до 0,35.

Одним из направлений утилизации теплоты уходящих газов топливосжигающих установок является использование контактных теплообменников. В литературе предлагаются конструкции контактных теплообменников, в которых или реализуются пленочные режимы течения жидкости, или осуществляется взаимодействие газа и жидкости в барботажном слое. К числу перспективных контактных устройств могут быть отнесены такие, в которых имеет место комбинированный режим взаимодействия газа и жидкости, однако ввод их в инженерную теплотехническую практику потребовал проведения теоретических и экспериментальных исследований гидродинамических характеристик аппаратов с подобными ступенями контакта, исследования процессов совместного тепломассопереноса в конкретных газожидкостных системах и газоочистки.

В качестве объекта исследований А.Р. Дороховым с сотрудниками взяты эффективные аппараты с вращающимся газожидкостным слоем, называемые центробежно-барботажными. Первая ступень контактного взаимодействия газа и жидкости представляет собой вращающийся газожидкостный слой, реализующий центробежно-барботажный процесс. Вторая ступень контактного теплообмена включает в себя разделение газа и жидкости и их взаимодействие в режиме пленочного течения жидкости в канале, на выходе из которого осуществляется окончательная сепарация фаз.

На основе экспериментальных и теоретических разработок можно считать решенной проблему расчета гидравлических характеристик таких аппаратов. Вращение газожидкостного слоя приводит к тому, что «вес» слоя определяется величиной центробежных сил, поэтому градиент давления в слое принимается равным

$$\frac{dp}{dr} = \rho_{\zeta} \frac{w_{\zeta}^2}{r}, \quad (3)$$

где  $\rho_{\zeta}$  – плотность газожидкостной смеси, которую можно приближенно определить из соотношения  $\rho_{\zeta} \approx \rho_1(1 - j)$ .

В результате интегрирования выражения (3) в пределах толщины газожидкостного кольца  $r_0 - \delta_{\zeta} < r < r_0$  получаем

$$\Delta P = -(1 - \varphi) \rho_f w_{\zeta}^2 \ln(1 - \delta_{\zeta} / r_0). \quad (4)$$

Записанная в безразмерной форме зависимость (4) имеет вид

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho_g v_0^2} = - \frac{(1 - \varphi) \rho_f}{\rho_g} \left( \frac{w_{\zeta}}{v_0} \right)^2 \ln(1 - \delta_{\zeta} / r_0). \quad (5)$$

При малой в сравнении с радиусом вихревой камеры толщине слоя выражение (5) запишется в виде

$$Eu = \frac{\zeta}{2} + (1 - \varphi) \frac{\rho_f}{\rho_g} \frac{\delta_\zeta}{r_0} \left( \frac{w_\zeta}{v_0} \right)^2. \quad (6)$$

В зависимости (6) сопротивление «сухой» решетки учитывается коэффициентом  $\zeta$ . Как видим, согласно зависимости (6), вращение газожидкостного слоя учитывается одним комплексным параметром

$$Z = (1 - \varphi) \frac{\rho_f}{\rho_g} \frac{\delta_\zeta}{r_0} \left( \frac{w_\zeta}{v_0} \right)^2.$$

В соответствии с зависимостью (6), обработаны экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению аппаратов с вращающимся газожидкостным слоем. Получено, что весь массив экспериментальных точек вполне удовлетворительно может быть описан эмпирической зависимостью

$$Eu = 0,7 + 0,5(1 - \varphi) \frac{\rho_f}{\rho_g} \frac{\delta_\zeta}{r_0} \left( \frac{w_\zeta}{v_0} \right)^2. \quad (7)$$

Отсюда следует, что коэффициент гидравлического сопротивления «сухой» решетки (первое слагаемое в правой части (7)) может быть принят равным  $\zeta = 1,4$ , что коррелирует с данными по сопротивлению сухих решеток пенных аппаратов. С увеличением определяющего комплекса характер зависимости числа Эйлера от него становится такой же, как в теории, то есть зависит от него в первой степени. Однако коэффициент при определяющем комплексе оказывается существенно ниже (в 2 раза!) расчетного.

Полученные результаты гидродинамических исследований также позволяют провести оценку параметров, при которых имеет место как образование устойчивого газожидкостного слоя, так и его разрушение.

При исследовании процессов совместного теплопереноса были созданы основы теории обобщения экспериментальных данных для процесса взаимодействия влажного воздуха и воды во вращающемся газожидкостном слое.

