

processov [Planning an experiment in research on agricultural processes]. Leningrad, 1980, 168 p. (In Russian).

17. . Malinovsky E. Yu. *Raschet i proektirovanie stroitelnih i dorojnih mashin na EVM* [Calculation and design of construction and road machines on a computer]. Moscow, 1980, 216 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Посметьев Валерий Иванович – профессор кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», доктор технических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: posmetyev@mail.ru.

Никонов Вадим Олегович – доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Посметьев Виктор Валерьевич – доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», кандидат физико-математических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: victorvpo@mail.ru.

Information about authors

Posmetev Valerii Ivanovich – professor of department of production, repair and operation of cars Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: posmetyev@mail.ru.

Nikonov Vadim Olegovich – associate professor of production, repair and operation of cars Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Posmetev Viktor Valerevich – Associate Professor of mechanization of forestry and design of cars Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail:victorvpo@mail.ru.

DOI: 10.12737/article_5b97a15e9393c4.46673542

УДК 51-74: 697.34:630.181:004.4

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ ТЕПЛИЦ С САЖЕНЦАМИ ЦЕННЫХ ПОРОД ЛЕСА

кандидат технических наук, доцент **С. А. Сазонова**¹

кандидат технических наук, доцент **С. Д. Николенко**¹

кандидат технических наук **М. В. Манохин**¹

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация

Рассмотрен дистанционный мониторинг технического состояния систем отопления крупных теплиц, обеспечивающий безопасный режим их функционирования и оперативность при устранении аварий систем водяного отопления в них. Выращиваемые в теплицах саженцы ценных пород леса необходимо защитить от резких перепадов температур, переохлаждения и гибели. С этой целью разработан метод статического оценивания состояния параметров режимов функционирования систем теплоснабжения, лежащий в основе задачи технической диагностики в рамках реального времени. При решении задачи статического оценивания как задачи обратного анализа применялся метод взвешенных наименьших квадратов на основе предположения о нормальном законе распределения. Изложены положения, на которых основан предлагаемый метод. В основе решения задачи лежит функциональное эквивалентирование. Учтена неизотермичность течения среды при анализе потокораспределения. В задаче принималась не традиционная совокупность параметров для оценивания, обеспечивающие в составе программного обеспечения бы-

стродействие предлагаемых метода и математических моделей. В качестве оцениваемых параметров приняты узловые давления и температуры, значения которых можно получить на практике для реально функционирующей системы как исходную информацию о текущем состоянии системы с помощью манометрической и температурной съемки. Конечная цель разработки - на основе разработанных метода и математических моделей создание инструментальной базы для автоматизированной системы управления, обеспечивающей с помощью телеизмерений техническую диагностику функционирующих систем водяного отопления теплиц. С помощью автоматизированной системы управления можно будет оперативно обработать информацию о состоянии объекта управления и передать полученную информацию лицу принимающему решение. Предложенный метод апробирован с помощью вычислительного эксперимента, доказавшего его работоспособность.

Ключевые слова: саженцы леса, теплицы, отопление, оценивание состояния, математическое моделирование, вычислительный эксперимент.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR MONITORING OF GREENHOUSE WATER HEATING WITH SEEDLING OF VALUABLE FOREST SPECIES

PhD in Engineering, Associate Professor **S. A. Sazonova**¹

PhD in Engineering, Associate Professor **S. D. Nikolenko**¹

PhD in Engineering **M. V. Manohin**¹

1 – Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Technical University»,
Voronezh, Russian Federation

