

Энергетика

УДК 519.854

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЭТАПНОГО ВНЕДРЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А.А. Бодягина¹, И.А. Данилушкин², С.А. Колпациков², В.Е. Серенков²

¹ ЗАО «Стратегические Бизнес-Системы»
Россия, 443071, г. Самара, Волжский пр-т, 8

² Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: idanilushkin@mail.ru

Рассматривается задача оптимального планирования мероприятий по внедрению автоматизированной измерительной системы технологических параметров с учетом ограничений на финансирование каждого этапа. В результате решения задачи достигается максимальное повышение точности расчета технико-экономических показателей работы оборудования на каждом этапе. Постановка задачи учитывает текущее состояние измерительной системы для расчета технико-экономических показателей, погрешности измерения существующих и вновь устанавливаемых приборов, стоимость внедряемой системы, стоимость обслуживания существующей и внедряемой систем. Приведен пример решения задачи оптимизации поэтапного внедрения автоматизированной измерительной системы для расчета технико-экономических показателей энергоблока.

Ключевые слова: *оптимальное планирование, автоматизированная измерительная система, поэтапное внедрение, технико-экономические показатели, энергетический комплекс, энергоблок.*

Введение

Перспективным направлением повышения качества управления сложными производственными комплексами является внедрение интеллектуальных систем управления [1]. Подобные системы могут применяться при управлении режимами энергетических комплексов [2–4], при этом входящие в состав комплекса генерирующие станции рассматриваются как многоуровневые объекты управления. Оценка эффективности функционирования электростанций осуществляется с помощью специализированных методик расчета технико-экономических показателей (ТЭП) работы оборудования и станции в целом. Для оперативной оценки

Антонина Александровна Бодягина, ведущий специалист отдела бизнес-приложений.

Иван Александрович Данилушкин (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Сергей Александрович Колпациков (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Виктор Евгеньевич Серенков (к.т.н.), доцент кафедры «Управление и системный анализ в теплоэнергетике».

показателей на станциях осуществляется внедрение автоматизированных систем расчета ТЭП. Алгоритмы расчета ТЭП требуют больших вычислительных затрат, поэтому на первом этапе автоматизации расчета осуществляется приобретение и адаптация специализированных программных пакетов расчета. В то же время точность получаемых результатов и периодичность их обновления зависят главным образом от состояния информационно-измерительной системы станции: класса точности датчиков и периодичности сбора информации. Поэтому обязательным этапом внедрения систем автоматического расчета ТЭП должна быть модернизация автоматической измерительной системы технологических параметров (АИС ТП), использующихся для расчета ТЭП.

Идеальным решением задачи модернизации АИС ТП является ввод в эксплуатацию всего программно-технического комплекса системы одним этапом. Однако такой подход чаще всего сталкивается с финансовыми ограничениями. В статье предлагается подход к решению задачи оптимального распределения финансирования при поэтапном внедрении АИС ТП. В качестве критерия оптимизации используется критерий максимального повышения точности расчета ТЭП на каждом этапе.

Состояние измерительных систем тепловых электростанций

Для большинства электростанций типична следующая ситуация [5]:

- часть технологических параметров измеряется автоматически. Это параметры, измеряемые автоматическими системами коммерческого и технического учета электрической и тепловой энергии, а также параметры, использующиеся в автоматических системах управления режимами работы оборудования. При этом разнородность используемых автоматических измерительных систем иногда не позволяет организовать автоматическое формирование единой базы данных значений технологических параметров, из-за чего усредненные значения технологических параметров формируются отдельными системами, а затем в печатном виде передаются в планово-технический отдел для ручного внесения в программу расчета ТЭП;

- часть измерительной информации формируется в процессе обработки данных диаграммных лент вторичных приборов. В зависимости от уровня автоматизации планово-технического отдела диаграммы обрабатываются вручную или с помощью автоматизированных систем на базе дигитайзеров;

- оставшиеся параметры оцениваются по мгновенным значениям из сменных и суточных ведомостей, заполняемых вручную персоналом станции с периодичностью один раз в два или четыре часа.

При внедрении АИС ТП необходимо выполнение следующих этапов:

- создание системы автоматического сбора измерительной информации на базе средств промышленной автоматизации (контроллеры, SCADA-система) для непрерывного измерения технологических параметров, необходимых для расчета ТЭП;

- установка датчиков технологических параметров, измерение которых не осуществляется, и подключение их к системе автоматического сбора измерительной информации;

- замена показывающих приборов на датчики с унифицированным выходом и подключение их к системе автоматического сбора;

- замена регистрирующих приборов на датчики с унифицированным выходом и подключение их к системе автоматического сбора;

– замена морально устаревших датчиков, а также датчиков с низким классом точности, сбор измерительной информации от которых уже автоматизирован.

Оценка точности расчета ТЭП

Точность расчета ТЭП на любом этапе существования АИС ТП может быть оценена исходя из класса точности датчика технологического параметра с учетом его вклада в рассчитываемый параметр [6].

В общем виде расчет любого параметра может быть представлен как функциональная зависимость

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где n – количество измеряемых параметров, участвующих в расчете параметра y .

Поведение рассчитываемого параметра исходя из представления (1) может быть линеаризовано путем разложения в ряд Тейлора в окрестности точки $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ с отбрасыванием членов ряда со степенями выше первой:

$$y = f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \frac{\partial f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)}{\partial x_1} (x_1 - x_1^0) + \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)}{\partial x_2} (x_2 - x_2^0) + \dots + \frac{\partial f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)}{\partial x_n} (x_n - x_n^0).$$

Разность $\Delta_i^M = (x_i - x_i^0)$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ – величина абсолютной погрешности измерения i -того параметра x_i . Значение частной производной в точке $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ по каждому из параметров x_i выступает в роли весового коэффициента, который определяет вклад измеряемого параметра x_i в расчетный параметр y .

Поскольку при расчете ТЭП используются усредненные значения параметров [7], то помимо абсолютной погрешности измерения Δ_i^M на точность расчета влияет периодичность измерения. Погрешность Δ_i^T , возникающая из-за периодичности измерения, может быть оценена лишь статистически. Она возрастает при расчете ТЭП в переходных режимах, соответствующих смене производительности оборудования, и уменьшается для стационарных режимов работы оборудования. В наихудших ситуациях погрешность периодичности измерения Δ_i^T превышает абсолютную погрешность Δ_i^M , определяемую классом точности датчиков.

Погрешность расчета ТЭП может быть вычислена как

$$A = \sum_{i=1}^N w_i \cdot \Delta_i, \quad (3)$$

где w_i – суммарный весовой коэффициент i -того измеряемого параметра, определяющий его вклад в значения расчетных параметров; Δ_i – суммарная погрешность измерения параметра, $\Delta_i = \Delta_i^M + \Delta_i^T$; N – общее количество измеряемых параметров системы.

Постановка задачи повышения точности расчета ТЭП

Задача максимального повышения точности расчета ТЭП при очередном этапе внедрения АИС ТП может быть сформулирована следующим образом [6]: необходимо добиться минимальной погрешности расчета ТЭП с учетом ограничений на стоимость этапа внедрения. Другими словами, из всех датчиков, подлежащих замене, необходимо выбрать те, которые обеспечат максимальное повышение точности расчета, и при этом суммарная стоимость этапа внедрения не будет превышать выделенных средств.

Стоимость модернизации одного измерительного канала складывается из стоимости датчика и работ по его установке, C_i , а также стоимости обслуживания нового датчика, C_i^{new} . При этом высвобождаются средства C_i^{old} , затрачиваемые на обслуживание старого датчика. Суммарная погрешность измерения параметра до и после модернизации будет обозначаться соответственно Δ_i^{old} и Δ_i^{new} . Принципиальная возможность модернизации i -того измерительного канала на этапе внедрения определяется значением параметра $E_i \in \{0, 1\}$, решение о модернизации измерительного канала на данном этапе определяется значением варьируемого параметра $M_i \in \{0, 1\}$. Если принять, что на очередном этапе внедрения выделяется некоторая сумма S на его проведение, то задача оптимизации может быть записана следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N w_i \cdot \Delta_i^{old} \cdot (1 - E_i M_i) + \sum_{i=1}^N w_i \cdot \Delta_i^{new} \cdot E_i M_i \rightarrow \min_{M_i}, \\ \sum_{i=1}^N (C_i + C_i^{new} - C_i^{old}) \cdot E_i M_i \leq S, \\ M_i \in \{0, 1\}, \quad i = \overline{1, N}. \end{array} \right. \quad (4)$$

В результате решения задачи целочисленного программирования (4) формируется список измерительных каналов, автоматизация которых наиболее эффективна с точки зрения повышения точности расчета ТЭП на данном этапе при ограниченных средствах, выделенных на внедрение АИС ТП.

Таким образом, при подготовке к проведению очередного этапа внедрения:

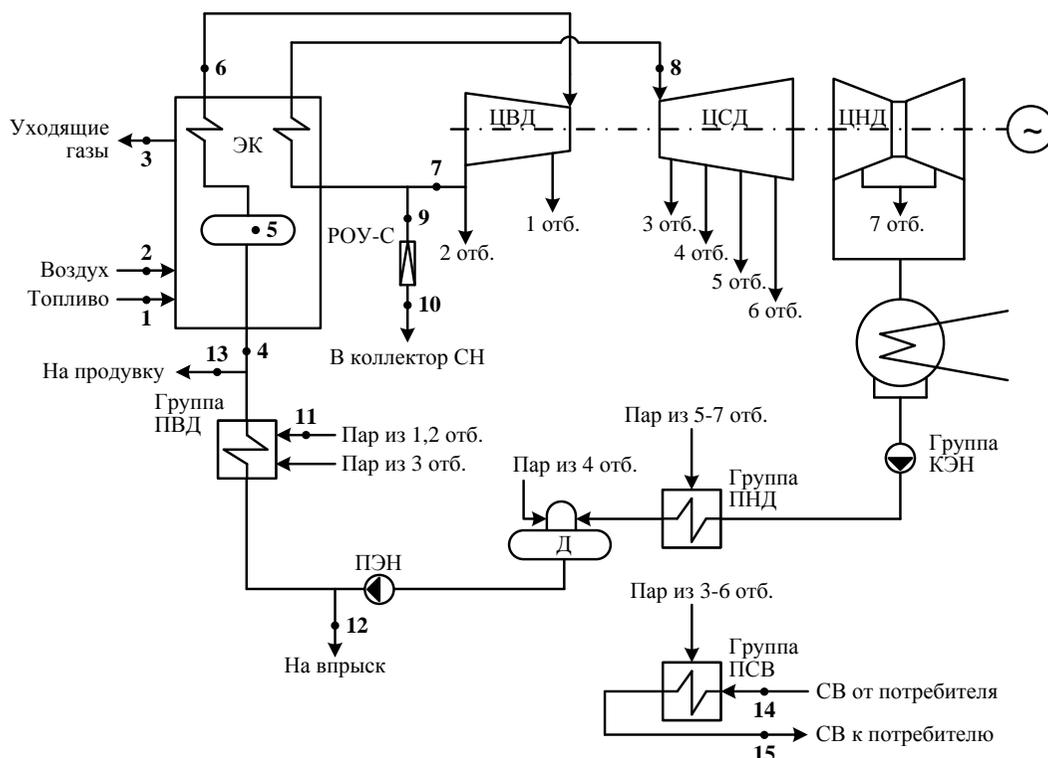
- 1) определяется текущая суммарная погрешность измерения для каждого параметра Δ_i^{old} ;
- 2) определяется возможность проведения модернизации для каждого измерительного канала и стоимость ее проведения E_i , C_i , C_i^{new} , C_i^{old} ;
- 3) определяется суммарная погрешность для каждого измеряемого параметра после замены датчика Δ_i^{new} ;
- 4) выполняется решение задачи (4).

При необходимости в уравнение ограничений (4) могут быть введены дополнительные слагаемые. Например, на первом этапе – затраты на создание системы автоматического сбора измерительной информации; на последующих этапах – затраты на расширение системы автоматического сбора: приобретение и монтаж дополнительных модулей ввода измерительных сигналов и т. п. Кроме того, постановка задачи может быть расширена для учета нескольких возможных

вариантов модернизации по каждому измерительному каналу – использование датчиков разной стоимости и разного класса точности. Еще один путь развития постановки задачи – модификация целевой функции таким образом, чтобы обеспечить максимальное повышение скорости обновления измерительной информации на каждом этапе внедрения АИС ТП [8].

Пример оптимизации поэтапного внедрения АИС ТП

В качестве примера рассматривается задача планирования поэтапного внедрения АИС ТП энергетического блока, состоящего из энергетического котла ТГМЕ-206 и турбоагрегата К-210-130 ЛМЗ. Бойлерная группа энергоблока состоит из двух подогревателей сетевой воды ПСВ-125-7-15 и двух подогревателей ПСВ-200-7-15, обогреваемых паром нерегулируемых отборов турбоагрегатов. Принципиальная схема энергоблока представлена на рисунке. Питательная вода (ПВ) подается питательными электронасосами (ПЭН) через группу подогревателей высокого давления (ПВД) на вход энергетического котла (ЭК). Острый пар (ОП) с выхода котла по двум паропроводам подаются на вход цилиндра высокого давления (ЦВД) турбины. С выхода ЦВД пар по двум ниткам возвращается в котел для промежуточного перегрева (ПП), а затем поступает на вход цилиндра среднего давления (ЦСД) турбины. Далее пар поступает в цилиндр низкого давления (ЦНД) и на конденсатор. Конденсированный пар прокачивается конденсационными электронасосами (КЭН) через подогреватели низкого давления (ПНД) и поступает на деаэратор (Д), откуда – на вход ПЭН. Часть пара после ЦВД поступает на редукционно-охладительную установку собственных нужд (РОУ-С). Сетевая вода (СВ) теплосети станции подогревается за счет прохождения через подогреватели сетевой воды (ПСВ).



Принципиальная тепловая схема энергетического блока

Перечень параметров, используемых для расчета ТЭП энергоблока, приведен в табл. 1. Номер точки соответствует точке установки датчика на тепловой схеме энергетического блока. В качестве номинальных значений приведены среднесуточные значения параметров работы энергоблока в установившемся режиме.

Таблица 1

Перечень измеряемых параметров для расчета технико-экономических показателей энергоблока

№ точки	Обозначение параметра	Номинальное значение	Описание параметра
1	B	55	Расход топлива, ТУТ/час
2	t_{XB}	15	Температура холодного воздуха, °С
3	$t_{УГ}$	127	Температура уходящих газов, °С
3	O_2	1	Содержание кислорода в режимном сечении, %
4	$G_{ПВ}$	377	Расход питательной воды через ПВД, т/час
4	$t_{ПВ}$	230	Температура питательной воды, °С
4	$P_{ПВ}$	180	Давление питательной воды, кгс/см ²
5	P_B	158	Давление пара в барабане котла, кгс/см ²
6	$G_{ОП}$	437	Расход острого пара на ЦВД турбогенератора блока, т/час
6	$t_{ОП}$	545	Температура острого пара, °С
6	$P_{ОП}$	140	Давление острого пара, кгс/см ²
7	$t_{ЦВД}$	327	Температура пара на выходе из ЦВД, °С
7	$P_{ЦВД}$	26,5	Давление пара на выходе из ЦВД, кгс/см ²
8	$t_{ЦСД}$	545	Температура пара на входе в ЦСД, °С
8	$P_{ЦСД}$	24,5	Давление пара на входе в ЦСД, кгс/см ²
9	$G_{СН}$	30	Расход пара на РОУ-С, т/час
10	$t_{СН}$	280	Температура пара после РОУ-С, °С
10	$P_{СН}$	13	Давление пара после РОУ-С, кгс/см ²
11	$G_{ПВД}$	76	Расход пара на группу ПВД из 1, 2 отборов, т/час
12	$G_{впр}$	60	Расход питательной воды на впрыск, т/час
12	$t_{впр}$	160	Температура питательной воды на впрыск, °С
12	$P_{впр}$	180	Давление питательной воды на впрыск, кгс/см ²
13	$G_{пр}$	4	Расход питательной воды на непрерывную продувку, т/час
14	$t_{обр}$	54	Температура обратной сетевой воды, °С
15	$G_{СВ}$	520	Расход сетевой воды через ПСВ, т/час
15	$t_{пр}$	87	Температура прямой сетевой воды, °С
отс.	$t_{исх}$	10	Температура исходной воды, °С

Расчет фактических ТЭП энергетического блока определяется следующими выражениями [7].

1. Удельный расход тепла на выработку электроэнергии турбоагрегатом энергоблока $q_{\mathcal{E}}$ рассчитывается по формуле

$$q_{\mathcal{E}} = \frac{Q_{\mathcal{E}} \cdot 10^3}{N}, \frac{\text{ккал}}{\text{кВт/час}}, \quad (5)$$

где N – средняя мощность турбоагрегата за расчетный период, МВт (технический учет); $Q_{\mathcal{E}}$ – расход тепла на выработку электроэнергии турбоагрегата энергоблока, Гкал/час, определяется следующим образом:

$$Q_{\mathcal{E}} = (G_{OП}H_{OП} + G_{ПП}(H_{ЦСД} - H_{ЦВД}) + G_{анр}(H_{ЦСД} - H_{анр}) - G_{ПВ}H_{ПВ}) \cdot 10^{-3} - Q_T^{omб}. \quad (6)$$

В (6) и далее символом H обозначена энтальпия пара или воды в соответствующей точке измерения, ккал/кг. Она рассчитывается как функция двух параметров – температуры и давления пара или воды. $G_{ПП}$ – расход пара после промежуточного перегрева, т/час; $Q_T^{omб}$ – отпуск тепла из отборов турбогенератора, Гкал/час.