Из общих соображений ясно, что на поверхности пленки при ее нагреве имеет место конвективный теплообмен с газовым потоком и перенос теплоты за счет скрытой теплоты парообразования вследствие массообмена на поверхности жидкости. Эту составляющую теплового потока принято называть испарительной составляющей. Количество испаряемого пара в таком устройстве однозначно определяется величиной испарительной составляющей теплового потока. При разработке метода расчета устройств получения парогазовых смесей определение величины испарительной составляющей теплового потока имеет важное методологическое значение.

Один из способов определения величины испарительной составляющей теплового потока основан на использовании рекомендуемых в литературе закономерностей массообмена при обтекании потоком газа поверхности в условиях отсутствия его закрутки, а также к закрученному потоку газа. Однако для системы воздух – вода использование классических закономерностей может быть сопряжено с большими погрешностями, поскольку именно для данной системы наблюдаются значительные отклонения от известных закономерностей, которые коррелируются, например, введением в обобщенные зависимости такого параметра, как критерий Гухмана  $Gu$ , физический смысл которого представляется не вполне выясненным. А.Р. Дорохов и Г.И. Штайгер провели оценку испарительной составляющей теплового потока для условий конкретных экспериментов на основе измеренных профилей температуры стенки по длине канала.

Под воздействием эксплуатационных факторов в материалах энергетических установок могут происходить как поверхностные, так и внутренние изменения структуры, включая дефекты типа «нарушение сплошности» (пустоты, расслоение и т.д.), ведущие к изменению их свойств, сниже-

нию эффективности теплопереноса в элементах и надежности установок в целом. По условиям технологического процесса в ряде случаев отсутствуют возможности для контроля происходящих изменений контактными методами. Поэтому предпочтительны нестационарные методы, обеспечивающие комплексное определение свойств материалов без нарушения целостности и структуры исследуемого объекта. Среди этих методов большими возможностями обладает импульсный тепловой метод вспышки, предложенный Паркером в 1961 г. Метод основан на использовании короткого теплового импульса (лазера, лампы-вспышки и т.д.), подводимого к поверхности исследуемого объекта для создания температурного градиента в нем. Возникающее при этом изменение температуры во времени на обратной стороне изделия (по отношению к подведенному импульсу) фиксируется с помощью приемника инфракрасного излучения и используется для вычисления теплофизических свойств.

О.Ю.Троицким разработан усовершенствованный вариант метода с подводом импульса нагрева и съемом экспериментальной термограммы с одной стороны объекта, дающий возможность послойного определения теплофизических свойств. В рамках этого метода им предложен новый критериальный подход, согласно которому любое изменение структуры материала может быть интерпретировано как слой материала со свойствами (в том числе и теплофизическими), отличающимися от свойств основного материала.

Для дистанционной бесконтактной оценки происшедших изменений предлагается ввести в рассмотрение безразмерный критерий термической однородности  $T_0 = T/(t-T')$ , где  $T$  и  $T'$  – изменение во времени  $t$  температуры и ее производной по времени на поверхности исследуемого материала после импульсного теплового воздействия на поверхность.

Чтобы проанализировать изменение во времени критерия термической однородности, рассматривается аналитическое выражение для температурного поля в двухслойной пластине толщиной  $\delta_2$ , выполненной из разнородных материалов, с толщиной первого слоя  $\delta_1$ . Между слоями пластины существует идеальный тепловой контакт. Пластина теплоизолирована с внешних поверхностей и имеет нулевую начальную температуру.

В начальный момент времени ( $t = 0$ ) на поверхности пластины ( $x = 0$ ) действует мгновенный распределенный источник тепловыделения интенсивностью  $Q$ . Нестационарное температурное поле в пластине при  $t > 0$  описывается системой уравнений:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq \delta_1; \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \quad \delta_1 \leq x \leq \delta_2; \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=\delta_1} = \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=\delta_2} = 0; \quad (10)$$

$$T_1(x = \delta_1, t) = T_2(x = \delta_1, t); \quad (11)$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=\delta_1} = \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=\delta_2}; \quad (12)$$

$$T_1(x, t = 0) = \frac{2Q}{c_1 \rho_1} \delta(x); \quad (13)$$

$$T_2(x, t = 0) = 0, \quad (14)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\rho$  – плотность;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\delta(x)$  – дельта-функция; индексы 1, 2 относятся к 1 и 2 слою соответственно.

Система (8) – (14) решалась методом интегральных преобразований Лапласа.