Abstract

The remote monitoring of technical condition of heating systems of large greenhouses is considered, providing a safe mode of their operation and efficiency in eliminating accidents of water heating systems in them. Growing seedlings of valuable species of forest should be protected from sudden temperature changes, overcooling and death. To this end, a method for the static estimation of the state of parameters of operation modes of heat supply systems has been developed, which is the basis for the task of technical diagnostics in real time. When solving the problem of static estimation as a problem of inverse analysis, the weighted least squares method has been applied on the basis of the assumption of normal distribution law. The positions are outlined on which the proposed method is based. The solution of the problem is based on functional equivalence. Non-isothermal nature of medium flow is taken into account in the analysis of flow distribution. The task has taken non-traditional set of parameters for estimation, ensuring the speed of the proposed method and mathematical models within the software. Nodal pressures and temperatures have been taken as the estimated parameters, the values of which can be obtained in practice for really functioning system as initial information on the current state of the system using manometric and temperature surveys. The ultimate goal of the development is creation of a tool base for an automated control system that provides technical telemetry diagnostics of functioning hot water heating systems. It is possible to promptly process information about the state of the control object and transmit the information received to the person making the decision with the help of automated control system. The proposed method has been tested using computational experiment that proved its operability.

Keywords: forest seedlings, greenhouses, heating, state estimation, mathematical modeling, computational experiment.

Введение

При выращивании ценных пород леса в закрытых теплицах, необходимо обеспечивать стабильный температурный режим функционирования, особенно в зимнее время, а так же оперативно устранять возможные аварии систем отопления теплиц. Теплицы могут иметь существенные весьма протяженные размеры, поэтому их обслуживание для обнаружения

аварии в системе отопления может занять при визуальном осмотре много времени, в течении которого может существенно понизится температура и в результате могут погибнуть дорогостоящие саженцы лесных насаждений. Актуальной задачей является сохранение от замерзания саженцев ценных пород леса.

Расположение труб водяного отопления может

быть в зонах, визуально не осматриваемых, например под грядками или под конструктивными фрагментами теплицы. Это может привести к длительной невозможности обнаружения возникшей аварии и к задержке по ее устранению. В таких случаях требуется применять дистанционный мониторинг технического состояния систем водяного отопления теплиц, которые могут присоединяться к централизованным системам отопления населенных пунктов или обслуживаться с помощью автономных котельных.

Для осуществления мониторинга требуется оснастить теплицу приборами учета и телеметрическим оборудованием, позволяющим дистанционно снимать показания с приборов и обрабатывать на компьютере с помощью программного обеспечения информацию о текущем техническом состоянии объекта защиты. В основе программного обеспечения предлагается использовать разработанные математические модели и метод решения задачи статического оценивания состояния систем теплоснабжения (СТС), к которым будем причислять и систему водяного отопления теплицы.

Под статическим оцениванием будем понимать мгновенный одновременный «снимок» со всех приборов учета СТС, установленных в энергоузлах (ЭУ). По данным измерений с помощью программы восполняется полная информация о системе. По истечению заданного промежутка времени выполняется повторный «снимок» системы. Результаты сопоставляются автоматически с помощью программы и на основе полученной информации формируется сообщение о стабильности работы или о возможных изменениях в системе. Мониторинг выполняется постоянно с заданным шагом времени. Информация об изменениях в системе передается автоматически лицу принимающему решение для обеспечения оперативности реагирования на изменения в системе и для устранения неполадок.

Классификация задач оценивания традиционно [7] выполняется по получаемым исходным данным. Комплексно задачи оценивания исследованы в работе [3]. Сетевой подход был заложен в работе [5]. Развитие методов системной идентификации в работах [8, 10, 12]. Для СТС в [3] рассмотрена задача идентификации гидравлических систем с переменными параметрами. Для таких систем применялись модели в

виде дифференциальных уравнений. Установлено, что необходимо учитывать неизотермичность режимов для СТС.

Неизотермичность режимов потокораспределения была рассмотрена в работе [6]. Авторы работ [6, 11] предложили решать задачи потокораспределения для систем водо- и газоснабжения на основе применения функционального эквивалентирования, причем СТС в этих работах на рассматривались. Результаты анализа потокораспределения сопоставлены с подходом в работе [1].