Расход пара $G_{ПП}$ рассчитывается по формуле

$$G_{ПП} = G_{OП} - G_{СН} - G_{ПВД}. \quad (7)$$

Отпуск тепла с горячей водой $Q_T^{omб}$ определяется как сумма отпуска тепла подогревателями сетевой воды и редуционно-охладительной установкой собственных нужд:

$$Q_T^{omб} = G_{СВ}(t_{нр} - t_{обр}) \cdot 10^{-3} + G_{СН}(H_{СН} - t_{исх}) \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

Коэффициент отнесения затрат топлива энергетического котла на производство рассчитывается как

$$K_{\mathcal{E}} = \frac{Q_{\mathcal{E}} + Q_T^{CH} + \Delta Q_{\mathcal{E}}}{Q_{\mathcal{E}} + Q_T^{CH} + \Delta Q_{\mathcal{E}} + Q^{omп}}, \quad (9)$$

где Q_T^{CH} – расход тепла на собственные нужды (СН) турбогенератора, Гкал/час (расчетный параметр); $\Delta Q_{\mathcal{E}}$ – увеличение расхода тепла на производство электроэнергии при условном отсутствии отпуска тепла внешним потребителям из отборов, Гкал/час (расчетный параметр); $Q^{omп}$ – отпуск тепла горячей водой внешним потребителям отработанным паром блока, Гкал/час, рассчитывается пропорционально вкладу всех энергоблоков в суммарный отпуск тепла станцией. Для иллюстрации расчета принято, что $Q^{omп} = 420$ Гкал/час.

2. Расход топлива на отпуск электроэнергии энергоблоком определяется следующим образом:

$$B_{\mathcal{E}} = K_{\mathcal{E}} \cdot B \cdot \frac{\mathcal{E}^{omн}}{\mathcal{E} - \mathcal{E}^{CH}}, \quad (10)$$

где \mathcal{E} – выработка электроэнергии энергоблоком, тыс. кВт/час (технический учет); $\mathcal{E}^{omн}$ – отпуск электроэнергии энергоблоком, тыс. кВт/час (коммерческий учет); \mathcal{E}^{CH} – расход электроэнергии на собственные нужды энергоблока на выработку электроэнергии, тыс. кВт/час, рассчитывается как сумма расходов элек-

троэнергии на собственные нужды энергетического котла \mathcal{E}_K^{CH} (технический учет) с учетом весового коэффициента $K_{\mathcal{E}}$ и на собственные нужды турбогенератора \mathcal{E}_T^{CH} (технический учет):

$$\mathcal{E}^{CH} = \mathcal{E}_K^{CH} \cdot K_{\mathcal{E}} + \mathcal{E}_T^{CH}. \quad (11)$$

3. Удельный расход топлива на отпуск электроэнергии энергоблоком:

$$b_{\mathcal{E}} = \frac{B_{\mathcal{E}} \cdot 10^3}{\mathcal{E}^{omn}}. \quad (12)$$

4. Расход топлива на отпуск тепла энергоблоком:

$$B_Q = B - B_{\mathcal{E}}. \quad (13)$$

5. Удельный расход топлива на отпуск тепла энергоблоком:

$$b_Q = \frac{B_Q \cdot 10^3}{Q^{omp}}. \quad (14)$$

Выработка тепла энергетическим котлом определяется по формуле

$$Q_K = (G_{OП}(H_{OП} - H_{ПВ}) + G_{ПП}(H_{ЦСД} - H_{ЦВД}) + G_{нр}(H_B - H_{ПВ}) + G_{впр}(H_{ЦСД} - H_{впр})) \cdot 10^{-3}. \quad (15)$$

6. КПД брутто по прямому балансу

$$\eta_{бр}^{np} = \frac{Q_K \cdot 100}{B \cdot 7}, \quad (16)$$

где 7 – теплотворная способность условного топлива.

7. КПД брутто по обратному балансу

$$\eta_{бр}^{обр} = 100 - q_2 - q_5 - q_6, \quad (17)$$

где q_2 – потери с уходящими газами; q_5 – потери от химического недожога; q_6 – потери от наружного охлаждения.

Параметры q_5 , q_6 являются расчетными и определяются по результатам периодических химических анализов, не подлежащих автоматизации. Параметр q_2 определяется как

$$q_2 = (K \cdot \alpha_{yГ} + C) \left(t_{yГ} - \frac{\alpha_{yГ}}{\alpha_{yГ} + b} t_{XB} \right) (0,9805 + 0,00013 \cdot t_{yГ}) \cdot 10^{-2}, \quad (18)$$

где $K = 3,5$; $C = 0,6$; $b = 0,18$, значения коэффициентов K , C , b приведены для режима работы котла на газе; $\alpha_{yГ}$ – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах,

$$\alpha_{yГ} = \alpha_{PC} + \Delta_{прис}, \quad (19)$$

где α_{PC} – коэффициент избытка воздуха в режимном сечении; $\Delta_{прис}$ – коэффициент присоса воздуха на участке от режимного сечения до дымососов, определяется расчетным путем,

$$\alpha_{PC} = \frac{21}{21 - O_2}. \quad (20)$$

Исходное состояние автоматизированной системы измерения и регистрации технологических параметров энергоблока: все параметры, приведенные в табл. 1, измеряются с помощью автоматических регистраторов.

В табл. 2 приведены типы первичных и вторичных приборов, диапазоны измерения параметров, класс точности измерительных приборов. В колонке «Количество датчиков» указано, сколько датчиков используется для измерения параметра. Два датчика используется в случае, когда пар или другая среда транспортируется по двух ниткам. Этот коэффициент учитывается и при оценке весового коэффициента каждого из параметров: для температур и давлений весовой коэффициент делился на количество датчиков. Абсолютная погрешность для каждого датчика рассчитана исходя из класса точности прибора и диапазона измерения параметра.

Весовые коэффициенты рассчитывались согласно (2) путем дифференцирования по каждому из исходных параметров выражений (6)–(20). В случае, когда исходный параметр входил в несколько несвязанных выражений, в качестве весового коэффициента выбирался максимальный. Погрешность Δ_i^T , вносимая за счет периодичности сбора информации, для всех параметров принята равной нулю. Это можно сделать в данном случае, поскольку все параметры измеряются однотипно. Для параметра «Расход топлива» при расчете весового коэффициента сразу был учтен коэффициент перевода объемного газа в ТУТ. Вычисление весовых коэффициентов по температуре и давлению в тех выражениях, где они используются для расчета энтальпии, выполнялось по правилу дифференцирования сложной функции

$$\frac{dF(u(x))}{dx} = \frac{dF}{du} \cdot \frac{du}{dx}. \quad (21)$$

Результаты дифференцирования функции энтальпии приведены в табл. 3.

Таблица 2

Характеристики датчиков существующей системы

Параметр	Датчик	Диапазон	Класс точности	Количество датчиков	Абсолютная погрешность Δ_i^{old}	Весовой коэффициент w_i
V	ДМ/КСД2	0...63 тыс.м ³ /час	1,5	1	0,945 тыс.м ³ /час	1,643
t_{XB}	ТСП/КПМ1	-50...100 °С	0,5	2	0,5 °С	0,022
$t_{YГ}$	ТСП/КСМ2	0...300 °С	0,5	1	1,5 °С	0,037
O_2	МН/КСМ2	0...5 %	1,5	2	0,075 %	0,027
$G_{ПВ}$	ДМ/КСД2	0...800 т/час	1,5	1	12 т/час	0,237
$t_{ПВ}$	ТСП/КСМ2	0...300 °С	0,5	1	1,5 °С	0,481
$P_{ПВ}$	МЭД/КСД2	0...250 кгс/см ²	1,5	1	3,75 кгс/см ²	0,004
P_B	МЭД/КСД2	0...250 кгс/см ²	1,5	1	3,75 кгс/см ²	0,004
$G_{ОП}$	ДМ/КСД2	0...400 т/ч	1,5	2	6 т/час	0,942
$t_{ОП}$	ТП ХА/КСП2	0...600 °С	0,5	2	3 °С	0,071

Параметр	Датчик	Диапазон	Класс точности	Количество датчиков	Абсолютная погрешность Δ_i^{old}	Весовой коэффициент w_i
$P_{ОП}$	МЭД/КСД2	0...250 кгс/см ²	1,5	2	3,75 кгс/см ²	0,057
$t_{ЦВД}$	ТП ХА/КСП2	0...600 °С	0,5	2	3 °С	0,095
$P_{ЦВД}$	МЭД/КСД2	0...25 кгс/см ²	1,5	2	0,375 кгс/см ²	0,096
$t_{ЦСД}$	ТП ХА/КСП2	0...600 °С	0,5	2	3 °С	0,104
$P_{ЦСД}$	МЭД/КСД2	0...25 кгс/см ²	1,5	2	0,375 кгс/см ²	0,043
$G_{СН}$	ДМ/КСД2	0...40 т/час	1,0	1	0,4 т/час	0,825
$t_{СН}$	ТП ХА/КПП1	0...400 °С	0,5	1	2 °С	0,016
$P_{СН}$	МЭД/КСД2	0...16 кгс/см ²	1,0	1	0,16 кгс/см ²	0,025
$G_{ПВД}$	ДМ/КСД2	0...100 т/час	1,5	1	1,5 т/час	0,119
$G_{впр}$	ДМ/КСД1	0...80 т/час	1,5	1	1,2 т/час	0,687
$t_{впр}$	ТСП/КСМ2	0...300 °С	0,5	1	1,5 °С	0,062
$P_{впр}$	МЭД/КСД2	0...250 кгс/см ²	1,5	1	3,75 кгс/см ²	0,001
$G_{нпр}$	ДМ/КСД2	0...6,3 т/час	1,5	1	0,095 т/час	0,389
$t_{обр}$	ТСП/КПМ1	-50...100 °С	0,5	1	0,5 °С	0,520
$G_{СВ}$	ДМ/КСД2	0...630 т/час	1,5	1	9,45 т/час	0,033
$t_{нр}$	ТСП/КПМ1	-50...100 °С	0,5	1	0,5 °С	0,520
$t_{исх}$	ТСП/КПМ1	-50...100 °С	0,5	1	0,5 °С	0,030

Таблица 3

Значения производных энтальпии в точках контроля

№ точки	Обозначение параметра	Значение	$\frac{\partial H}{\partial t}$	$\frac{\partial H}{\partial P}$
4	$H_{ПВ}$	237,4	1,09	0,01
5	$H_{Б}$	622,1	0	-1
6	$H_{ОП}$	823,1	0,62	-0,26
7	$H_{ЦВД}$	732,2	0,57	-0,58
8	$H_{ЦСД}$	851,1	0,53	-0,22
10	$H_{СН}$	715,6	0,52	-0,78
12	$H_{впр}$	163,8	1,03	0,02

В табл. 4 приведены характеристики датчиков, выбранных для модернизации системы. Все датчики имеют унифицированный токовый выход и могут использоваться для подключения к современной АИИС ТП. Цены датчиков указаны ориентировочные, стоимость монтажных работ в представленном расчете не учитывалась. Стоимость работ по обслуживанию датчиков существующей и модернизируемой системы принята неизменной до и после модернизации.

Характеристики датчиков для модернизации системы

Параметр	Датчик	Диапазон	Основная приведенная погрешность	Абсолютная погрешность Δ_i^{new}	Цена датчика, тыс. руб.
V	Сапфир-22Р-ДД	0...63 тыс.м ³ /час	0,25	0,158 тыс. м ³ /час	47,5
t_{XB}	ТСМУ Метран-274	-50...100 °С	0,25	0,375 °С	2,3
$t_{YГ}$	ТСПУ Метран-276	0...300 °С	0,25	0,75 °С	3,1
O_2	ЕНДА-5000	0...5 %	1,0	0,05 %	120
$G_{ПВ}$	Сапфир-22Р-ДД	0...800 т/час	0,25	2 т/час	47,5
$t_{ПВ}$	ТСПУ Метран-276	0...300 °С	0,25	0,75 °С	3,1
$P_{ПВ}$	Метран-150ТG5	16...250 кгс/см ²	0,2	0,468 кгс/см ²	35,7
P_B	Метран-150ТG5	16...250 кгс/см ²	0,2	0,468 кгс/см ²	35,7
$G_{ОП}$	Сапфир-22Р-ДД	0...400 т/час	0,25	1 т/час	47,5
$t_{ОП}$	ТХАУ Метран-271	0...600 °С	0,5	3 °С	4,2
$P_{ОП}$	Метран-150ТG5	16...250 кгс/см ²	0,2	0,468 кгс/см ²	35,7
$t_{ЦВД}$	ТХАУ Метран-271	0...600 °С	0,5	3 °С	4,2
$P_{ЦВД}$	Метран-150ТG4	5...25 кгс/см ²	0,075	0,015 кгс/см ²	29,3
$t_{ЦСД}$	ТХАУ Метран-271	0...600 °С	0,5	3 °С	4,2
$P_{ЦСД}$	Метран-150ТG4	5...25 кгс/см ²	0,075	0,015 кгс/см ²	29,3
$G_{СН}$	Сапфир-22Р-ДД	0...40 т/час	0,25	0,1 т/час	47,5
$t_{СН}$	ТСПУ Метран-276	0...400 °С	0,25	1 °С	3,1
$P_{СН}$	Метран-150ТG4	5...16 кгс/см ²	0,075	0,008 кгс/см ²	29,3
$G_{ПВД}$	Сапфир-22Р-ДД	0...100 т/час	0,25	0,25 т/час	47,5
$G_{впр}$	Сапфир-22Р-ДД	0...80 т/час	0,25	0,2 т/час	47,5
$t_{впр}$	ТСПУ Метран-276	0...300 °С	0,25	0,75 °С	3,1
$P_{впр}$	Метран-150ТG5	16...250 кгс/см ²	0,2	0,468 кгс/см ²	35,7
$G_{тпр}$	Сапфир-22Р-ДД	0...6,3 т/час	0,25	0,016 т/час	47,5
$t_{обр}$	ТСМУ Метран-274	-50...100 °С	0,25	0,375 °С	2,3
$G_{СВ}$	Сапфир-22Р-ДД	0...630 т/час	0,25	1,575 т/час	47,5
$t_{нр}$	ТСМУ Метран-274	-50...100 °С	0,25	0,375 °С	2,3
$t_{исх}$	ТСМУ Метран-274	-50...100 °С	0,25	0,375 °С	2,3

Результаты решения задачи целочисленного программирования (4) представлены в табл. 5. Расчет проводился исходя из условий, что на первом этапе выделено 350 тыс. рублей (потрачено 349,5 тыс. рублей); на втором этапе выделено 400 тыс. рублей (потрачено 399,6 тыс. рублей). На третьем этапе задача уже не решалась: было принято решение заменить оставшиеся датчики (потрачено 292,5 тыс. рублей).

Этапы модернизации автоматизированной измерительной системы технологических параметров

Параметр	Описание параметра	№ этапа
B	Расход топлива, ТУТ/час	1
$t_{УГ}$	Температура уходящих газов, °С	1
$G_{ПВ}$	Расход питательной воды через ПВД, т/час	1
$t_{ПВ}$	Температура питательной воды, °С	1
$G_{ОП}$	Расход острого пара на ЦВД турбогенератора блока, т/час	1
$G_{СН}$	Расход пара на РОУ-С, т/час	1
$t_{СН}$	Температура пара после РОУ-С, °С	1
$G_{впр}$	Расход питательной воды на впрыск, т/час	1
$t_{впр}$	Температура питательной воды на впрыск, °С	1
$t_{обр}$	Температура обратной сетевой воды, °С	1
$G_{СВ}$	Расход сетевой воды через ПСВ, т/час	1
$t_{пр}$	Температура прямой сетевой воды, °С	1
$t_{ХВ}$	Температура холодного воздуха, °С	2
$P_{ПВ}$	Давление питательной воды, кгс/см ²	2
$P_{Б}$	Давление пара в барабане котла, кгс/см ²	2
$t_{ОП}$	Температура острого пара, °С	2
$P_{ОП}$	Давление острого пара, кгс/см ²	2
$P_{ЦВД}$	Давление пара на выходе из ЦВД, кгс/см ²	2
$P_{ЦСД}$	Давление пара на входе в ЦСД, кгс/см ²	2
$P_{СН}$	Давление пара после РОУ-С, кгс/см ²	2
$G_{ПВД}$	Расход пара на группу ПВД из 1, 2 отборов, т/час	2
$G_{пр}$	Расход питательной воды на непрерывную продувку, т/час	2
$t_{исх}$	Температура исходной воды, °С	2
O_2	Содержание кислорода в режимном сечении, %	3
$t_{ЦВД}$	Температура пара на выходе из ЦВД, °С	3
$t_{ЦСД}$	Температура пара на входе в ЦСД, °С	3
$P_{впр}$	Давление питательной воды на впрыск, кгс/см ²	3

Заключение

Предлагаемая методика может использоваться как при поэтапном внедрении АИС ТП, так и при решении более широкого класса проблем внедрения и модернизации программно-технических комплексов, направленных на решение сложных вычислительных задач в режиме реального времени и предусматривающих возможность поэтапного перехода на новые программно-аппаратные средства реализации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. И.М. Макарова,

- В.М. Лохина. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.
2. *Ядыкин И.Б.* Адаптивное интеллектуальное управление режимами крупных энергообъединений ЕС и России // Управление в технических системах: Мат. конф. (УТС-2010). – СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – С. 108-119.
 3. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В.* Теоретические и прикладные проблемы разработки и применения автоматизированных систем мониторинга состояния сложных технических объектов // Труды СПИИРАН. Вып. 1, том 1. – СПб: СПИИРАН, 2002. – С. 167-180.
 4. *Петров Ю.А., Шлимович Е.Л., Ирюпин Ю.В. и др.* Комплексная автоматизация управления предприятием. – М.: Финансы и статистика, 2001.
 5. *Бодягина А.А.* Решение задач автоматизации обработки и анализа технико-экономических показателей работы оборудования электростанций // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 7(28). – С. 118-122.
 6. *Бодягина А.А., Данилушкин И.А., Колпашиков С.А., Серенков В.Е.* Оптимальное планирование внедрения и модернизации автоматизированных измерительных систем в энергетических комплексах // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2013): Мат. VII Междунар. конф. 30 сент. – 2 окт. 2013 г., Москва: в 2 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук; под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Т. 1. Пленарные доклады, секции 1-3. – М.: ИПУ РАН, 2013. – С. 161-163.
 7. РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. – М.: Служба передового опыта ОРГРЭС, 1995.
 8. *Бодягина А.А., Данилушкин И.А.* Моделирование процесса сбора информации для расчета технико-экономических показателей генерирующих станций // Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. VIII Всеросс. науч. конф. с междунар. участием. Ч. 2: Моделирование и оптимизация динамических систем и систем с распределенными параметрами. Информационные технологии в математическом моделировании. – Самара: СамГТУ, 2011. – С. 29-31.