Выражение для нестационарного поля температур на поверхности пластины ( $x = 0$ ) в случае, когда толщина второго слоя бесконечна ( $\delta_2 \rightarrow \infty$ ), имеет вид

$$T(0,t) = \frac{Q}{c_1 \rho_1 \sqrt{\alpha_1 \pi t}} \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} B^k \exp\left(-\frac{k^2 \delta_1^2}{\alpha_1 t}\right) \right], \quad (15)$$

где  $B = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2}$ ,  $e = \sqrt{c\rho\lambda}$ .

Для поверхности полупространства было получено в случае

а)  $\delta$ -импульса 
$$T(0,t) = \frac{Q}{c_1 \rho_1 \sqrt{\alpha_1 \pi t}}, \quad (16)$$

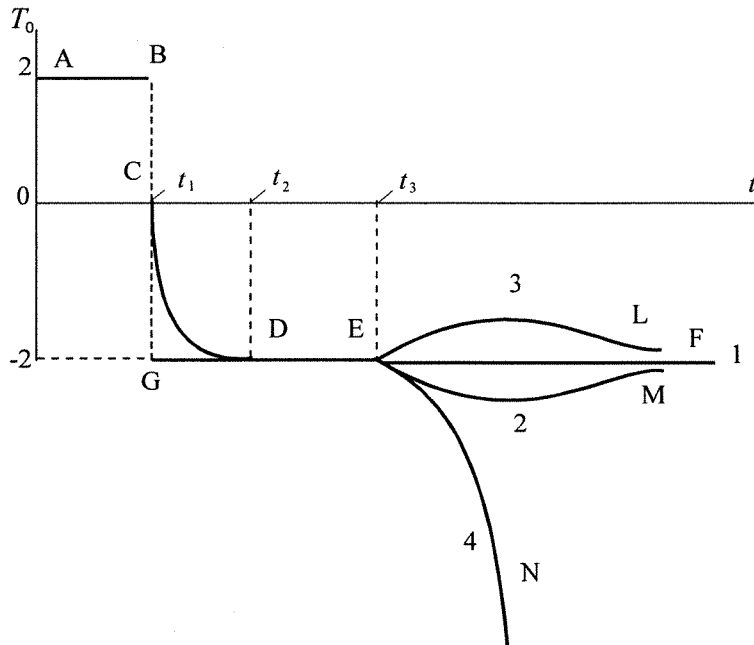
б) прямоугольного импульса длительностью  $t_1$

$$T = \frac{2Q}{t_1 e \sqrt{\pi}} \sqrt{t} \quad \text{при } 0 < t < t_1, \quad (17)$$

$$T = \frac{2Q}{t_1 e \sqrt{\pi}} \sqrt{t} - \sqrt{t - t_1} \quad \text{при } t > t_1.$$

На рисунке представлен качественный ход кривых  $T_0 = T_0(t)$ , полученных из анализа аналитического решения для двухслойной системы. Кривая ABCDEF (17) соответствует однородному материалу, нагреваемому прямоугольным импульсом длительностью  $t_1$ , при этом  $(t_2 - t_1)$  – время последствия импульса, равное приблизительно  $10 t_1$ .

Остальные кривые отвечают условиям нагрева  $\delta$ -импульсом:



1 (GDEF) – материал термически однороден (16);

2 (GDEM) – тепловая активность материала поверхностного слоя больше тепловой активности материала подложки (15);

3 (GDEL) – тепловая активность материала поверхностного слоя меньше тепловой активности материала подложки (15);

4 (GDEN) – материал представляет собой адиабатически изолированную пластину конечной толщины (15).

Видно, что критерий  $T_0$  отражает изменение условий на границах слоев, в частности, с какого-то момента  $t^*$  «чувствует» влияние условий на границе контакта слоев, что может быть использовано для создания систем

диагностики дефектности материалов и определения их теплофизических свойств. Так, участок кривой DE, т.е. временный интервал  $(t^* - t_2)$ , может быть использован для определения теплофизических свойств первого слоя, а участки EL и EM (т.е.  $t > t^*$ ) – для определения свойств второго слоя по специально разработанным алгоритмам.

Методы фронтального мониторинга снимают ограничения, налагаемые требованием необходимости доступа к лицевой и тыльной сторонам исследуемого объекта, и делают метод вспышки привлекательным инструментом для дистанционного неразрушающего контроля технологических систем и процессов. В частности, это пока единственно известный тепловой метод определения

- теплофизических свойств материала, скрытого за материалом с неизвестными свойствами. Впервые предложены способы послойного определения теплофизических свойств без задания их для какого-либо слоя без нарушения целостности изделия и его поверхности, что, в свою очередь, позволяет исследовать технологические системы, в которых исследуемое вещество скрыто за оболочкой из другого материала. Предложенные методы уже на данном этапе исследований позволяют определять дефекты типа «нарушение сплошности» (непроклей, непропай, расслоение, пустота и т.д.) по отклонению измеренного значения теплофизического свойства от заданного. Предлагается, что дальнейшее исследование в данном направлении может подвести к решению проблем тепловой дефектоскопии, тепловой дефектометрии и томографии.