На основе применения функционального эквивалентирования задача статического оценивания для систем газоснабжения как для систем открытого типа была рассмотрена в работе [9]. В рамках данной работы рассмотрим аналогичную задачу для СТС, как для систем закрытого и частично открытого типа. Применение функционального эквивалентирования дает существенное преимущество по сравнению с существующими ранее подходами к решению задачи оценивания, так как позволяет существенно сократить количество дорогостоящих приборов учета для выполнения телеизмерений, так как узлы ветвления не потребуются оснащать приборами учета. Кроме того, для СТС потребуются датчики давления и термометры, установленные только во всех ЭУ, расходомеры при решении поставленной задачи не потребуются, за счет чего будут сэкономлены существенные материальные ресурсы при техническом оснащении теплиц.

Методы и материалы

При постановке задачи оценивания, СТС будем рассматривать как систему [1, 5] с нелинейной стохастической, многомерной и многосвязной системой с распределенными параметрами. При формулировке задачи статического оценивания СТС будем ее решать на основе метода наименьших квадратов (МНК).

Быстроменяющиеся параметры режима СТС обозначаем вектором Z . При установившемся потокораспределении [4] в вектор Z войдет вектор расходов воды в системе отопления для участков Q и компонентов q_i ($i=1... i_S, i_S = \{I\}$ - вектор всех участков); H - вектор всех узловых потенциалов и компонентов h_j ($j=1... j_S, j_S = \{J\}$ - вектор всех узлов e); G - вектор отборов в узлах и компонентов g_j ($j=1... j_S$); T - вектор значений температур в узлах и компонентов t_j ($j=1...$

$j_{\Sigma}, j_{\Sigma} = \{J\}$. К медленно меняющимся параметрам отнесем информацию о характеристиках конструктивных элементов СТС, обозначив их вектором D .

В математической модели установившегося потокораспределения [6] учтена связь между векторами Z и D :

$$C_{p \times n} \times \left\{ \left(R_{n(d)} + R(Q)_{n(d)}^u \right) \times Q_{n \times 1}^u \right\} = M_{p \times e}^t \times \hat{H}_{exl} \pm \sum_i H(Q)_i^u; \quad (1)$$

$$K_{r \times n} \times \left\{ \left(R_{n(d)} + R(Q)_{n(d)}^u \right) \times Q_{n \times 1}^u \right\} = 0_{r \times 1} \pm \sum_i H(Q)_i^u; \quad (2)$$

$$A_{m \times n} \times Q_{n \times 1}^u = \hat{g}_{m \times 1}; \quad (3)$$

$$E_{n(d)} \times \left(B_{n(d)} \times \Theta_{n \times 1} + T_{n \times 1}'' \right) = -\bar{A}_{n \times m}^t \times T'_{m \times 1}; \quad (4)$$

$$\bar{A}_{m \times n} \times Q_{n(d)}^u \times T'_{m \times 1} - \bar{A}_{m \times n} \times Q_{n(d)}^u \times T'_{m \times 1} = \bar{g}_{m(d)} \times T'_{m \times 1} - \bar{g}_{m(d)} \times \hat{T}_{m \times 1}; \quad (5)$$

где n - число дуг графа; нижние индексы указывают на число соответственно столбцов и строк матриц;

m, e - число узлов с фиксируемым отбором и потенциалом соответственно, то есть энергоузлов (ЭУ), через которые у системы формируются связи с внешней средой;

p - число цепей ($p=e-1$); $R_i = S_i |Q_i|^{a-1}$ - гидравлические сопротивления участков;

S_i - коэффициент гидравлического сопротивления участка i ;

$R(Q)_i$ - сопротивления регуляторов (расхода, давления, температуры), для каждого участка i ;

\hat{H} - узловые потенциалы и \hat{g} - отборы (притоки) для ЭУ j , которые фиксируются как граничные условия во времени;

u - номер итерации, в пределах которой необходимо выполнить расчет системы с фиксацией сосредоточенных параметров;

T', T'' - температуры в начальном узле после смещения и в конечном узле до смещения соответственно;

C - матрица смежности цепей;

M - матрица маршрутов;

K - матрица контуров;

A - матрица инцидентий;

$\sum_i H(Q)_i^u$ - напор в перекачивающих насосах

для каждого участка i .