Статья поступила в редакцию 14 марта 2014 г.

OPTIMIZATION OF THE PHASED INTRODUCTION OF AUTOMATIC MEASURING SYSTEMS

A.A. Bodyagina¹, I.A. Danilushkin², S.A. Kolpaschikov², V.E. Serenkov²

¹ Strategic Business Systems
8, Volgskiy pr., Samara, 443071, Russian Federation

² Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The problem of optimal planning for introduction of the automatic measuring system of technological parameters taking into account restrictions on funding of each phase is discussed. As a result of solving the problem it is achieved the maximum accuracy of the calculation of technical and economic indicators of equipment at each stage. The setting of the problem takes into account the current state of the measuring system for the calculation of technical and economic indicators, the measurement error of existing and newly installed devices, the cost of the introduced system, the cost of maintenance of the existing system and the new system. An example is given of solving the problem of optimizing for the phased introduction of the automatic measuring system for the calculation of technical and economic indicators of power-generating unit.

Keywords: *optimal planning, automatic measuring system, phased introduction, technical and economic indicators, energy economy, power-generating unit*

*Antonina A. Bodyagina, Senior Specialist.
Ivan A. Danilushkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Sergey A. Kolpaschikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Viktor E. Serenkov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

УДК 536.3

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИСКРОЙ

А.Г. Егоров, А.С. Тизилов

Тольяттинский государственный университет
Россия, 445667, г. Тольятти, Самарская обл., ул. Белорусская, 14

На основе модели очагового теплового зажигания исследован процесс воспламенения турбулентного потока аэровзвеси частиц алюминия порошка марки АСД-4. Определены критический радиус очага зажигания и условие его формирования. На основании визуализации процесса развития очага зажигания рассмотрены особенности формирования очага зажигания в случае распространяющегося и затухающего пламени, а также влияние начальной турбулентности потока алюминиево-воздушной смеси на развитие очага зажигания. С помощью полученного значения размера критического очага зажигания определена минимальная энергия искрового разряда, необходимая для надежного воспламенения алюминиево-воздушной смеси, а также теоретически определена скорость распространения пламени, подтверждающаяся экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: *очаг зажигания, критический радиус очага, электроискровое зажигание, турбулентность, аэровзвесь частиц алюминия.*

В тепловой модели зажигания газовой смеси, предложенной Я.Б. Зельдовичем [1], искровой разряд приравнен к точечному, мгновенно действующему тепловому источнику и энергия, выделяемая искровым зарядом, нагревает до некоторой температуры сферический объем газа радиусом r . Накопленное в этом объеме тепло теплопроводностью передается окружающей смеси, вследствие чего температура в первоначально нагретом объеме снижается, а окружающей смеси – увеличивается.

Зажигание горючей газовой смеси искровым разрядом сводится к нагреванию некоторого сферического объема этой смеси, радиус которого r_{cr} должен превышать характерную ширину фронта ламинарного пламени δ_f :

$$r_{cr} \geq 3.7 \cdot \delta_f. \quad (1)$$

Это условие обеспечивает воспламенение окружающей смеси до момента остывания первоначального объема.

Данное условие (1) можно рассматривать только как качественную связь между мощностью источника воспламенения и параметрами горючей смеси. Полученное значение коэффициента пропорциональности указывает лишь на порядок этой величины ввиду допущений, принятых при выводе формулы. Поэтому окончательная оценка справедливости условия зажигания начального очага (1) может быть сделана только на основании экспериментальных исследований [2].

Таким образом, как и для газовой смеси, в турбулентном потоке

Александр Григорьевич Егоров (д.т.н.), профессор кафедры «Дизайн и инженерная графика».

Андрей Сергеевич Тизилов, аспирант.

аэровзвеси частиц алюминия зажигание сведется к нагреванию сферического объема, радиус которого должен превышать характерную ширину пламени δ_f .

В настоящей работе представлены результаты исследования процесса воспламенения турбулентного потока аэровзвеси частиц алюминия порошка марки АСД-4 на основе модели теплового очагового зажигания и выявлено влияние начальной турбулентности на развитие очага.

Схема экспериментального стенда, описание узлов и агрегатов установки, а также методика проведения испытаний представлены в работах [3, 4]. Отметим только, что рабочий участок представляет собой осесимметричный канал диаметром $D_{cb} = 0.04$ м с диаметром входного отверстия $d_o = 0.02$ м.

Начальная скорость потока аэровзвеси на входе в рабочий участок канала изменялась в пределах $U_o = 5 \div 50$ м/с.

Интенсивность турбулентности ε варьировалась от 5 до 22 % при помощи турбулизирующей решетки, которая устанавливалась на различных расстояниях от плоскости внезапного расширения.

Для визуализации процесса развития начального очага воспламенения в зоне рециркуляции при искровом зажигании турбулентного потока аэровзвеси частиц алюминия применялся оптический метод с использованием кинокамеры СКС-1М со скоростью съемки 600 кадров в секунду.

В качестве горючего использовался порошок алюминия марки АСД-4 ($d_{32} = 7.4$ мкм). Окислителем служил воздух с начальной температурой 293 К.

Наиболее удобным и достаточно удовлетворительным источником зажигания является электрический разряд, эффективно преобразующий электрическую энергию в тепло, которое концентрируется в относительно малом объеме. Поэтому для зажигания турбулентного потока аэровзвеси частиц алюминия использовалась электрическая свеча поверхностного разряда.

Результаты визуализации процесса развития очага зажигания показали, что на начальном этапе происходит увеличение размера очага, затем наблюдается либо взрывной рост очага в случае распространяющегося пламени (рис. 1б), либо полное угасание очага в случае затухающего пламени (рис. 1а).

Для обоих случаев зажигания на начальном этапе, при $\tau \approx 1.0 \cdot 10^{-3}$ сек, происходит формирование начального очага. Затем, в случае затухающего пламени (рис. 1а), размеры очага за время $\tau \approx 1.6 \div 3.2 \cdot 10^{-3}$ сек остаются постоянными, после чего угасают. В случае распространяющегося пламени (рис. 1б) при $\tau \approx 1.6 \cdot 10^{-3}$ сек размер очага остается неизменным ($r_h \approx 1$ мм), после чего происходит резкое увеличение начального очага и заполнение зоны рециркуляции при $\tau \approx 3.2 \cdot 10^{-3}$ сек. Далее при $\tau \approx 4.8 \cdot 10^{-3}$ сек пламя из зоны рециркуляции распространяется в основной поток алюминиево-воздушной смеси.

В обоих случаях постоянное значение размера начального очага зажигания ($r_h \approx 1$ мм) за период времени $\tau \approx 0 \div 1.6 \cdot 10^{-3}$ сек говорит о том, что скорость роста распространяющегося пламени равна нулю, а температура в центре очага практически не изменяется. Этот момент соответствует критическому состоянию очага. Такая особенность характерна для области вырожденного очагового взрыва [5].

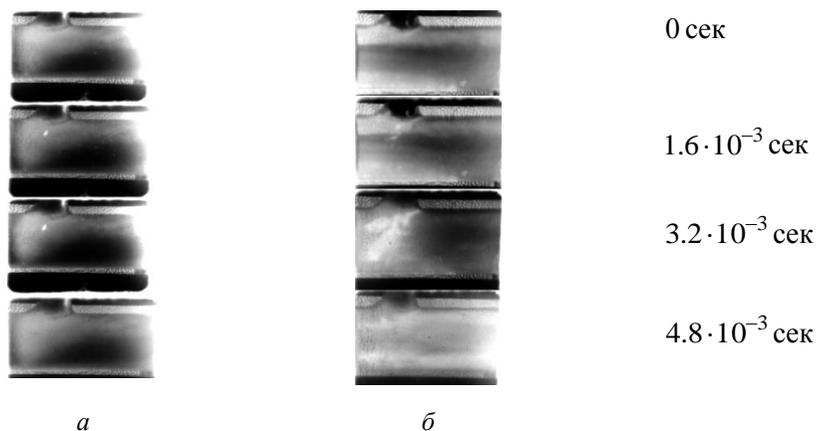


Рис. 1. Изменение начального очага зажигания:
 для затухающего (а) и распространяющегося (б) пламени.
 Порошок марки АСД-4 ($d_{32} = 7.4$ мкм); направление потока слева направо;
 $U_o = 50$ м/с; $T_o = 293$ К; $\varepsilon = 5\%$; $D_{cb} = 0.04$ м; $\alpha = 1.1$

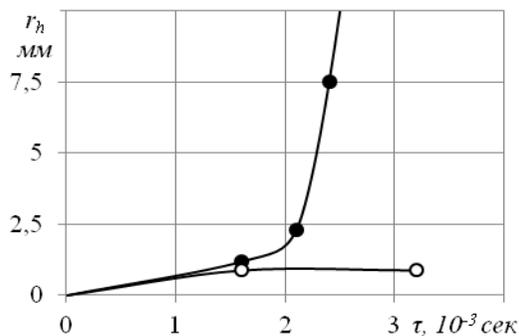


Рис. 2. Зависимость $r_h = f(\tau)$ для распространяющегося (кривая 1)
 и затухающего (кривая 2) пламени

На рис. 2 представлена зависимость $r_h = f(\tau)$ для затухающего (кривая 2) и распространяющегося (кривая 1) пламени. Из рисунка видно, что для частиц алюминия порошка АСД-4 с размером $d_{32} = 7.4$ мкм период индукции составляет $\tau \approx 2.0 \cdot 10^{-3}$ сек. Определенное в настоящей работе значение $\tau \approx 2.0 \cdot 10^{-3}$ сек согласуется с величиной периода индукции, полученной при воспламенении аэрозвеси порошка алюминия марки АСД-4 за отраженными ударными волнами в атмосфере чистого кислорода [6].

Таким образом, чтобы воспламенить аэрозвесь частиц алюминия порошка марки АСД-4 в зоне рециркуляции электрической искрой, критический радиус очага должен быть $r_{cr} \geq 1$ мм. При этом можно предположить, что ближайшие частицы алюминиево-воздушной смеси успеют воспламениться прежде, чем нагретый искрой начальный очаг остынет. Учитывая, что для порошка алюминия $\delta_f = 2 \cdot 10^{-3}$ м [7], условие Я.Б. Зельдовича (1) для аэрозвеси частиц алюми-

ния порошка марки АСД-4 запишется следующим образом: $r_{cr} \geq 0.5 \cdot \delta_f$.

Поведение начального очага зависит от того, будет ли скорость выделения тепла в процессе горения превосходить скорость теплоотвода в окружающую среду вследствие излучения и турбулентной диффузии. Поскольку теплоотвод от очага осуществляется посредством турбулентной диффузии, а его интенсивность определяется величиной пульсационной скорости, необходимо установить влияние начальной турбулентности на процесс развития начального очага в зоне рециркуляции.

Влияние начальной турбулентности на развитие очага зажигания для порошка марки АСД-4 представлено на рис. 3.

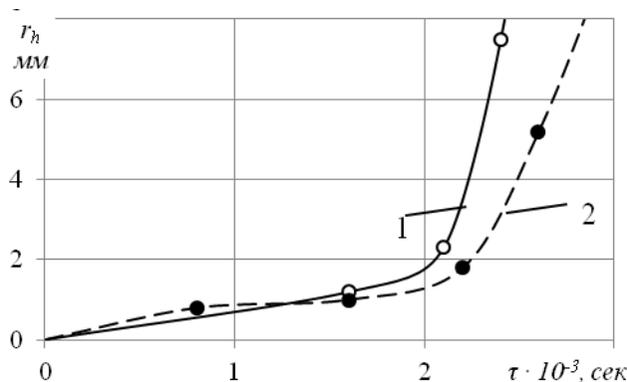


Рис. 3. Влияние начальной турбулентности на развитие очага зажигания для порошка марки АСД-4: 1 – $\varepsilon = 5\%$; 2 – $\varepsilon = 22\%$

На первой стадии процесса зажигания ($\tau \approx 1.3 \cdot 10^{-3}$ сек) наблюдается положительное влияние турбулентности на рост очага за счет увеличения интенсивности тепломассообменных процессов, протекающих на поверхности частицы и приводящих к увеличению скорости химической реакции. На второй стадии ($\tau \approx 1.5 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-3}$ сек) турбулентность снижает скорость развития начального очага за счет интенсивного теплоотвода из зоны реакции.

Полученное значение радиуса критического очага можно использовать для расчета минимальной энергии искрового разряда E_{min} . Согласно Я.Б. Зельдовичу [1], создание очага горения, способного к распространению в аэровзвесах частиц алюминия, так же как и в газозвудушных смесях, будет обусловлено равенством его диаметра ширине зоны горения δ_f . Соответственно, E_{min} должна обеспечить нагрев определенного объема аэровзвеси радиусом r_{cr} , пропорциональным ширине фронта пламени, от начальной температуры T_o до температуры горения T_b [1].

$$E_{min} = \delta_f^3 \cdot c_p \cdot \rho \cdot (T_b - T_o), \quad (2)$$

где c_p – теплоемкость аэровзвеси при постоянном давлении;

ρ – плотность аэровзвеси (1782 кг/м³) [8].

Расчет минимальной энергии по формуле (2) показал, что для воспламенения аэровзвеси частиц алюминия марки АСД-4 минимальное значение энергии искры

должно составлять 0,026 Дж, что соответствует экспериментально полученному значению энергии воспламенения 0,025 Дж [9].

Полученное значение радиуса критического очага зажигания можно также использовать для определения начальной скорости распространения пламени [10]:

$$(dx/dt)_o = (2 \div 3) \cdot 10^3 \cdot a/d, \quad (3)$$

где a – температуропроводность воздуха ($8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$);

d – диаметр очага зажигания.

Начальная скорость распространения пламени, рассчитанная по формуле (3) для взвеси частиц алюминия марки АСД-4, составляет 80÷120 м/сек. Данный диапазон скорости распространения пламени согласуется с диапазоном значений 40÷160 м/сек, полученным в ходе исследования нестационарного распространения пламени взвеси частиц алюминия в каналах [11].

В результате проведенных исследований определен критический радиус очага при электроискровом зажигании потока взвеси частиц алюминия марки АСД-4, изучена динамика процесса и установлено влияние начальной турбулентности на развитие очага в зоне рециркуляции.

Полученные результаты можно использовать для разработки средств пожаробезопасности при расчете минимальной энергии зажигания потока взвеси частиц алюминия в трубопроводе с переменным сечением; для уточнения существующих математических моделей воспламенения взвеси частиц алюминия в турбулентном потоке воздуха; для организации процесса зажигания порошкообразного алюминия в камерах сгорания перспективных энергетических и технологических установок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б. и др.* Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980.
2. *Щетинков Е.С.* Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 740 с.
3. *Егоров А.Г., Иванов С.В., Малинин В.И.* Исследование зажигания потока газовой взвеси на основе модели очагового теплового воспламенения // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т. 46. – № 3. – С. 1-6.
4. *Егоров А.Г.* Искровое зажигание газовой взвеси в турбулентном потоке // Химическая физика. – 2006. – Т. 25. – № 1. – С. 74-78.
5. *Буркина Р.С., Князева А.Г.* Исследование очагового теплового воспламенения и режима его вырождения // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т. 28. – № 3. – С. 3-8.
6. *Бойко В.М., Лотов В.В., Папырин А.Н.* Воспламенение газовой взвеси металлических порошков в отраженных УВ // Физика горения и взрыва. – 1989. – Т. 25. – № 2. – С. 67-74.
7. *Виленский Т.В., Хзмалян Д.М.* Динамика горения пылевидного топлива. – М.: Энергия, 1978.
8. *Крюков А.Ю.* Адаптация внутрикамерных процессов и элементов конструкции прямоточных воздушно-реактивных двигателей на порошковом горючем для конверсионного использования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05. / Пермь: Пермск. гос. техн. ун-т, 2003. – 18 с.
9. *Корольченко А.Я.* Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. – М.: Химия, 1986. – 216 с.
10. *Барзыкин В.В.* Тепловые режимы экзотермических реакций. – Черногоровка.: Энергия, 2004. – 311 с.
11. *Шевчук В.Г., Кондратьев Е.Н., Бойчук Л.В. и др.* Нестационарное распространение пламени в газовой взвеси твердых горючих // Физика аэродисперсных систем. – 1985. – Вып. 27. – 70 с.