Изменения теплофизических свойств материалов и термических сопротивлений элементов систем теплообмена вследствие переменного характера нагрузок, износа технологического оборудования, зашлаковывания и загрязнения рабочих поверхностей теплообменников и технологических коммуникаций в процессе эксплуатации теплоэнергетических установок приводят к существенным изменениям динамических характеристик объектов управления. По этой причине снижается эффективность систем управления.

В условиях изменения динамических характеристик технологических объектов задачи управления решают адаптивные системы. Адаптация систем управления предполагает идентификацию объектов управления, расчет оптимальных параметров настроек регуляторов, оперативную подстройку этих параметров.

Система адаптивного управления технологическими процессами теплоэнергетических установок включает технические средства получения измерительной информации, средства дистанционного изменения параметров настроек регуляторов, управляющую ЭВМ. Программное обеспечение включает следующие модули:

- проверки стационарности режима объекта управления и подачи ступенчатого воздействия;
- регистрации реакции объекта управления на входное ступенчатое воздействие и проверки его выхода на новый стационарный режим;
- определения структуры и параметров математической модели объекта управления;
- расчета оптимальных параметров настроек регуляторов, формирующих типовые законы регулирования;
- - реализации расчетных параметров системы управления.

Содержание программных модулей проверки стационарности режима объектов управления и реализации расчетных параметров корректируется с учетом особенностей структуры и состава комплекса технических средств системы управления.

В.С. Андык и В.В. Медведев предлагают использовать в качестве основного инструмента определения структуры и параметров математических моделей теплоэнергетических установок в системе адаптивного управления метод активной идентификации. Сущность этого метода заключается в получении и последующей обработке временных характеристик объектов управления. Выбор временных характеристик как реакции на ступенчатое воздействие обусловлен относительной простотой их экспериментального определения в условиях действующего производства.

Разработанная методика и основные положения обработки временных характеристик в изложении авторов метода выглядят следующим образом.

Пусть переходная характеристика статического объекта задана своими координатами  $y(t)$  в дискретные моменты времени с шагом  $dt$ . Требуется определить коэффициенты передаточной функции объекта, заданной в общем виде

$$W_{об}(P) = \frac{b_m \cdot P^m + b_{m-1} \cdot P^{m-1} + \dots + b_1 \cdot P + b_0}{P^n + a_{n-1} \cdot P^{n-1} + \dots + a_1 \cdot P + a_0}. \quad (18)$$

Аппроксимирование переходной характеристики объекта суммой экспонент дает

$$y_a(t) = \sum_{i=1}^n C_i \exp(k_i t) + Y(\infty), \quad (19)$$

где  $Y(\infty)$  – установившееся значение переходной характеристики.

При известных  $k_i$  коэффициенты  $a_i$  определяются по формулам

$$(-1)a_{n-1} = \sum_{i=1}^n k_i; \quad (-1)^2 a_{n-2} = \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n k_j \cdot k_i; \\ \dots \quad (20)$$

$$(-1)^{n-1} a_1 = \sum_{i=1}^n \prod_{j \neq i}^n k_j; \quad (-1)^n a_0 = \prod_{i=1}^n k_i.$$

Коэффициенты  $b_j$  передаточной функции определяются следующим образом. Представляя изображение переходной характеристики по Лапласу в виде

$$Y(P) = \frac{b_0}{F(P)} X(P) + \frac{G(P)}{F(P)}, \quad (21)$$

где  $X(P)$  – изображение входного воздействия на объект;  $F(P)$  – знаменатель передаточной функции объекта (18);  $b_0$  – коэффициент в передаточной функции объекта (18);  $G(P)$  – полином, учитывающий начальные условия и определяемый согласно выражению

$$G(P) = L_{n-1} \cdot P^{n-1} + L_{n-2} \cdot P^{n-2} + \dots + L_1 \cdot P + I_0. \quad (22)$$

Перейдя к нулевым условиям и единичному ступенчатому входному воздействию, с учетом (21) получено

$$Y(P) = \frac{b_0 + P \cdot G(P)}{P \cdot F(P)}, \quad (23)$$

или, принимая во внимание (22) и (18),

$$W_{об}(P) = \frac{Y(P)}{X(P)} = \frac{I_{n-1} \cdot P^n + I_0 \cdot P + b_0}{P^n + a_{n-1} \cdot P^{n-1} + \dots + a_1 \cdot P + a_0}. \quad (24)$$