Знак (+) выбирают при совпадении направления движения воды в потоке и в рассматриваемом элементе, а (-) - при несовпадении направле-

ний [6].

Состав телеизмерений [7] от датчиков давления и термометров в ЭУ для исследуемых объектов образует вектора \hat{H} и \hat{T} , которые можно представить в виде суммы истинных величин $H(Y), T(Y)$. Они представляют из себя функции степеней свободы Y и вектора ошибок от датчиков ζ_H и помех в каналах при телеизмерениях от неодновременности снятия измерений ζ_T , то есть

$$\hat{H} = H(Y) + \zeta_H; \quad \hat{T} = T(Y) + \zeta_T. \quad (6)$$

Для компонент вектора состояния СТС целевая функция в МНК примет вид

$$F = \sum_j \frac{1}{\sigma_j^2} \left[\hat{h}_j - h_j(G, Q) \right]^2; \quad (7)$$

где σ_j - дисперсия ошибок телеизмерений.

В силу неявной зависимости $h_j(G, Q)$ в модели потокораспределения (1)-(5), в работах [2, 5] при решении задач оценивания состояния гидравлических систем прибегают к линеаризации [5, 10] математической модели. При формализации задачи оценивания использована идея функционального эквивалентирования абонентских подсистем (АП) [6]. Смысл применения функционального эквивалентирования заключается в том, в расчетах величины узловых потенциалов h_j вычисляются с помощью реализации модели (1)-(5) и с помощью уравнения Бернулли:

$$h_j - h_{\sigma ap} = S_j g_j^2. \quad (8)$$

При известном значении барометрического давления целевая функция (7) в МНК примет вид

$$F = \sum_j \frac{1}{\sigma_j^2} \left[\hat{h}_j - h_j(s_j, g_j) \right]^2. \quad (9)$$

В (9) искомые значения узловых потенциалов h_j в ЭУ зависит неявно от компонентов векторов G и Q , а также явно зависит от (s_j) АП, потребляющей целевой продукт (g_j).

Модель (1)-(5) позволяет включать в исследуемый фрагмент системы (ИФС) практически все элементы системы теплоснабжения, вплоть до водоразборных кранов подсистем горячего водоснабжения и подпиточных насосов.

Результаты и обсуждение

Уточним механизм энергетического эквивалентирования применительно к СТС, так как только для открытых подсистем горячего водоснабже-

ния можно применять соотношение (8). Для закрытых систем, к которым отнесем большинство СТС, аналогичное соотношение запишем в виде

$$h_j - h_{nn} = S_j g_j^2; \quad (10)$$

где h_{nn} - напор от действия подпиточного насоса.

В результате, к любому ЭУ ИФС требуется подключать два фиктивных участка. Один из которых эквивалентно подсистему открытого типа, из которой может осуществляться отбор воды, а второй - подсистему закрытого типа, в которой может только циркулировать подогреваемая вода.

В исследуемой системе, как в транспортной, суммарный приток равен суммарному стоку

$$\sum_{j \in J^\pi} g_j = \sum_{j \in J^\eta} g_j; \quad (11)$$

где верхние индексы " η " и " π " обозначают подмножества энергоузлов присоединения потребителей и источников питания соответственно.

Целевую функцию (9) с учетом (11) преобразуем к виду с неопределенными множителями Лагранжа:

$$F = \sum_{j \in J^\eta} \frac{1}{\sigma_j^2} \left[\hat{h}_j - h_j(s_j, g_j) \right]^2 + \lambda \left(\sum_{j \in J^\pi} g_j - \sum_{j \in J^\eta} g_j \right); \quad (12)$$

где величина λ является неопределенным множителем Лагранжа.