Статья поступила в редакцию 16 октября 2013 г.

IGNITION TURBULENT FLOW AEROSUSPENSION ALUMINUM PARTICLES ELECTRICAL SPARKS

A.G. Egorov , A.S. Tizilov

Togliatti State University

14, Str. Belaruskaya, Togliatti, Samara region, 445667, Russian Federation

Based on the model of focal thermal ignition investigated the ignition process of turbulent flow aerosuspension aluminum particles powder ASD -4. The critical radius of the hot spot and the condition of its formation. Based on the visualization of the development process are considered a hot spot features: formation of a hot spot in the case of propagating and evanescent flame effect of the initial turbulence aluminum- air mixture on the development of a hot spot. Using the obtained values of the critical size of a hot spot defined minimum spark energy required for reliable ignition of aluminum- air mixture, and theoretically determined the rate of flame propagation is confirmed by experimental studies.

Keywords: *ignition hearth, critical radius, electric spark ignition, turbulence, aerosuspension aluminum particles.*

УДК 536. 2 (075)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЛЬЯТТИНСКИХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

С.В. Колесников

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: totig@yandex.ru

Разработана и построена математическая и компьютерная модель тольяттинских тепловых сетей, в которой учтены реальные длины и диаметры трубопроводов, отметки высот расположения оборудования, шероховатости труб, нагрузки в тепловых камерах и прочее. Модель позволяет определять давления, расходы и скорости течения теплоносителя в любой точке теплосети, а также потери напора и затраты электроэнергии на транспорт теплоносителя, представляя теплосеть как единую сложную разветвленную гидравлическую систему с учетом всех взаимосвязей между ее элементами. Выполненные исследования позволили сделать заключение о том, теплосеть ТОТЭЦ работает не в оптимальном режиме. В частности, перекрытые задвижки находятся в зоне наиболее высоких скоростей течения среды, что создает значительные дополнительные гидравлические сопротивления, приводящие к существенному снижению перепада давлений между прямой и обратной магистралями. По результатам проведенных на модели исследований были сделаны рекомендации по разработке оптимальных режимов работы теплосети, по ее реконструкции и построению новых участков.

Ключевые слова: *теплосеть, компьютерная модель, законы Кирхгофа, теория графов, идентификация модели, эпюры давления.*

При выполнении расчетов сложных разветвленных многокольцевых гидравлических сетей, запитываемых от нескольких источников, эффективным направлением оказывается применение компьютерных моделей, которые позволяют практически полностью воспроизводить протекающие в сетях гидравлические процессы, рассматривая их как единые целые гидравлические системы. Такие модели позволяют определять давления, расходы, скорости течения среды, потери напора, расход энергии на перемещение среды и прочее. Решение подобных задач какими-либо другими средствами для указанного вида гидравлических сетей в настоящее время не представляется возможным.

В основу построения компьютерной модели положены два закона Кирхгофа, применяемые при расчетах электрических сетей. Использование этих законов при расчетах гидравлических сетей обосновывается полной аналогией процессов протекания тока в проводниках и жидкости в трубопроводных гидравлических системах [1].

В качестве конкретного примера найдем распределение расходов в сети, которая состоит из одного кольца (рис. 1), имеющего три ответвления. Расходы по участкам кольца a, b, c, d обозначим через Q_a, Q_b, Q_c, Q_d , а по ответвлениям – через Q_1, Q_2, Q_3 . Требуется найти распределение расходов по участкам a, b, c, d

Сергей Владимирович Колесников (к.т.н.), докторант кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика».

при заданном расходе Q на входе в кольцо. Расходы воды по ответвлениям от кольца Q_1, Q_2, Q_3 известны, а их сумма равна расходу Q на входе в кольцевую сеть $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$.

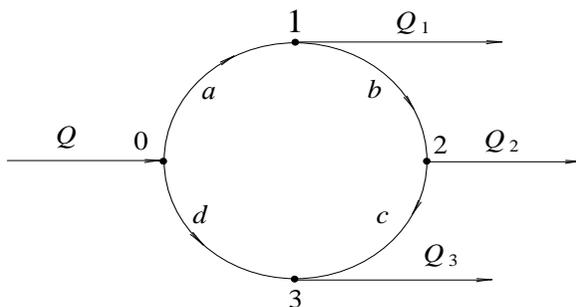


Рис. 1. Схема кольцевой сети

При выполнении расчетов примем следующие допущения: 1) приток воды в узел будем считать положительным, а отток из узла – отрицательным; 2) потерю напора для воды, протекающей в контуре по часовой стрелке, считаем положительной, а против часовой стрелки – отрицательной.

Первый закон Кирхгофа в применении к расчету гидравлических систем устанавливает равенство притока и оттока среды в каждом узле сети, т. е. требуется выполнение уравнения баланса расходов

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0, \quad (1)$$

где n – число трубопроводов, соединяющихся в узле;

Q_i ($i = \overline{1, n}$) – расходы среды по всем трубопроводам, соединяющимся в данном узле.

Согласно второму закону Кирхгофа сумма напоров для любого замкнутого контура равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n H_i = \sum_{i=1}^n S_i Q_i^2 = 0, \quad (2)$$

где S_i ($i = \overline{1, n}$) – гидравлическое сопротивление i -го участка;

Q_i ($i = \overline{1, n}$) – расходы среды на i -том участке.

Используя уравнения (1), (2), на основе итеративного метода расчета можно найти распределение расходов по всем участкам сети при известном расходе Q , заданном на входе в кольцо. На первом шаге итерации задается произвольное распределение расходов среды на каждом участке кольца, т. е. задаются значения Q_a, Q_b, Q_c, Q_d . Тогда для узлов 0, 1, 2 из первого закона Кирхгофа находим:

$$Q_b = Q_2 + Q_c; \quad Q_d = Q - Q_a; \quad Q_a = Q_1 + Q_b.$$

В записи уравнения Кирхгофа для узла под номером 3 нет необходимости, т. к. расход $Q_3 = Q_d + Q_c$ может быть найден, если будут известны значения расходов по всем другим участкам сети.

По второму закону Кирхгофа на основе принятых расходов по всем участкам кольца найдем величину невязки напоров, т. е.

$$\delta H = \sum_{i=1}^4 S_i Q_i^2 = S_a Q_a^2 + S_b Q_b^2 + S_c Q_c^2 - S_d Q_d^2. \quad (3)$$

Если величина невязки δH будет положительной, то это означает, что перегружены участки, в которых направление движения жидкости осуществляется по часовой стрелке, и недогружены участки, где направление движения противоположное.

Для приближения невязки напоров δH к нулю введем в расчет поправочный (увязочный) расход δQ . Этот расход должен вычитаться из величины расхода на перегруженных участках и добавляться – на недогруженных участках. Величину увязочного расхода δQ можно найти из соотношения (3), положив $\delta H = 0$. Полагая, что невязка напоров, полученная из (3), положительна, величину увязочного расхода δQ найдем из соотношения

$$S_a (Q_a - \delta Q)^2 + S_b (Q_b - \delta Q)^2 + S_c (Q_c - \delta Q)^2 - S_d (Q_d + \delta Q)^2 = 0. \quad (4)$$

Если пренебречь членами, содержащими $(\delta Q)^2$, как величинами относительно малыми, то соотношение (4) относительно увязочного расхода δQ будет представлять алгебраическое линейное уравнение. Его решение

$$\delta Q = \delta H / \left(2 \sum_{i=1}^n S_i Q_i \right), \quad (5)$$

где $\sum_{i=1}^n S_i Q_i = S_a Q_a + S_b Q_b + S_c Q_c + S_d Q_d$ – величина всегда положительная.

Знаки δQ и δH всегда должны быть одинаковыми.

На первом шаге итеративного расчета примем следующие произвольные расходы по участкам кольцевой сети:

$$Q_a = 50 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_b = 35 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_c = 10 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_d = 10 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Применяя формулу (3), находим

$$\delta H = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 50^2 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot 35^2 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot 10^2 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot 10^2 = 0,1535 \text{ м}.$$

Величину увязочного расхода найдем по формуле (5)

$$\delta Q = 0,1535 / \left[2 \cdot \left(5 \cdot 10^{-5} \cdot 50 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot 35 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot 10 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot 10 \right) \right] = 17,47 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

На втором шаге итерации расходы по участкам кольцевой сети будут

$$Q_a = 32,53 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_b = 17,53 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_c = -7,47 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_d = 27,47 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Знак расхода Q_c в данном случае оказывается отрицательным:

$$Q_c = 10 - 17,47 = -7,47 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Это означает, что принятое на первом шаге итерации направление движения среды следует сменить на противоположное, т. е. действительное направление

движения здесь против часовой стрелки. Тогда расход на данном участке можно будет принять положительным.

В данном случае получаем $\delta H = 0,024408 м$; $\delta Q = 3,32 м^3/ч$.

Уточняя расходы по участкам, находим

$$Q_a = 29,21 м^3/ч; Q_b = 14,21 м^3/ч; Q_c = 10,79 м^3/ч; Q_d = 30,79 м^3/ч.$$

По формулам (3) и (5) находим значения δH и δQ третьего шага итерации $\delta H = 0,0074 м$; $\delta Q = 1,1 м^3/ч$.

По результатам третьей итерации уточняем расходы по участкам кольцевой сети:

$$Q_a = 28,11 м^3/ч; Q_b = 13,11 м^3/ч; Q_c = 11,89 м^3/ч; Q_d = 31,89 м^3/ч.$$

Выполняя проверку уравнения первого закона Кирхгофа для 1-го, 2-го и 3-го узлов сети, находим

$$Q_1 = Q_a - Q_b = 28,11 - 13,11 = 15 м^3/ч;$$

$$Q_2 = Q_b + Q_c = 13,11 + 11,89 = 25 м^3/ч;$$

$$Q_3 = Q_d - Q_c = 31,89 - 11,89 = 20 м^3/ч.$$

Таким образом, уже на третьем шаге итерации получены расходы по участкам кольцевой сети, удовлетворяющие заданным расходам для абонентов Q_1, Q_2, Q_3 с точностью до второго знака после запятой.

В случае многокольцевых разветвленных гидравлических сетей реализация изложенного алгоритма расчета потокораспределения возможна лишь с использованием вычислительной техники. Однако прежде чем ею воспользоваться, необходимо создать компьютерную модель процесса потокораспределения в гидравлической сети. Как уже указывалось выше, в основу построения такой модели положены два закона Кирхгофа, формулируемых в виде соотношений (1), (2), а также теория графов [2-7], согласно которой создается «дерево» теплосети.

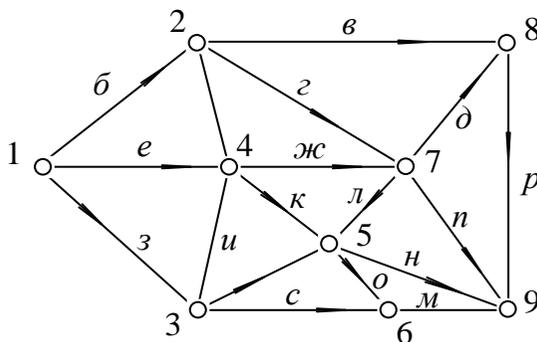


Рис. 2. Граф теплосети

Графическая интерпретация графа дана на рис. 2. Здесь цифрами 1, 2, 3, ..., 9 обозначены вершины графа, а буквами а, б, в, ... – его дуги. Применительно к гидравлической сети вершины графа интерпретируют точки соединения трубопроводов, а дуги – участки трубопроводных систем. «Дерево» теплосети посред-

ством графа строится так, чтобы из его вершины (точка 1 – корень дерева) можно было достигать любой другой вершины графа (точки теплосети). Таким образом осуществляется рассмотрение тепловой сети как единой гидравлической системы, все участки которой взаимосвязаны. Тем самым удается удовлетворить закону Паскаля и уравнению неразрывности потока. Для описания алгоритмов расчета используется специальная нумерация вершин и дуг «дерева». Каждая вершина (узел) характеризуется номером (именем), геодезической отметкой высоты расположения, величиной притока или оттока среды и др. Каждая дуга графа имеет следующие характеристики: номер (имя), длина и диаметр труб, коэффициент гидравлического сопротивления и другие параметры.

Соотношений (3), (5) формально достаточно для построения замкнутой системы уравнений относительно неизвестных расходов в ветвях сети и давлений в ее узлах. Ввиду итеративного алгоритма расчета применительно к сложным кольцевым сетям возникают проблемы сходимости итераций. Наиболее распространен в расчетной практике благодаря относительно быстрой сходимости метод поконтурной увязки перепадов давлений. Принципиально его содержание сводится к следующему.

1. Задается некоторое начальное приближение для расходов на всех ветвях расчетной многоконтурной схемы.

2. Вычисляются потери давления на всех ветвях и их суммарные невязки во всех независимых контурах.

3. По выявленным невязкам определяются величины так называемых контурных «увязочных расходов».

4. Каждый увязочный расход «проводится» по всем ветвям своего контура алгебраическим суммированием с расходами, принятыми по начальному приближению.

Расходы, полученные на последнем этапе, используются в качестве очередного приближения для начала следующей итерации вплоть до совпадения (в пределах заданной погрешности) значений всех или части искомых величин.

Таким образом, для построения компьютерной модели гидравлической системы используется полная информация об объекте. Таким путем строится модель с паспортными характеристиками оборудования. Однако реальные характеристики объекта могут существенно отличаться от паспортных. Поэтому с целью максимального приближения построенной модели к реальной системе выполняется ее идентификация. Для этого используются экспериментальные данные по расходам и давлениям среды в различных точках гидравлической системы. Для того чтобы приблизить модель к реальной системе, гидравлические сопротивления отдельных участков модели изменяют таким образом, чтобы получаемые из расчета на модели результаты как можно меньше отличались от экспериментальных значений параметров. Процесс идентификации является итеративным, и в модели он автоматизирован. Точность идентификации зависит от точности и количества экспериментальных данных.

После выполнения идентификации можно считать, что компьютерная модель реальной теплосети построена. Такая модель позволяет выполнять практически любое число вычислительных экспериментов применительно к данной теплосети.

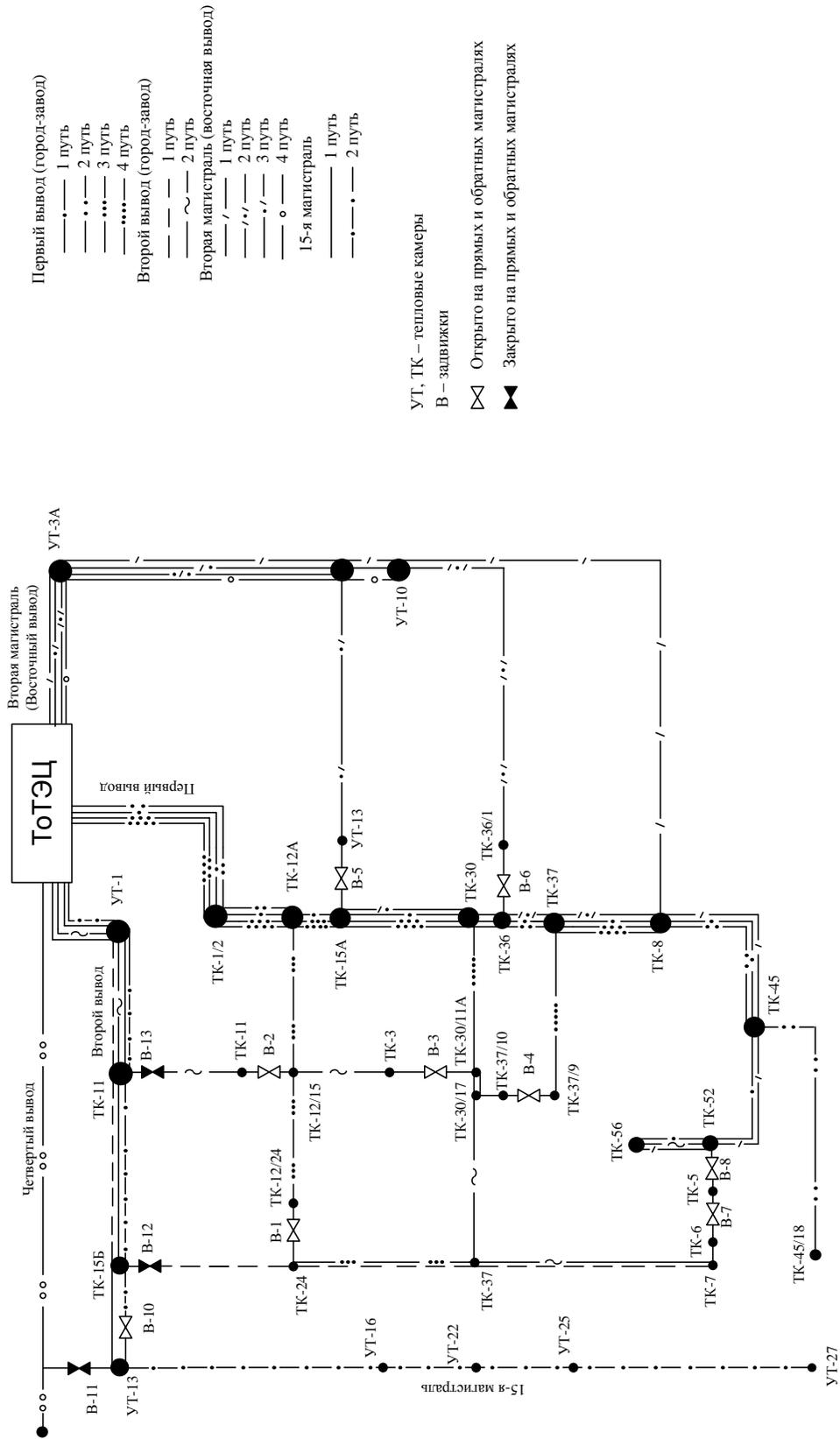


Рис. 3. Схема теплосети г. Тольятти, запитываемой от Тольяттинской ГЭЦ (ТотЭЦ)

Важным преимуществом модели является возможность проведения любых изменений в сети с целью устранения имеющихся проблем (изменение диаметров трубопроводов, открытие или закрытие задвижек, изменение характеристик насосов и проч.), что позволяет оперативно принять меры по изменению текущего режима, а также выбрать наилучшие варианты реконструкции теплосети. Модель позволяет оценить способность теплосети принять дополнительную перспективную нагрузку, а также выполнить проектирование ее новых участков или тепловыводов.