Сравнивая выражения для передаточных функций объекта (18) и (24), можно найти формулы для определения коэффициентов  $b_j$  ( $j=1,2,\dots,n$ ):

$$b_n = y(0) = 0; \quad m = n-1; \quad b_{n-1} = y'(0) + a_{n-1} \cdot y(0); \\ \dots \quad (25)$$

$$b_1 = y^{(n-1)}(0) + a_{n-1} \cdot y^{(n-2)}(0) + \dots + a_1 \cdot y(0).$$

Необходимые для расчета коэффициентов  $b_j$  значения начальных условий определяются путем дифференцирования функций  $Y_a(t)$  из (19) для  $t=0$ :

$$y_a(0) = \sum_{i=1}^n C_i + Y(\infty); \quad y'_a(0) = \sum_{i=1}^n C_i \cdot k_i; \quad y_a^{(n)}(0) = \sum_{i=1}^n C_i \cdot k_i^n. \quad (26)$$

Таким образом, задача идентификации сводится к определению неизвестных коэффициентов аппроксимирующего уравнения (19), т.е.  $C_i$  и  $k_i$ .

Для нахождения искоемых коэффициентов составляется сумма квадратов ошибки

$$E = \sum_{j=0}^M [y(jdt) - y_a(jdt)]^2, \quad (27)$$

где  $M$  – число ординат экспериментальной переходной характеристики объекта.

С учетом (19) и  $C_1 = -y(\infty) - \sum_{i=2}^n C_i$

$$E = \sum_{j=1}^M \left[ y(\infty)(1-P(1,j)) - y_j + \sum_{i=2}^n C_i (P(i,j) - P(1,j)) \right]^2,$$

где  $P(i, j) = \exp(k_i \cdot dt \cdot j)$ ;  $y_j = y(j \cdot dt)$ .

Минимизирование функции ошибки  $E$  по каждой переменной  $C_i$  с известными коэффициентами  $k_i$  в результате преобразований приводит к системе линейных по  $C_i$  уравнений:

$$\left. \begin{aligned} C_2 A_{21} + C_3 A_{31} + C_4 A_{41} + \dots + C_n A_{n1} &= b_1, \\ C_2 A_{22} + C_3 A_{32} + C_4 A_{42} + \dots + C_n A_{n2} &= b_2, \\ \dots & \\ C_2 A_{2n-1} + C_3 A_{3n-1} + C_4 A_{4n-1} + \dots + C_n A_{nn-1} &= b_{n-1}, \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

где

$$A_{ki} = \sum_{j=1}^M (P(k,j) - P(1,j))(P(i+1,j) - P(1,j));$$

$$B_i = \sum_{j=1}^M (y(\infty)(1 - P(1,j)) - y_j)(P(1,j) - P(i+1,j)),$$

$$i = 1, n-1; \quad k = 2, n.$$

Система уравнений (28) является расчетной по определению коэффициентов  $C_i$ .

Для определения коэффициентов  $k_i$  целесообразно применить методы нелинейного программирования, например, метод локального случайного поиска, минимизирующего функцию

$$F[k_1, k_2, \dots, k_n] = \sum_{j=1}^M \left( 1 - \frac{y_a(j)}{y_j} \right)^2. \quad (29)$$

При этом порядок применения расчетных соотношений определяется следующим алгоритмом:

1. Задаются начальные значения  $k_i$  по правилу

$$k_i = -\frac{i}{T}, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $T$  – значение постоянной времени объекта, определенное приближенно по временной характеристике.

2. При известных  $k_i$  определяются по системе уравнений (28) коэффициенты  $C_i$ .

3. По значениям  $k_i$  и  $C_i$  определяются ординаты аппроксимирующей переходной характеристики  $y_a(j)$  в соответствии с уравнением (19), а затем и значение функции  $F$  по выражению (29).

4. Случайный поиск дает приращение коэффициентам  $k_i$  и происходит переход к пункту (2).

5. Процесс случайного поиска продолжается до тех пор, пока не будет достигнут минимум функции  $F$ .

6. По значениям  $C_i$  и  $k_i$ , минимизирующим  $E$  и  $F$ , определяются коэффициенты передаточной функции  $a_i$  и  $b_i$  по формулам (20), (25).

На основе полученных результатов идентификации решаются задачи расчета оптимальных параметров настроек регулирующих устройств с их последующей реализацией в системе адаптивного управления.