Искомыми на основе (12) параметрами будут s_j и g_j . При определении условий экстремума (12) целевая функция оказывается сложной относительно g_j . Приравняв к нулю производные ($\partial F / \partial g_j = 0$) [4] с помощью компонентов вектора g_j , с учетом (8), (10) получим нормальные уравнения, в виде двух подсистем в системе

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial g_j} = 2w_j(h_j^3 - s_j g_j^\alpha - h_{\text{nap}}) \left[-\alpha s_j g_j^{\alpha-1} - g_j^\alpha \left(\frac{\partial s_j}{\partial g_j} \right) \right] - \lambda = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial g_j} = 2w_j(h_j^3 - s_j g_j^\alpha - h_{nn}) \left[-\alpha s_j g_j^{\alpha-1} - g_j^\alpha \left(\frac{\partial s_j}{\partial g_j} \right) \right] - \lambda = 0; \end{cases} \quad j \in J_H; \quad (13)$$

где $w_j = 1 / \sigma_j^2$ - весовая функция j -го измерения.

Замкнутую систему нелинейных уравнений (13) запишем в матричном виде

$$E_{(1)} \quad E_{(d)} \times \Theta_{(1)} \times g_{(1)} = 0_{(1)}; \quad (14)$$

$$E_{(1)} \times g_{(1)} = g_{(2)}; \quad (15)$$

где

$$\Theta_j = \begin{cases} w_1 \left(h_1^3 - s_1 g_1^\alpha - h_{\text{nap}} \right) \left[-\alpha s_1 g_1^{\alpha-1} - g_1^\alpha \left(\frac{\partial s_1}{\partial g_1} \right) \right]; \\ w_1 \left(h_1^3 - s_1 g_1^\alpha - h_{nn} \right) \left[-\alpha s_1 g_1^{\alpha-1} - g_1^\alpha \left(\frac{\partial s_1}{\partial g_1} \right) \right]; \end{cases} \quad (16)$$

где " E " - единичная матрица, с размерами $(J_H - 1) \times J_H$ и с блочной структурой, при числе уравнений на единицу меньше числа ЭУ.

Для регулирующих устройств запишем неравенства с учетом их назначения и особенностей функционирования [4]. Условия для регуляторов расхода: $S_i = S_i^*$, если $Q_i < Q_i^{max}$, и $S_i > S_i^*$, если $Q_i = Q_i^{max}$. Для регуляторов давления "после себя": $S_i = S_i^*$, если $H_i < H_i^{max}$, и $S_i > S_i^*$, если $H_i = H_i^{max}$. Для регуляторов давления "до себя": $S_i = S_i^*$, если $H_i > H_i^{min}$, и $S_i > S_i^*$, если $H_i = H_i^{min}$, где S_i^* - сопротивление участка i , при полностью открытом регуляторе; Q_i^{max} , - максимальное значение расхода в конечной точке участка i , оснащенного регулятором; H_i^{max} , максимальное значение давления в конечной точке участка i , оснащенного регуляторами давления; H_i^{min} , - минимальное значение давления в конечной точке участка i , оснащенного регулятором давления.

Для решения задач с ограничениями в виде неравенств применяется метод штрафных функций. Этот метод применим для учета ограничений общего вида и заключается в том, что целевая функция приобретает вид

$$F_\phi(Z) = F(Z) + \phi(Z); \quad (17)$$

где $F_\phi(Z)$ - функция штрафа за нарушение ограничений в виде неравенств.

Вычислительная процедура реализации метода штрафных функций организуется следующим образом [3]: выбираются некоторые значения ρ_j (или ρ) и вектор начального приближения; определяется оценка \hat{Z}_ϕ доставляющая минимум значению целевой функции $F_\phi(Z)$, применяемая для определения направления шага итеративного решения системы вида [3]; уменьшается значение ρ_j (или ρ) и выполняется возврат к п. 2, при \hat{Z}_ϕ взятом в качестве начального приближения.