Принципиальная схема теплосети г. Тольятти, запитываемой от Тольяттинской ТЭЦ, дана на рис. 3. Теплосеть содержит пять выводов: первый вывод (имеет четыре пути); второй вывод (два пути); вторая магистраль – восточный вывод (четыре пути); четвертый вывод (один путь); 15-я магистраль (два пути). Каждый путь содержит прямую и обратную магистраль.

Выполненные на модели расчеты показали, что принятая в ТоТС система распределения потоков по отдельным участкам теплосети, а также по выводам в целом является далеко не оптимальной (рис. 4, 5). Наблюдающиеся на эпюрах резкие скачки давлений в точках, где находятся закрытые задвижки, свидетельствуют о том, что данная задвижка является препятствием (гидравлическим сопротивлением) на пути потока, – если ее открыть, то через задвижку будет наблюдаться поток, расход и скорость которого будут определяться величиной скачка давления. В реальном состоянии наибольшее сопротивление в сети (и соответствующие потери напора) создают закрытые задвижки В-4 (см. рис. 5), В-8 (см. рис. 4), В-3 (см. рис. 5). Как следует из приведенных эпюр, такие задвижки создают проблемы в виде недостаточного располагаемого перепада давлений между прямой и обратной магистралями, повышенных давлений в обратных трубопроводах ввиду их перегрузки по количеству протекающей по ним жидкости.

С целью уменьшения гидравлических сопротивлений и, следовательно, потерь напора в сети на модели был выполнен расчет для случая, когда все задвижки в теплосети открыты, – будем называть такой режим работы оптимальным (см. рис. 6, 7). Сравнив полученные результаты с результатами расчетов реального режима (см. рис. 4, 5), можно обнаружить их существенное отличие. В частности, в оптимальном варианте оказываются снятыми проблемы, связанные с недостаточным перепадом давлений между прямой и обратной магистралями. Отсюда можно сделать вывод, что принятая в ТоТС система распределения теплоносителя в сети с помощью закрытых задвижек не является оптимальной и лишь усугубляет соответствующие проблемы в тепловых сетях.

Проведенные на модели исследования показали, что в оптимальном режиме работы несмотря на то, что при всех открытых задвижках появляются закольцованные участки сети, застойные зоны в них не наблюдаются. Это связано с тем, что в зонах с малыми скоростями течения теплоносителя диаметры трубопроводов относительно малы ($\varnothing 250$), а нагрузки в тепловых камерах относительно велики (не менее 7 т/ч). В связи с этим скорость течения теплоносителя на любых участках не опускается ниже 5,5 см/сек.

В оптимальном режиме работы происходит существенное перераспределение расходов на входах тепловыводов (соотношение давлений на них поддерживается таким же, как и в реальном режиме). И, в частности, устанавливаются следующие их величины: первый вывод 4571 т/ч; второй 4462 т/ч; восточный 1664 т/ч. Это связано с тем, что жидкость течет по тем путям, где имеются наименьшие сопротивления для ее движения.

На компьютерной модели были проведены исследования различных вариантов подключения 15-й магистрали к тепловыводам ТоТЭЦ и тепловым сетям ТоТС (см. рис. 3). При этом рассмотрено три варианта: 1) подключение 15-й магистрали ко второму выводу ТоТЭЦ (камера ТК-15б) в случае, когда этот вывод не отключается от ТоТС (задвижки В-12, В-13 открыты); 2) вариант подключения ко второму выводу в случае, когда он работает только на 15-ю магистраль (задвижки В-12, В-13 закрыты); 3) вариант подключения 15-й магистрали к 4-му выводу ТоТЭЦ (задвижка В-11 открыта, а В-10 закрыта).

При подключении 15-й магистрали ко второму выводу ТоТЭЦ рассмотрены два варианта задания нагрузки: 1) $G=375$ т/ч, когда загружена только перемычка между вторым выводом и 15-й магистралью (задвижка В-10 закрыта, В-12, В-13 открыты); 2) $G=1350$ т/ч, когда работает вся 15-я магистраль (задвижка В-10 открыта). В этом варианте рассмотрено два случая: первый случай – когда второй вывод от ТоТС отключен (задвижки В-12, В-13 открыты), и второй случай – когда второй вывод не отключается от ТоТЭЦ и работает только на 15-ю магистраль (задвижки В-12, В-13 закрыты).

На графиках рис. 8, 9 (реальный режим) и рис. 10, 11 (оптимальный режим) приведены результаты расчетов для случая, когда 15-я магистраль имеет нагрузку 1350 т/ч. В этом варианте расчета второй вывод ТоТЭЦ с присоединенной к нему 15-й магистралью (задвижка В-10 открыта) не отделяется от тольяттинских тепловых сетей (задвижки В-12, В-13 открыты, см. рис. 3). Анализ результатов расчетов позволяет заключить, что в реальном режиме работы (см. рис. 8, 9) как 15-я магистраль, так и все выводы ТоТС практически неработоспособны. В оптимальном режиме ситуация существенно улучшается. Пересечение эюр прямого и обратного трубопроводов наблюдается лишь на 15-й магистрали. На ряде путей выводов имеет место недостаток располагаемого перепада давлений, который легко может быть устранен изменением давления на входах в магистрали. Результаты расчетов для случая, когда на прямой линии давление повышено на $1,6$ кгс/см², а на обратной понижено на $0,6$ кгс/см² (отношение давлений $p_1/p_2=13,2/2,0$ кгс/см²), даны на рис. 10, 11. Их анализ позволяет заключить, что за исключением 15-й магистрали все остальные пути всех тепловыводов вполне работоспособны, и даже с некоторым запасом по принятию дополнительной перспективной нагрузки. Недостаточный располагаемый перепад давлений в 15-й магистрали, а также повышенное давление в обратном трубопроводе (более 60 м) можно устранить двумя путями.

Первый путь – установка понизительной насосной в районе камеры УТ-13 (см. рис. 3). Анализ результатов расчетов позволяет заключить (см. рис. 12), что 15-я магистраль в этом случае будет работоспособна, однако располагаемый перепад давлений на участке от ТК-15б до УТ-13 приближается к минимально допустимой величине (20 м) и составляет 22 м, а давление в обратном трубопроводе этого участка приближается к максимально допустимой величине (60 м) и составляет 58 м. Лучшим вариантом было бы размещение понизительной насосной в районе камеры ТК-15б второго вывода ТоТЭЦ. Указанные выше проблемы в этом случае были бы сняты. Однако такой вариант размещения понизительной насосной не позволяет использовать ее в случае, когда 15-я магистраль будет подключена к 4-му выводу ТоТЭЦ. В то же время размещение понизительной насосной в районе камеры УТ-13 предполагает ее использование при работе 15-й магистрали как со вторым, так и с четвертым выводом ТоТЭЦ.

Второй путь – увеличение диаметров трубопроводов второго вывода (первый путь) ТоТЭЦ на участке от ТК-15б до УТ-6 и от УТ-1 до ТК-15б.

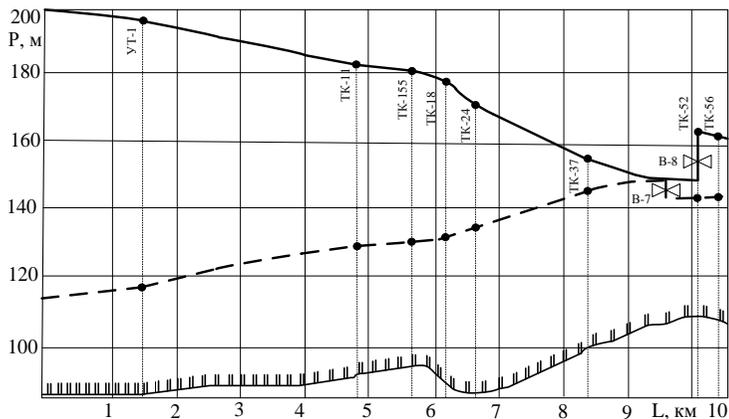


Рис. 4. Второй вывод, первый путь. Реальное состояние. Задвижка В-7 закрыта на обратной, В-8 – на прямой магистрали

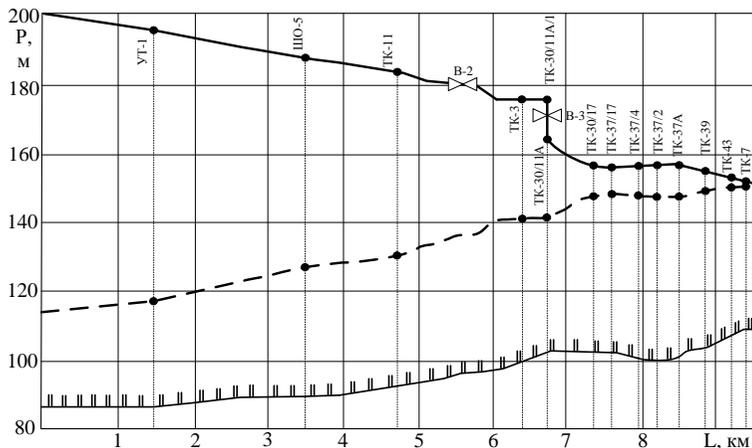


Рис. 5. Второй вывод, второй путь. Реальное состояние. Задвижка В-3 закрыта на прямой магистрали

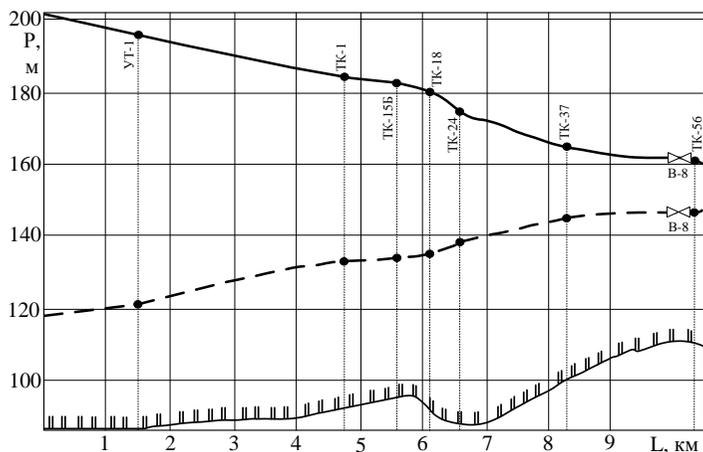


Рис. 6. Второй вывод, первый путь. Оптимальный вариант

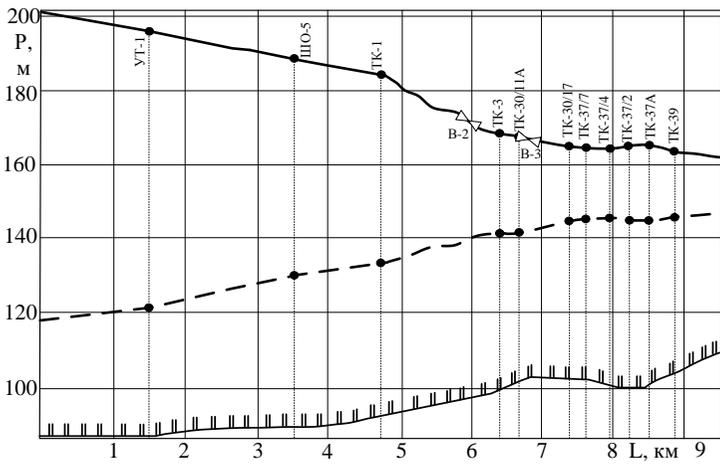


Рис. 7. Второй вывод, второй путь. Оптимальный вариант

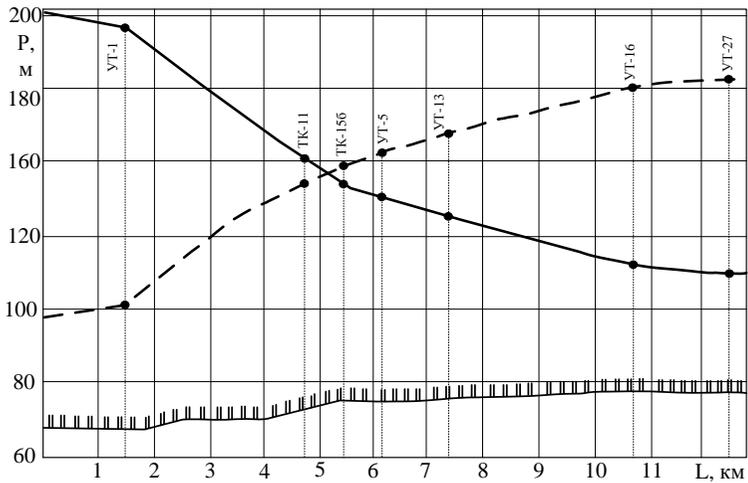


Рис. 8. 15-я магистраль, второй путь ($G = 1350$ т/ч). Реальное состояние. Задвижки В-10, В-12, В-13 открыты

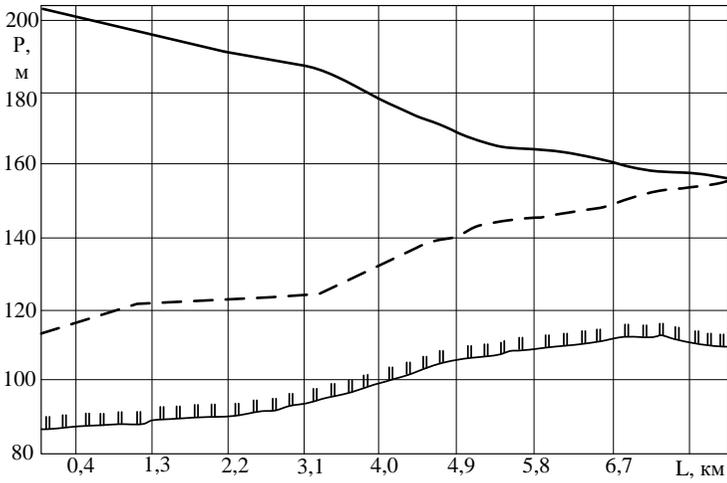


Рис. 9. Первый вывод, первый путь. Реальное состояние. Присоединена 15-я магистраль с нагрузкой $G = 1350$ т/ч. Задвижки В-10, В-12, В-13 открыты

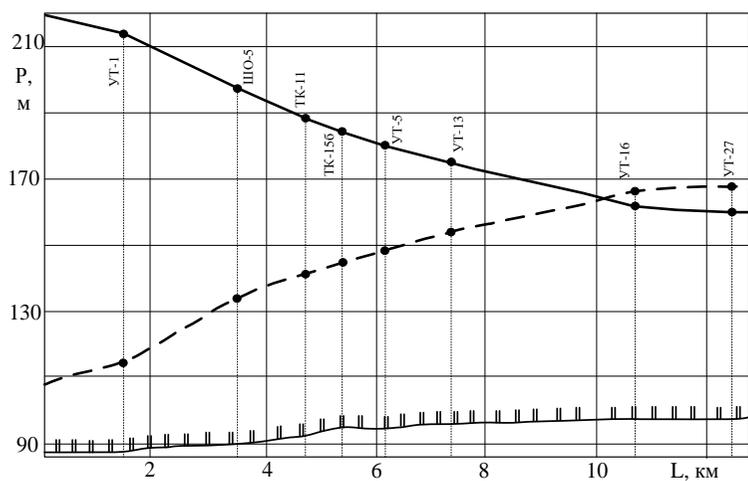


Рис. 10. 15-я магистраль, второй путь ($G = 1350$ т/ч). Оптимальный вариант. Давление на выводах изменено – $13,2/2,0$ кгс/см². Задвижки В-10, В-12, В-13 открыты

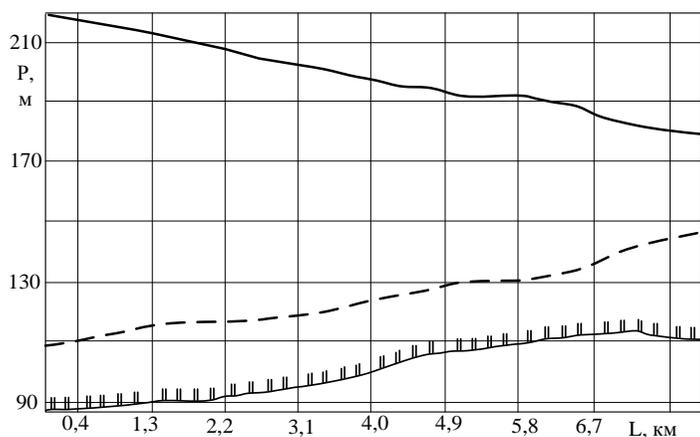


Рис. 11. Первый вывод, первый путь. Оптимальный вариант. Присоединена 15-я магистраль с нагрузкой $G = 1350$ т/ч. Давление на выводах изменено – $13,2/2,0$ кгс/см². Задвижки В-10, В-12, В-13 открыты