Итерации повторяются столько раз, пока величина \hat{Z}_ϕ при уменьшении ρ_j (или ρ) не начнет меняться несущественно. Поиск минимума должен ограничиваться допустимой областью, что накладывает не-

которые дополнительные ограничения на длину шага.

Производная $(\partial S_i / \partial g_i)$ является величиной переменной. Более того, она является функцией не столько расхода, сколько температуры, а точнее соотношений между температурами в подающей и обратной магистралях и между расходами греющей и нагреваемой воды в подсистеме горячего водоснабжения. В качестве промежуточного варианта решения этой проблемы можно рекомендовать составление различного рода эмпирических зависимостей. На их основе появится возможность совершенствования моделей обратного анализа для решения задач оценивания и идентификации СТС. В этом случае целевую функцию для оценивания можно представить в виде

$$F = (H - I_H H)^t C_H^{-1} (H - I_H H) + (T - I_T T)^t C_T^{-1} (T - I_T T) + \lambda (\sum_{j \in J^r} g_j - \sum_{j \in J^n} g_j) + \phi(Z); \quad (18)$$

где C_H ; C_T – диагональные матрицы дисперсий ошибок измерений узловых напоров и температур соответственно на основе манометрической и температурной съемки;

I_H ; I_T – матрицы соответствия между компонентами векторов измеренных и расчетных значений оцениваемых параметров с элементами 1 (при соответствии) и 0 (при несоответствии).

Предложенные математические модели были апробированы с помощью вычислительного эксперимента. Как объект исследования выбрана СТС [2], схема которой изображена на рис. Сеть состоит из 243 участков, 130 узлов и 114 контуров. Нумерация узлов и участков соответствует данным [2]. В сети имеет две ТЭЦ, три насосные подстанции, три регулятора давления «после себя». В одном узле есть приток и такой же сток в другом узле.

Натурный эксперимент на исследуемом объекте не выполнялся, так как он требует существенных материальных затрат. Проверку работоспособности метода оценивания удалось выполнить с помощью сопоставления результатов оценивания с "эталонным" расчетом потокораспределения для системы [4, 6].

При проведении вычислительного эксперимента были учтены погрешности измерительных приборов в соответствии с их техническими характеристиками, которые были введены вместе с исходными данными по узловым давлениям.

Всего было проведено три варианта вычислительного эксперимента при варьировании значений погрешностей приборов для телеизмерений: 0,5%, 1% и 2%. По результатам вычислительного эксперимента можно сделать вывод, что среднеквадратическая погрешность между данными "эталонными" и расчет-