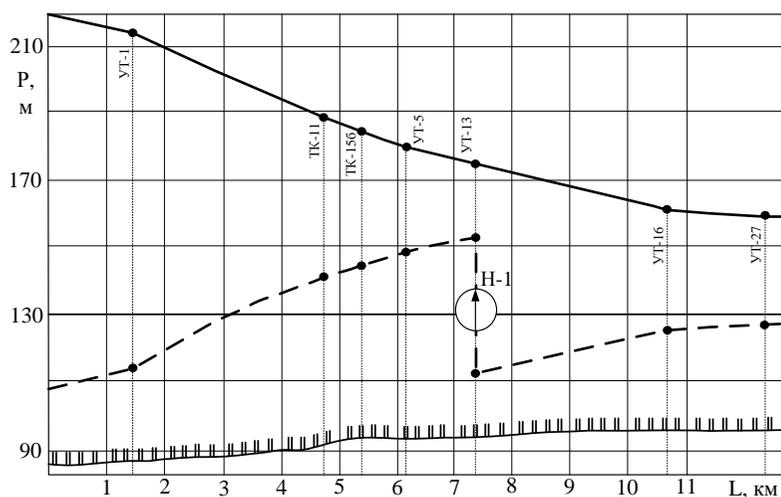


Рис. 12. 15-я магистраль, второй путь. Оптимальный вариант. Давление на выводах изменено – $13,2/2,0$ кгс/см². Задвижки В-10, В-12, В-13 открыты. Установлена понижительная насосная станция Н-1

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 360 с.
2. Абрамов Н.Н. Теория и методика расчета системы подачи и распределения воды. – М.: Стройиздат, 1972. – 286 с.
3. Меренков А.П., Сеннова Е.В., Сумарокова С.В. и др. Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения. – Новосибирск: ВО Наука, Сиб. издат. фирма, 1992. – 407 с.
4. Зыков А.А. Теория конечных графов. – Новосибирск: Наука, СО, 1969. – 543 с.
5. Коваленко А.Г., Туева Н.С. Система синтеза и анализа гидравлических сетей. – М.: Вычисл. центр АН СССР, 989. – 70 с.
6. Кудинов В.А., Коваленко А.Г., Колесников С.В., Панамарев Ю.С. Разработка компьютерной модели и исследование режимов работы циркуляционной системы Новокуйбышевской ТЭЦ-2 // Изв. АН. Энергетика. – 2001. – № 6. – С. 118-124.
7. Колесников С.В., Дикоп В.В., Томкин С.Н., Кудинов В.А. Исследование гидравлических режимов работы циркуляционной системы Тольяттинской ТЭЦ на компьютерной модели // Изв. вузов СНГ. Энергетика. – 2002. – № 6. – С. 90-95.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2014 г.

RESEARCH OF TOL'JATTI HS ON COMPUTER MODELS

S.V. Kolesnikov¹

Samara State Technical University
224, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The computer and math model of HS Togliatti, that takes into account religie lengths and diameters of pipelines, elevation of arrangement of the equipment, the roughness of the pipe load in thermal cameras, etc., was constructed and it allows to determine speeds, costs and pressures of environment in all areas of the network at any point HS and also head loss and the cost of the power plant on the transport of coolant, considering it as a unified whole ramified hydraulic system, taking into consideration all of the relationship between its elements. According to the results on the model of research, recommendations were made for the development HS optimum modes operation, reconstruction and construction its new sites.

Keywords: *computer model, graph theory, Kirchhoff's laws, heating system (HS), pressures digrams.*

Sergey V. Kolesnikov (Ph.D. (Techn.)), Doctoral Student.

УДК 621.785, 669.14, 519.6

ДВУМЕРНАЯ ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО ПО ТИПОВЫМ КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СКВОЗНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА¹

Ю.Э. Плишивцева, А.В. Попов, А.И. Дьяконов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Объектом управления является процесс индукционного нагрева металлических полуфабрикатов перед последующими операциями пластической деформации. Сформулированы и решены задачи оптимального по типовым критериям качества управления процессом нагрева с чебышевской оценкой конечных температурных состояний. Параметрическая оптимизация алгоритмов оптимального по быстродействию, точности нагрева и расходу энергии управления проведена с помощью альтернативного метода оптимизации систем с распределенными параметрами, разработанного в СамГТУ. В качестве примеров рассматриваются решения поставленных задач оптимального управления процессами индукционного нагрева массивных цилиндрических алюминиевых заготовок. В оптимизационную процедуру интегрирована двумерная численная модель взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей, построенная на базе специализированного конечно-элементного пакета Cedrat FLUX.

Ключевые слова: индукционный нагрев, оптимальное управление, быстродействие, точность, минимум расхода энергии, альтернативный метод, численная модель, взаимосвязанные электромагнитные и тепловые поля, Cedrat FLUX.

Введение

В настоящее время традиционные и инновационные технологии, в которых применяется индукционный нагрев, заняли прочное место в различных отраслях промышленности. В последние три-четыре десятилетия индукционные нагревательные установки (ИНУ) находят все более широкое применение на практике благодаря ряду преимуществ перед нагревательными агрегатами других типов: возможности интенсивного высокоскоростного локального нагрева, эффективности применения в массовом производстве, повторяемости процесса и его гарантированному качеству, сравнительной простоте автоматизации, высокой степени надежности, пониженным затратам на обслуживание и эксплуатацию, встраиваемости в общую технологическую линию, экологической безопасности, компактности и др.

Промышленные процессы сквозного индукционного нагрева металлических заготовок до требуемой температуры по всему объему нагреваемых тел широко используются для термообработки металлов перед последующими технологиче-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части Государственного задания (код проекта № 1436).

Юлия Эдгаровна Плишивцева (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Управление и системный анализ в теплоэнергетике».

Антон Валерьевич Попов, магистрант.

Артем Игоревич Дьяконов, магистрант.

скими операциями пластической деформации при ковке, штамповке, прокатке, прессовании и т. д.

Актуальность решения задач оптимального управления (ЗОУ) процессами сквозного индукционного нагрева напрямую связана с постоянно возрастающей потребностью в повышении экономической эффективности и конкурентоспособности производственных процессов. Проблема достижения предельных качественных показателей процессов нагрева может быть решена с помощью оптимизации режимов работы и конструктивных характеристик периодических ИДУ по соответствующим критериям оптимальности.

1. Модельные ЗОУ процессом индукционного нагрева

Процесс индукционного нагрева цилиндрических заготовок перед обработкой давлением, рассматриваемый в качестве объекта управления с распределенными параметрами (ОРП), в самом общем виде может быть описан взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье:

$$\operatorname{curl} \bar{H} = \sigma(T) \bar{E} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}; \quad \operatorname{curl} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}; \quad \operatorname{div} \bar{B} = 0; \quad \operatorname{div} \bar{E} = 0; \quad (1)$$

$$c(T) \gamma(T) \frac{\partial T(r, l, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) r \frac{\partial T(r, l, t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial l} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(r, l, t)}{\partial l} \right) + \frac{1}{\sigma(T)} \left(\frac{\partial H(r, l, t)}{\partial r} \right)^2, \quad (2)$$

где \bar{H} – вектор напряженности магнитного поля; $\sigma(T)$ – электрическая проводимость; T – температура; \bar{E} – вектор напряженности электрического поля; \bar{D} – вектор плотности электрического потока; t – время; \bar{B} – вектор плотности магнитного потока; $\gamma(T)$, $c(T)$, $\lambda(T)$ – соответственно удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности нагреваемого металла; \bar{V} – вектор скорости перемещения заготовки; $r \in [0; R]$ и $l \in [0; L]$ – соответственно радиальная и продольная пространственные координаты, R – радиус заготовки, L – длина заготовки.

Уравнение (2) с соответствующими краевыми условиями описывает температурное распределение $T(r, l, t)$ по объему нагреваемого тела, которое рассматривается в качестве распределенной функции состояния ОРП [1, 2].

Поскольку основной целью процесса нагрева является получение заданных температурных кондиций, в большинстве практических случаев требования к конечному состоянию объекта формулируются с помощью задания максимально допустимой величины ε отклонения температурного распределения $T(r, l, t)$ в конечный момент процесса нагрева $t = t^0$ от заданного температурного распределения $T^*(r, l)$:

$$\max_{r \in [0, R]; l \in [0, L]} |T(r, l, t^0) - T^*(r, l)| \leq \varepsilon. \quad (3)$$

Условие (3) означает, что в конце процесса нагрева температура в каждой точке по объему нагреваемого тела должна отличаться от требуемого значения не более чем на величину ε .

В качестве сосредоточенного управляющего воздействия рассмотрим напряжение индуктора $u(t)$, которое связано нелинейной функцией

$f(H(r,l,t), T(r,l,t))$, определяемой по сопротивлениям схемы замещения «индуктор – металл», с напряженностью $H(r,l,t)$ магнитного поля на поверхности нагреваемого тела, которая, в свою очередь, может быть получена в результате решения электромагнитной задачи. Ограничение на управляющее воздействие $u(t)$ задается в виде диапазона его возможного изменения, в пределах допустимых границ $u_{\min} = 0$ и $u_{\max} = const$:

$$u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}, t \in (0; t^0). \quad (4)$$

В каждой конкретной производственной ситуации необходимо произвести обоснованный выбор критерия оптимальности работы ИНУ. Применительно к установившимся режимам работы типовые критерии качества учитывают такие основные характеристики ИНУ, как производительность, качество продукции, энергетические затраты.

В случае, когда требуется обеспечить максимальную производительность ИНУ при заданных температурных кондициях нагреваемых изделий, в качестве критерия оптимальности выступает критерий быстродействия, минимизирующий длительность процесса нагрева t^0 :

$$I_1 = \int_0^{t^0} dt = t^0 \rightarrow \min. \quad (5)$$

При необходимости достижения равномерных структурных свойств материала заготовки по ее объему и наименьшего разброса температурных кондиций заготовок от одного цикла обработки к другому достижение максимальной точности нагрева при наличии резерва времени обеспечивает критерий, который может быть представлен в следующем виде:

$$I_2 = \max_{r \in [0, R]; l \in [0, L]} |T(r, l, t^0) - T^*(r, l)| \rightarrow \min. \quad (6)$$

Во многих случаях основную статью себестоимости процессов нагрева представляют энергетические затраты (расход энергии на нагрев), которые в этом случае и следует рассматривать в роли критерия оптимальности, представляемого в интегральной форме:

$$I_3 = \int_0^{t^0} P(t) dt \rightarrow \min, \quad (7)$$

где $P(t)$ – закон изменения во времени потребляемой ИНУ мощности.

Рассмотрим наиболее простой идеализированный вариант ЗОУ с полным объемом информации об ОРП и предъявляемым к нему требованиям, считая, что возмущающие воздействия отсутствуют, и не учитывая период транспортировки изделия к деформирующему оборудованию и технологические ограничения. Тогда можно сформулировать следующую общую постановку ЗОУ.

Требуется найти такой алгоритм изменения управляющего воздействия $u_{onm}(t)$ во времени, который обеспечивает перевод рассматриваемого ОРП, функция состояния которого $T(r, l, t)$ описывается уравнениями (1)-(2) с соответствующими краевыми условиями, из заданного начального состояния в требуемое конечное состояние $T^*(r, l)$ с допустимой абсолютной точностью ε , со-

гласно (3), при минимально возможном значении выбранного критерия оптимальности из набора (5)-(7) в условиях заданных ограничений на управляющее воздействие вида (4). Для простоты будем далее считать начальное температурное состояние равномерным, принимая $T(r,l,0) = T_0(r,l) \equiv T_0 = const$, $r \in [0, R]$; $l \in [0, L]$.

Рассмотрим возможные постановки и методики решения задач оптимального по критериям (5)-(7) управления процессом индукционного нагрева металлических заготовок цилиндрической формы перед последующей обработкой давлением.

Задача оптимального по быстродействию управления

Данная задача, представляющая собой простейшую, но характерную и представительную ЗОУ ПИНМ, может быть сформулирована следующим образом. Требуется найти такой закон изменения во времени оптимального управляющего воздействия $u_{onm}(t)$, стесненного ограничением (4), который обеспечивает за минимально возможное время перевод объекта из заданного начального состояния в требуемое конечное $T^*(r,l)$ с заданной точностью ε , согласно (3), в условиях моделирования температурного поля уравнениями (1)-(2).

Используя методы теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, можно показать [3-5], что в рамках сформулированной нелинейной задачи оптимальное по быстродействию управление $u_{onm}(t)$, $t \in [0, t^0]$ есть релейная функция времени t , принимающая попеременно только свои предельно допустимые, согласно (4), значения u_{max} и $u_{min} \equiv 0$, и, следовательно, оптимальный процесс состоит из чередующихся интервалов нагрева с максимальной интенсивностью и последующего выравнивания температур:

$$u_{onm}(t) = \frac{u_{max}}{2} \left[1 + (-1)^{S+1} \right], \quad t_{S-1} < t < t_S, \quad s = \overline{1, N}. \quad (8)$$

Число $N \geq 1$ интервалов управления однозначно определяется заданной точностью нагрева ε и возрастает с уменьшением ε , а оптимальное управление заведомо задается с точностью до числа N и длительностей $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N$ указанных интервалов, конкретные значения которых изначально неизвестны и должны быть найдены в процессе последующего расчета. Тем самым задача оптимального по быстродействию управления параметризуется, т. е. сводится к поиску параметров $\Delta = (\Delta_i)$, $i = \overline{1, N}$, однозначно характеризующих искомое управление $u_{onm}(t)$, которое можно теперь записать следующим образом:

$$u_{onm}(t) = \frac{u_{max}}{2} \left[1 + (-1)^{j+1} \right], \quad \sum_{i=1}^{j-1} \Delta_i < t < \sum_{i=1}^j \Delta_i, \quad j = \overline{1, N}. \quad (9)$$

При управляющем воздействии вида (9) температурное поле в конце процесса нагрева при $t = t^0$ в любой точке по объему заготовки при заданной начальной температуре и известных тепловых потерях зависит только от величин Δ_i , $i = 1, 2, \dots, N$, т. е. $T(r,l,t^0)$ описывается зависимостью $T(r,l,\Delta)$ от переменных r , l и Δ .

Тогда условие (3) достижения заданных конечных температурных кондиций записывается в виде

$$\Phi(\Delta) = \max_{r \in [0; R]; l \in [0; L]} |T(r, l, \Delta) - T^*| \leq \varepsilon_0. \quad (10)$$

Дальнейшая задача сводится к определению таких длительностей $\Delta_i, i = 1, N$, чередующихся интервалов нагрева и выравнивания температур, которые обеспечивают выполнение условия (10) за минимально возможное время, очевидно, равное сумме всех Δ_i . Тогда в роли критерия оптимальности выступает эта сумма:

$$I(\Delta) = \sum_{i=1}^N \Delta_i \rightarrow \min_{\Delta} \quad (11)$$

В итоге исходная задача оптимального по быстродействию управления сводится к задаче математического программирования (ЗМП) на минимум целевой функции (11) N переменных Δ_i с бесконечным числом ограничений, записываемых в форме требования (10), предъявляемого к конечному температурному состоянию ОРП, описываемому уравнениями (1)-(2).

В свою очередь ЗМП (10)-(11) может быть решена с помощью альтернативно-го метода оптимизации ОРП применительно к моделям конкретных технологических ПИНМ рассматриваемого класса.

Задача на максимум точности нагрева

Одним из типовых критериев оптимизации, наряду с критерием быстродействия, является точность достижения за заданное время требуемых конечных температурных кондиций, которая оценивается по абсолютному отклонению ε результирующего температурного распределения от требуемой температуры, согласно (3).

В данной задаче требуется найти такой закон изменения во времени оптимального управляющего воздействия $u_{opt}(t)$, стесненного ограничением (4), который обеспечивает нагрев заготовки от начальной температуры до состояния, соответствующего минимальному значению критерия (6), за заданное время процесса t^0 в условиях моделирования температурного поля уравнениями (1)-(2).

Можно доказать [1, 2], что в задаче на максимум абсолютной точности нагрева за заданное время параметризованное оптимальное управление имеет вид (9), как и в задаче быстродействия. В итоге эта задача сводится к ЗМП

$$I(\Delta) = \max_{\substack{r \in [0; R] \\ l \in [0; L]}} |T(r, l, \Delta) - T^*| \rightarrow \min_{\Delta}; \Phi(\Delta) = \sum_{i=1}^N \Delta_i = \tilde{t}^0 \quad (12)$$

на минимум целевой функции $I(\Delta)$ с ограничением на $\Phi(\Delta)$, решение которой совпадает с решением задачи (10)-(11) [1-2].

Задача на минимум расхода энергии

Одним из важнейших критериев оптимизации является расход энергии (7) на нагрев заготовок до заданной температуры с заданной точностью. Аналогично приведенным выше постановкам задач оптимального быстрогодействия и максимальной точности нагрева, задача оптимального по расходу энергии управления ПИНМ может быть сформулирована следующим образом.

Требуется найти такой закон изменения во времени оптимального управляющего воздействия $u_{opt}(t)$, стесненного ограничением (4), который позволяет получить в конце процесса нагрева требуемое распределение температуры $T^*(r, l)$ с заданной точностью ε , согласно (3), при минимально возможном значении критерия (7) в условиях моделирования ОРП уравнениями (1)-(2).

Необходимые условия оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина [1, 2] устанавливают односторонний («двухпозиционный») характер оптимальных управлений по мощности внутреннего тепловыделения периодически процессами индукционного нагрева по критериям быстрогодействия и энергозатрат. Данный вывод может быть распространен на рассматриваемую двумерную нелинейную задачу [6], т. е. оптимальным по расходу энергии при заданной точности ε будет алгоритм управления $u_{opt}(t)$ такого же вида, как и для оптимального по быстрогодействию процесса, с чередующимися интервалами нагрева при максимальной мощности и отключения индуктора от источника питания. При этом в целом ряде ситуаций управляющим воздействиям вида (9) в задачах оптимального по быстрогодействию и по расходу энергии управления соответствуют различные длительности Δ_i , $i = 1, 2, \dots, N$, и числа N интервалов постоянства.

Для рассматриваемой задачи при использовании управляющего воздействия вида (9) критерий (7) превращается в сумму длительностей всех нечетных интервалов управления (вместо суммы (11) длительностей всех интервалов в задаче оптимального быстрогодействия) [1-2].

Тогда условия достижения заданных конечных температурных кондиций (10) в совокупности с критерием оптимальности приводят к следующей ЗМП:

$$I_{\ominus}(\Delta) = \sum_{i=1,3,5,\dots,N_1}^{N_1} \Delta_i \rightarrow \min_{\Delta}; \quad \Phi(\Delta) = \max_{l \in [0; R]; y \in [0; L]} |T(l, y, \Delta) - T^*(r, l)| \leq \varepsilon. \quad (13)$$

Зависимости $T(r, l, \Delta)$ от l , r и Δ в задачах (10)-(11), (12), (13) могут быть найдены с помощью численных двумерных электротепловых моделей ПИНМ, либо в линейном приближении в явной аналитической форме разложения $T(r, l, \Delta)$ в ряд по собственным функциям соответствующей краевой задачи.

К виду ЗМП (10)-(11), (12), (13) приводится и целый ряд других параметризуемых задач оптимизации процессов индукционного нагрева металла [1-2]. При этом, во-первых, параметры Δ_i , однозначно характеризующие искомые управляющие воздействия, могут приобретать самый различный физический смысл применительно к особенностям каждой конкретной задачи. Во-вторых, в зависимости от содержательной характеристики вектора Δ изменяются зависимости температурного поля от данного вектора, определяемые с помощью моделей объекта различного уровня сложности в соответствующем классе управлений. Кроме того, применительно к выбранным критериям оптимальности видоизме-

няются выражения для целевых функций, которые могут существенно усложниться по сравнению с вариантами (5)-(7).

Принципиальная общая специфика подобных задач сводится к необходимости учета ограничения вида (4), диктуемого требованиями к конечным температурным кондициям, или (и) к необходимости минимизации целевой функции аналогичного типа, как, например, в задаче (12). Эти особенности приводят к большим математическим трудностям при расчетах оптимальных ПИНМ, сводимых к решению подобного рода ЗМП.

Известные формальные способы поиска таких решений традиционно осуществлялись лишь с помощью достаточно сложных специальных численных методов общего характера, никак не связанных с конкретным содержанием задачи. К настоящему времени разработан новый конструктивный метод решения подобных задач, в значительной степени опирающийся на физические свойства исследуемых объектов и открывающий на этом основании большие возможности построения достаточно простых и эффективных инженерных методик расчета оптимизируемых процессов [1, 2].

2. Параметрическая оптимизация алгоритмов управления с помощью альтернансного метода

Задачи математического программирования (10)-(11), (12), (13), к которым редуцируются сформулированные в разделе 1 модельные задачи оптимального по типовым критериям качества (5)-(7) управления, могут быть решены с помощью альтернансного метода параметрической оптимизации ОРП. Данный метод опирается на качественные свойства температурных состояний оптимальных ПИНМ, подобные известным в математике свойствам наилучших равномерных приближений заданных функций к нулю [1, 2].

Поскольку альтернансный метод и базирующиеся на нем вычислительные процедуры детально описаны в литературе [1, 2, 7-12], ограничимся рассмотрением специфики применения метода в рамках рассматриваемых ЗОУ в условиях описания процесса нагрева двумерными нелинейными моделями.

Оптимальное управление, являющееся решением одной из сформулированных задач, отличается в каждом рассматриваемом случае от всех других N -интервальных управлений вполне определенными длительностями $\Delta_1^0, \Delta_2^0, \dots, \Delta_N^0$ интервалов постоянства, совокупность которых и является решением одной из ЗМП (10)-(11), (12), (13).

Оптимальному значению Δ^0 вектора Δ отвечает, в свою очередь, пространственное распределение температур $T(r, l, \Delta^0)$ в конце оптимального процесса, которое должно удовлетворять соответствующим ограничениям и критерию оптимальности рассматриваемой задачи.

В теории альтернансного метода доказано [1-2], что температурное распределение $T(r, l, \Delta^0)$ отличается от всех других конечных состояний $T(r, l, \Delta)$ при $\Delta \neq \Delta^0$ рядом свойств, на которых и базируется альтернансный метод.

Основное свойство результирующего распределения $T(r, l, \Delta^0)$ состоит в том, что число K точек $x_j^0 = \{r_j^0, l_j^0\}$ по объему нагреваемой заготовки, в которых достигаются предельные допустимые абсолютные отклонения ε конечной температуры $T(r, l, \Delta^0)$ от требуемой T^* , всегда оказывается не меньшим числа N

искомых параметров оптимального процесса. Другими словами, если решение рассматриваемой оптимальной задачи сводится к определению N параметров, однозначно характеризующих оптимальный процесс нагрева, то в конечный момент времени всегда найдутся такие K точек $x_j^0 = \{r_j^0, l_j^0\}$, $0 \leq r_1^0 < r_2^0 < \dots < r_R^0 \leq R$; $0 \leq l_1^0 < l_2^0 < \dots < l_L^0 \leq L$, для которых выполняется следующая система соотношений:

$$\begin{aligned} |T(r_j^0, l_j^0, \Delta^0) - T^*| &= \varepsilon, \quad j = 1, 2, \dots, K; \quad \Delta^0 = (\Delta_1^0, \Delta_2^0, \dots, \Delta_N^0); \\ \frac{\partial T(r_i^0, l_i^0, \Delta^0)}{\partial l} &= \frac{\partial T(r_i^0, l_i^0, \Delta^0)}{\partial r} = 0; \quad i = 1, 2, \dots, K_1 < K; \quad (r_i^0, l_i^0) \in \{r_j^0, l_j^0\} \\ K &= \begin{cases} N, & \text{если } \varepsilon_{\min}^{(N)} < \varepsilon < \varepsilon_{\min}^{(N-1)}; \\ N + 1, & \text{если } \varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(N)}. \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь $\varepsilon_{\min}^{(N)}$ – предельно достижимые отклонения результирующей температуры от заданной в классе управляющих воздействий с N интервалами постоянства, составляющие ряд неравенств:

$$\varepsilon_{\min}^{(1)} > \varepsilon_{\min}^{(2)} > \dots > \varepsilon_{\min}^{(N)} > \varepsilon_{\min}^{(N+1)} > \dots > \varepsilon_{\min}^{(N^*)} = \varepsilon_{\inf} \geq 0, \quad (15)$$

где ε_{\inf} – предельно достижимая точность нагрева в классе кусочно-постоянных управлений вида (9) с любым числом интервалов постоянства.

Для рассматриваемого класса моделей число интервалов постоянства N оптимального управления однозначным образом связывается с заданным значением ε правилом:

$$N = S \text{ для всех } \varepsilon: \varepsilon_{\min}^{(S)} \leq \varepsilon = \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(S-1)}. \quad (16)$$

Основные особенности решения задач с двумерными моделями процессов нагрева связаны со сложным характером пространственной конфигурации двумерных температурных полей в конце оптимального процесса, отличающейся многовариантными комбинациями расположения по объему нагреваемого тела точек $x_j^0 = \{r_j^0, l_j^0\}$ с предельными отклонениями конечной температуры от заданной T_k^* . Отбор претендентов на роль точек x_j^0 в базовых соотношениях (14) альтернансного метода должен производиться в пределах поперечных сечений цилиндра, а для поиска самих сечений, в границах которых расположены эти точки, следует ввести в качестве дополнительных неизвестных их координаты $\{r_j^0, l_j^0\}$ в расчетные системы уравнений альтернансного метода.

При выполнении для температурного распределения в конце оптимального процесса нагрева основных свойств (14) здесь уже нельзя сформулировать правило знакопереключения отклонений $T(r, l, \Delta^0)$ от заданной температуры T^* в подобном одномерному случаю виде. Процедура опознания координат точек x_j^0 и знаков температурных отклонений в этих точках приводит к существенным особенностям вычислительного алгоритма определения оптимальных управляющих воздействий, который описан в [1-2, 6, 12].

Указанные свойства (14), аналогии с одномерной задачей, а также непрерывный характер зависимостей Δ^0 и $T(r, l, \Delta^0)$ от ε и физические свойства нестационарных температурных полей в ПИНМ в задаче быстрогодействия приводят к возможности построения в каждой из рассматриваемых ЗОУ систем уравнений, замкнутых относительно искомым параметров процесса. Решение данных систем приводит к решению исходных ЗОУ.

3. Результаты решения задач параметрической оптимизации на базе численной двумерной FLUX модели

Рассмотрим решение сформулированных задач оптимального по типовым критериям качества управления процессом сквозного индукционного нагрева на частоте 50 Гц алюминиевых цилиндрических слитков диаметром 500 мм и длиной 1000 мм до температуры 450°C. Конструктивные параметры индуктора, состоящего из 69 витков, и цилиндрической заготовки показаны на рис. 1.

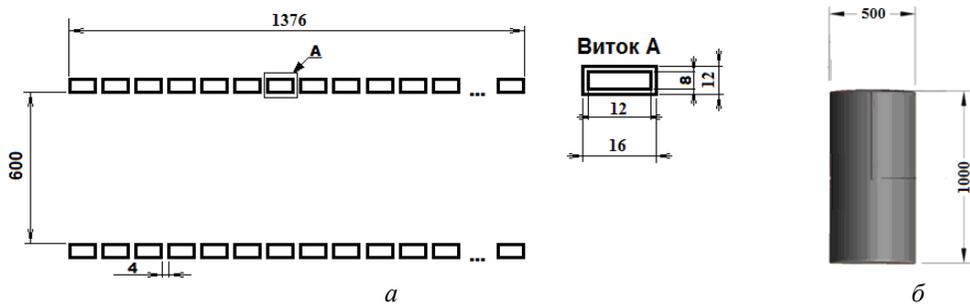


Рис. 1. Конструктивные параметры индуктора и заготовки, мм:
a – геометрия индуктора; *б* – геометрия заготовки

Конечно-элементный анализ взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей в процессе периодического индукционного нагрева проводится на базе специализированного пакета FLUX (Cedrat), в котором разработана численная двумерная электротепловая модель [13-14].

Теплофизические свойства алюминия проиллюстрированы графическими зависимостями на рис. 2а. Коэффициент лучистого теплообмена – 0,3, коэффициент конвективного теплообмена – 20. На рис. 2б представлено разбиение конечно-элементной сеткой нагревательной системы «индуктор – заготовка», заданной конструктивными параметрами, представленными на рис. 1.

Ограничение на управляющее воздействие $u(t)$ задается в простой форме допустимых границ $u_{\min} = 0$ и $u_{\max} = 470В$ диапазона его возможного изменения, в пределах которого управление может изменяться произвольным образом.

Решение задач оптимального по быстродействию и точности нагрева управления

Поскольку решение задачи (12) оптимального по точности нагрева управления определяется однозначным образом по решениям ряда задач оптимального быстрогодействия для различных значений ε , полученные ниже алгоритмы управления являются оптимальными одновременно по двум рассматриваемым критериям (5) и (6).

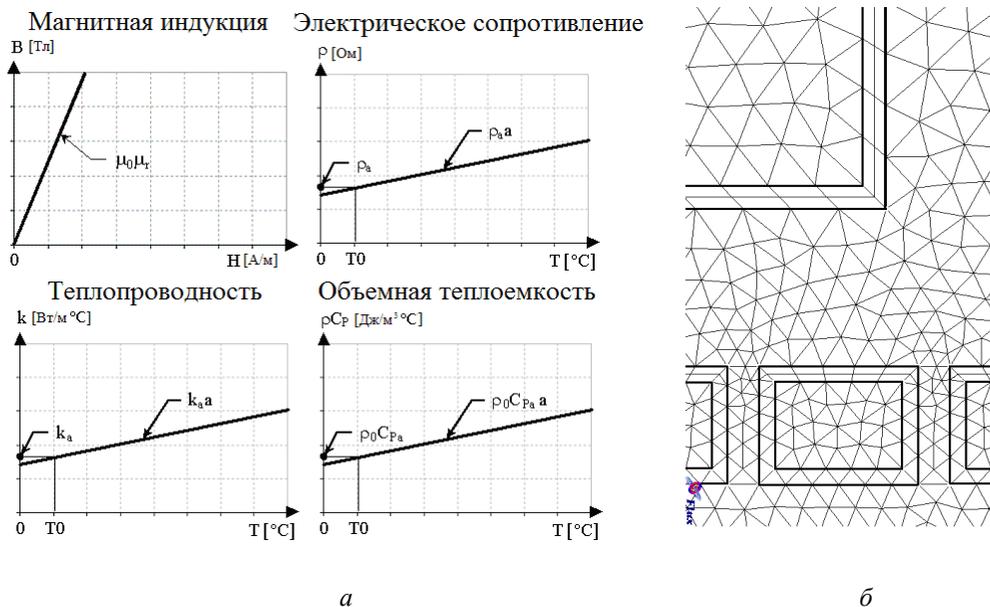


Рис. 2. Теплофизические свойства алюминия (а) и конечно-элементная сетка нагревательной системы «индуктор – заготовка» (б)

Задача оптимального по быстродействию и максимальной точности управления была решена для трех различных значений точности нагрева: $\varepsilon_{\min}^{(1)}$, $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ и $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$ по приведенной в [1-2, 6, 12] методике решения двумерных ЗОУ процессом индукционного нагрева заготовок цилиндрической формы.

При точности нагрева $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$, согласно основным соотношениям (14) альтернансного метода, оптимальное управление $u_{onm}(t)$ имеет один интервал нагрева длительностью Δ_1^0 с максимальным значением напряжения источника питания u_{\max} . При значениях точности нагрева $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon = \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$ и $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ оптимальное управление $u_{onm}(t)$ является двухинтервальным. В этом случае после первого интервала нагрева с максимальным значением напряжения u_{\max} следует интервал выравнивания температуры длительностью Δ_2^0 при отсутствии напряжения на источнике питания. Соответствующие расчетные системы уравнений для каждого из рассматриваемых случаев точности могут быть записаны в виде (17) – для $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$, (18) – для $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$ и (19) – для $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$:

$$\begin{cases} T(0, l_1^0, \Delta_1^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(1)}; T(r_2^0, l_2^0, \Delta_1^0) - T^* = +\varepsilon_{\min}^{(1)}; \\ \frac{\partial T(r_2^0, l_2^0, \Delta_1^0)}{\partial r} = \frac{\partial T(r_2^0, l_2^0, \Delta_1^0)}{\partial l} = 0; l_1^0 = 0; \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} T(0, l_1^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_0; T(r_2^0, l_2^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = +\varepsilon_0; \\ \frac{\partial T(r_2^0, l_2^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0)}{\partial r} = \frac{\partial T(r_2^0, l_2^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0)}{\partial l} = 0; l_1^0 = 0; \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} T(0, l_1^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)}; & T(r_2^0, l_2^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = +\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ T(R, l_3^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)}; & \frac{\partial T(r_2^0, l_2^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0)}{\partial r} = \frac{\partial T(r_2^0, l_2^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0)}{\partial l} = 0; & l_3^0 = l_1^0 = 0. \end{cases} \quad (19)$$

Расположение точек с максимальной и минимальной температурами по объему цилиндра в конце оптимального по быстродействию и точности нагрева процесса показаны на рис. 3, а-в [1-2, 6, 12].

В результате решения систем уравнений (17)-(19), в которых зависимости $T(r, l, \Delta)$ от r , l и Δ рассчитываются по описанной выше численной двумерной электротепловой FLUX модели, получены основные параметры оптимальных по быстродействию и точности нагрева процессов управления, представленные в таблице: значения точности нагрева для каждого из рассмотренных случаев $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$, $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ и $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon = \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$, длительности Δ_1^0 и Δ_2^0 интервалов нагрева и выравнивания температур, расход энергии $E_{инд}$ на нагрев заготовки.

Вычислительная процедура поиска решений систем уравнений (17)-(19) проводилась в режиме диалога с ЭВМ с использованием генерации пробных точек решений на описанной электротепловой модели. Оптимальные значения искомых параметров определялись просмотром массива температур в узлах пространственной сетки цифровой модели в различные моменты времени процесса. Подобный полуавтоматический вычислительный алгоритм позволил значительно сократить время вычислений и получить оптимальные решения при минимально возможном числе вызовов FLUX модели.

Результаты решения модельных ЗОУ

Точность нагрева	Расчетные параметры оптимальных по быстродействию и точности ПИНМ				Расчетные параметры оптимальных по энергосбережению ПИНМ			
	$\varepsilon, ^\circ C$	$\Delta_1^0, сек$	$\Delta_2^0, сек$	$E_{инд}, МДж$	$\varepsilon, ^\circ C$	$\Delta_1^0, сек$	$\Delta_2^0, сек$	$E_{инд}, МДж$
$\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$	85	1552	–	228,8	85	1430	179	207,9
$\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon < \varepsilon_{\min}^{(1)}$	50,8	1640	45	243,4	39,1	1610	164	238,29
$\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$	25,4	1665	158	247,67	25,4	1665	158	247,67

Решение задачи оптимального по расходу энергии управления

Задача на минимум расхода энергии также была решена для трех различных значений точности нагрева: $\varepsilon_{\min}^{(1)}$, $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ и $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon = \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$. В данной задаче для всех трех значений точности нагрева, согласно альтернативному методу, оптимальное управление $u_{опт}(t)$ является двухинтервальным. Соответствующие системы уравнений для каждого из рассматриваемых случаев точности могут быть записаны в виде (20) – для $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$, (21) – для $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon = \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$ и (22) – для $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$. Расположение точек с максимальными температурными отклонениями от заданного значения показаны на рис. 3, г-е [15].

$$T(0, l_1^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(1)}; T(R, 0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = +\varepsilon_{\min}^{(1)}; l_1^0 = 0; \quad (20)$$

$$T(0, l_1^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_0; T(R, 0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = +\varepsilon_0; l_1^0 = 0; \quad (21)$$

$$T(0, l_1^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)}; T(r_2^0, l_2^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = +\varepsilon_{\min}^{(2)}; \quad (22)$$

$$T(R, l_3^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)}; \frac{\partial T(r_2^0, l_2^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0)}{\partial r} = \frac{\partial T(r_2^0, l_2^0, \Delta_1^0, \Delta_2^0)}{\partial l} = 0; l_3^0 = l_1^0 = 0.$$

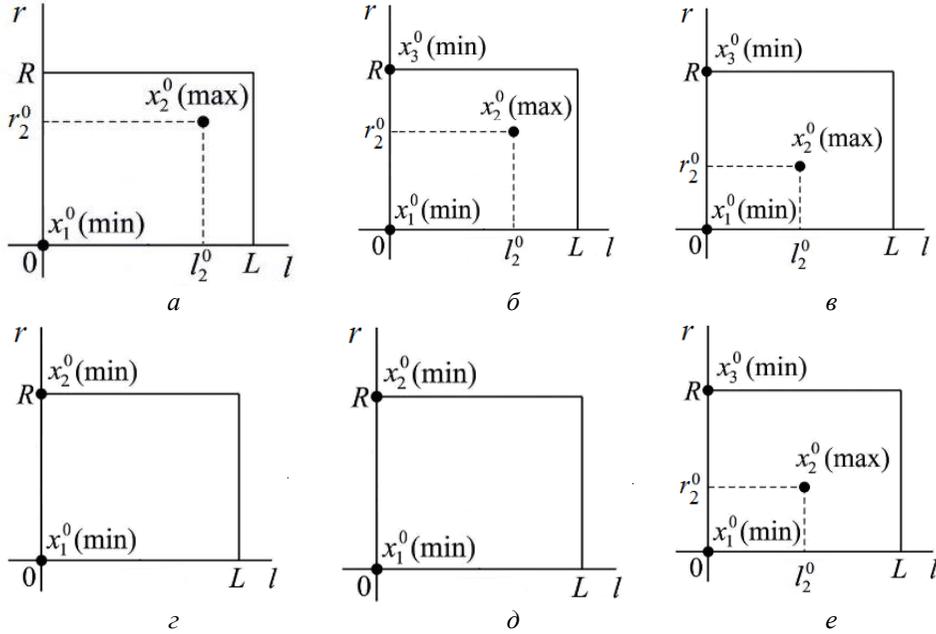


Рис. 3. Расположение точек с максимальной и минимальной температурами по объему цилиндра:

a-e – в конце оптимального по быстрдействию и точности нагрева процесса:

$$a - \varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}; \bar{b} - \varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}; \bar{e} - \varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)};$$

z-e – в конце оптимального по расходу энергии процесса:

$$a - \varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}; \bar{b} - \varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon = \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}; \bar{e} - \varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$$

Результаты решения задачи на минимум расхода энергии, полученные с помощью численной FLUX-модели, представлены в таблице.

Радиальные температурные распределения для значения точности нагрева $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$, представленные на рис. 4, совпадают в задачах на минимум расхода энергии, оптимальное быстрдействие и максимум точности нагрева.

На рис. 5-6 приведены сравнительные результаты расчета процессов индукционного нагрева массивного цилиндра, оптимальных по критериям быстрдействия и расхода энергии при изменении требуемой точности нагрева ε в интервале от $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ до $\varepsilon_{\min}^{(1)}$. Согласно представленным данным, именно в этом диапазоне изменения ε_0 оптимальные алгоритмы управления по рассматриваемым критериям различаются, совпадая лишь на границе диапазона при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$. Та-

ким образом, при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ полученный алгоритм оптимального управления является универсально-оптимальным, т. е. оптимальным по всем трем рассматриваемым критериям (5)-(7).

Полученные зависимости (рис. 5, 6) наглядно показывают, что при переходе от алгоритмов, оптимальных по быстродействию, к оптимальным по энергосбережению достигаются возрастающие с уменьшением точности нагрева выигрыш по расходу энергии и потери по производительности процесса.

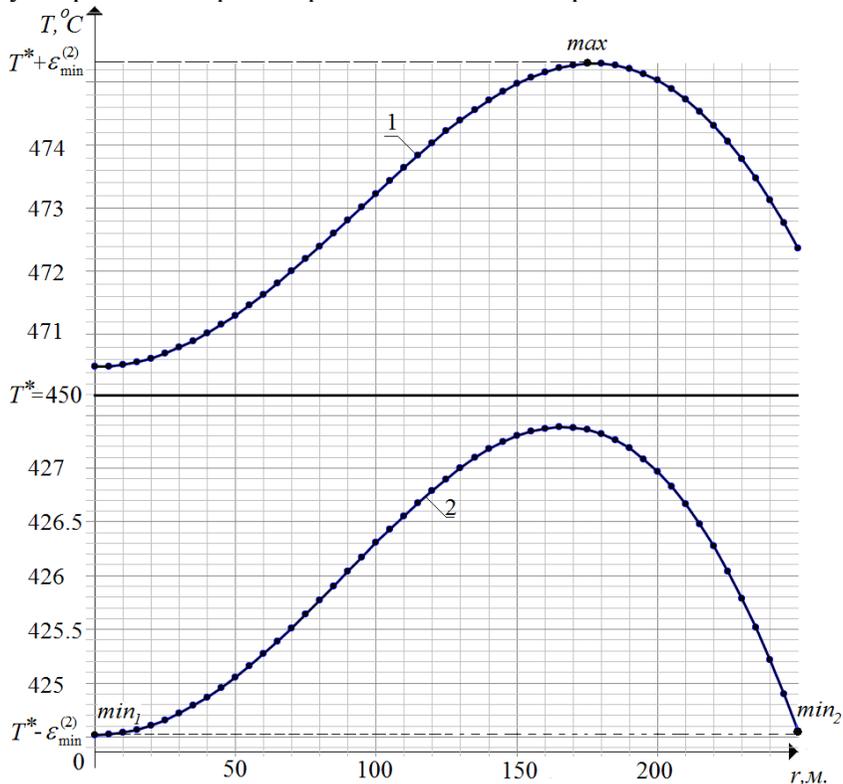


Рис. 4. Распределение температуры по радиусу заготовки в конце оптимального по быстродействию, точности и расходу энергии процесса нагрева для точности $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$:

- 1 – в сечении, в котором достигается максимальная температура,
- 2 – в сечении, в котором достигается минимальная температура

На рис. 7 представлено температурное распределение по объему заготовки для значения точности $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$, при которой рассчитанный алгоритм управления является универсально-оптимальным.

Заключение

В работе сформулированы задачи оптимального управления процессом периодического индукционного нагрева цилиндрических заготовок по критериям быстродействия, точности нагрева и минимума энергопотребления для трех различных значений точности нагрева заготовки.

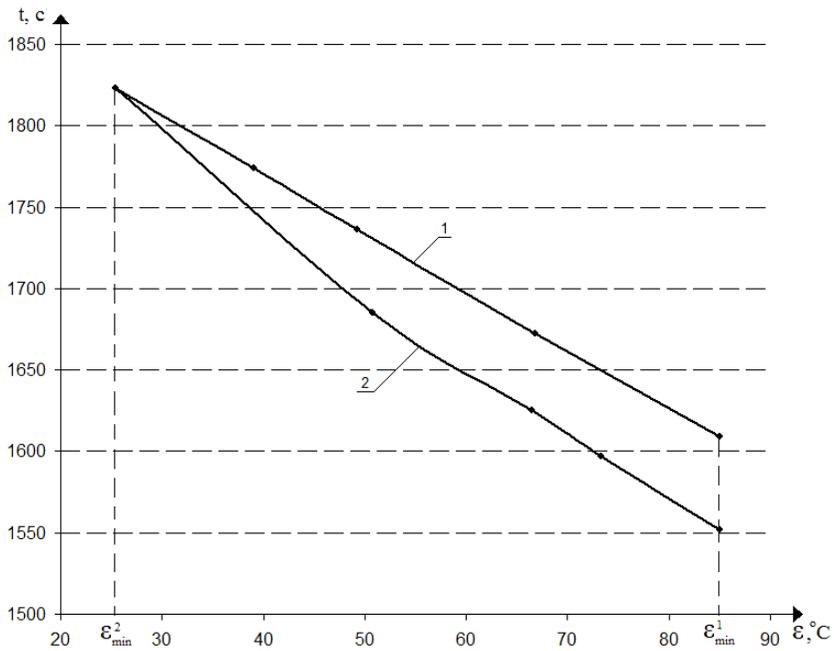


Рис. 5. Зависимость длительности процесса от точности нагрева при $\epsilon_{\min}^{(2)} \leq \epsilon \leq \epsilon_{\min}^{(1)}$:
 1 – в задаче на минимум энергопотребления; 2 – в задаче оптимального быстродействия

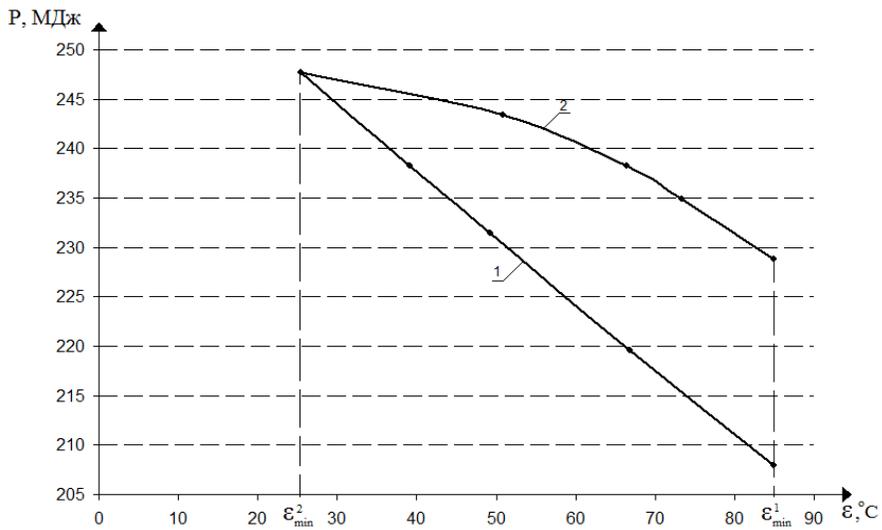


Рис. 6. Зависимость расхода энергии от точности нагрева при $\epsilon_{\min}^{(2)} \leq \epsilon \leq \epsilon_{\min}^{(1)}$:
 1 – в задаче на минимум энергопотребления; 2 – в задаче оптимального быстродействия

Исходные задачи редуцируются к задачам математического программирования, которые решаются на базе альтернансного метода прикладной оптимизации системами с распределенными параметрами. Анализ рассчитанных с помощью численной двумерной электротепловой модели оптимальных процессов показывает, что при переходе от оптимальных по быстродействию алгоритмов управления к алгоритмам, оптимальным по расходу энергии, достигается увеличение

выигрыша по расходу энергии при уменьшении точности нагрева. При предельно достижимой в классе двухинтервальных управлений точности нагрева полученный алгоритм оптимального управления является универсально-оптимальным, т. е. оптимальным по всем трем рассматриваемым критериям.

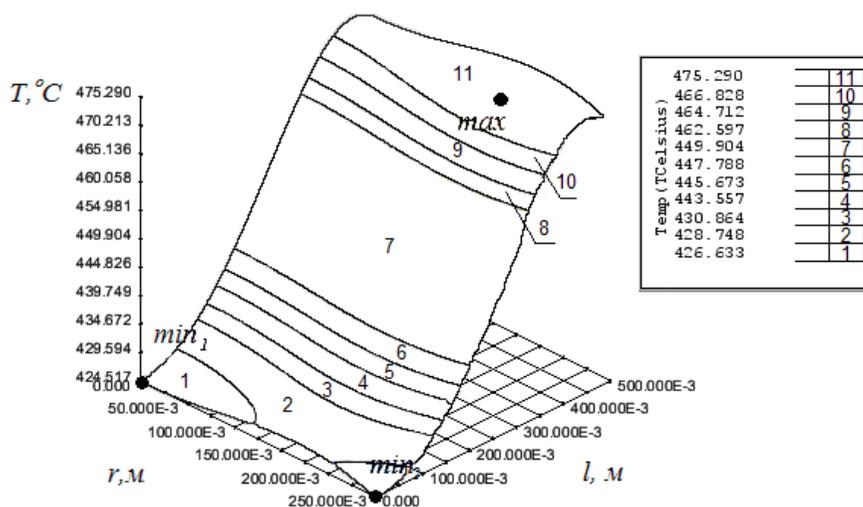


Рис. 7. Температурное поле по объему заготовки в конце оптимального по быстродействию, точности и расходу энергии процесса нагрева для значения точности $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Optimal Control of Induction Heating Processes. – London, N.Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, 2007. – 349 p.
2. *Ранопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М: Наука, 2012. – 309 с.
3. *Ранопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.* Оптимальное управление нелинейными объектами технологической теплофизики // Автометрия. – 2012. – Т.48. – № 5. – С. 3-13.
4. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Optimal Control of Nonlinear Objects of Engineering Thermophysics // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2012. – Vol. 48. – No 5. – pp. 429-437.
5. *Ранопорт Э.Я.* Оптимальное по быстродействию управление нелинейными объектами технологической теплофизики // Элементы и системы опт. идент. и упр. технолог. процессом. – Тула, 1996. – С. 81-91.
6. *Шаранова О.Ю.* Численное моделирование и оптимальное управление процессами индукционного нагрева цилиндрических заготовок под обработку давлением: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Самара, 2011. – 22 с.
7. *Плешивцева Ю.Э., Ранопорт Э.Я.* Метод последовательной параметризации управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2009. – № 3. – С. 22-33.
8. *Ранопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.* Алгоритмически точный метод параметрической оптимизации в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Автометрия. – 2009. – Т. 45. – № 5. – С. 103-112.
9. *Ранопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.* Оптимизация систем с распределенными параметрами: программные и позиционные стратегии управления // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – № 6 (119). – С. 180-192.
10. *Pleshivtseva Yu.E., Rapoport E.Ya.* The Successive Parametrization Method of Control Actions in Boundary Value Optimal Control Problems for Distributed Parameter Systems // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2009. – Vol. 48. – No 3. – pp. 351-362.
11. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Algorithmically Precise Method of Parametric Optimization in Boundary-Value Optimal Control Problems for Distributed Parameter Systems // Optoelectronics,

- Instrumentation and Data Processing. – 2009. – Vol. 45. – No 5. – pp. 464-471.
12. Оптимизация и управление электротехнологическими системами. Интенсивный курс. Специализация III / Алиферов А., Бааке Э., Барглик Д., Бикеев Р., Брессан Ф., Ди Барба П., Горева Л., Лули С., Наке Б., Никаноров А., Павлов С., Плешивцева Ю., Рапопорт Э., Смальцез А., Спитан С., Форцан М., Якович А. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 278 с.
 13. Плешивцева Ю.Э., Шаранова О.Ю. Энергосберегающие алгоритмы оптимального управления процессами индукционного нагрева // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 4 (32). – С. 172-180.
 14. Шаранова О.Ю. Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 7 (28). – С. 180-185.
 15. Cedrat Flux [электронный ресурс]: сайт программного продукта Flux. URL: www.cedrat.com/en/software/flux.html (дата обращения 17.04.2014).

Статья поступила в редакцию 5 марта 2014 г.

TWO-DIMENSIONAL PROBLEM OF OPTIMAL WITH RESPECT TO TYPICAL QUALITY CRITERIA CONTROL OF THROUGH INDUCTION HEATING PROCESSES

Yu.E. Pleshivtseva, A.V. Popov, A.I. Dyakonov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

A process of induction heating of metal billets before hot forming is considered as an object to be optimized. Optimal with respect to typical optimization criteria control problems are formulated and solved under conditions of Chebyshev's estimations of final temperature states. Three typical optimization problems are considered: time-optimal control problem, problem of maximum heating accuracy and minimum energy consumption problem. Parametric optimization of control algorithms is based on the developed at SamSTU alternance method of optimization of distributed parameters systems. Computational results for optimal heating of aluminum cylindrical billets are shown as examples of formulated problems solutions. Two-dimensional numerical model of interrelated electromagnetic and temperature fields has been developed in Cedrat FLUX software and integrated in optimization procedure.

Keywords: *induction heating, optimal control, time-optima; problem, heating accuracy, minimum of energy consumption, alternance method, numerical model, interrelated electromagnetic and temperature fields, Cedrat FLUX.*

*Yu. E. Pleshivtseva (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Anton V. Popov, Graduate student.
Artem I. Dyakonov, Graduate student.*