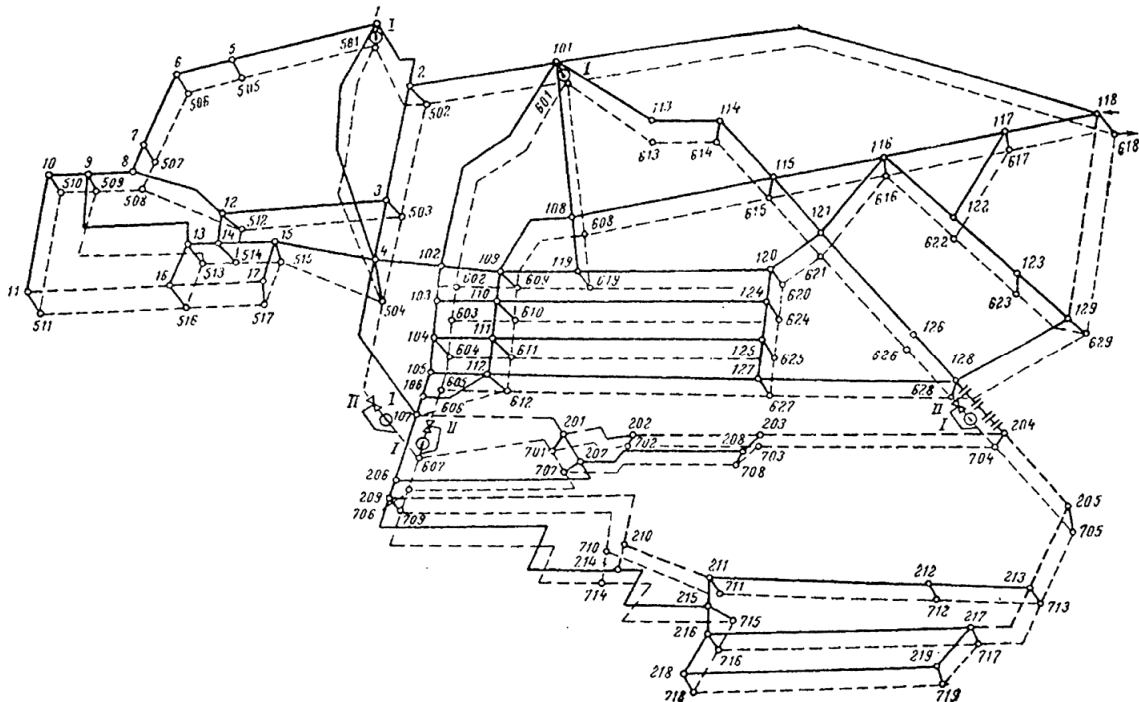


Рис. Расчетная схема системы теплоснабжения

ными оказались для всех вариантов эксперимента в диапазоне погрешности исходной информации.

По результатам эксперимента получили распределение относительных отклонений соответствующих нормальному закону, так как 67 % точек попали в интервал отклонений $\pm\sigma$, а также более 97 % – в интервал $\pm 3\sigma$. Следовательно, МНК верно применен для решения поставленной задачи.

Выводы

В заключение отметим, что быстроедействие статического оценивания текущего состояния систем отопления теплиц будет обеспечено за счет нетрадиционного выбора оцениваемых параметров (величин

узловых давлений и температур) в разработанных математической модели и методе. Предложенные разработки позволят с помощью телеизмерений обеспечить бесперебойную техническую диагностику функционирующих систем водяного отопления крупных теплиц с саженцами лесных насаждений и оперативно предотвратить аварийные ситуации, что гарантирует практически 100 % сохранность саженцев ценных пород леса, что в конечном счете приведет к значительной экономии средств на выращивание саженцев. Так же мониторинг позволит обеспечить бесперебойную регулировку температурного режима функционирования теплиц.

Библиографический список

1. Евдокимов, А. Г. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях [Текст] / А. Г. Евдокимов, А. Д. Тевяшев, В. В. Дубровский. – М. : Стройиздат, 1990. – 368 с.
2. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей [Текст] / В. Я. Хасилев [и др.]. – М. : Энергия, 1978. – 175 с.
3. Новицкий, Н. Н. Оценивание параметров гидравлических цепей [Текст] / Н. Н. Новицкий. – Новосибирск : Наука, 1998. – 213 с.
4. Сазонова, С. А. Модели оценки возмущенного состояния системы теплоснабжения [Текст] / С. А. Сазонова // Инженерная физика. – 2010. – № 3. – С. 45-46.
5. Теория гидравлических цепей [Текст] / А. П. Меренков [и др.]. – М. : Наука, 1985. – 280 с.
6. Bazarov, G. P. Distribution of flows in pipeline systems with nonisothermal viscous gas flow [Text] / G. P. Bazarov, I. S. Kvasov, M. Ya. Panov // Известия Академии наук. Серия химическая. – 1998. – С. 92.
7. Gamm, A. Z. Estimation of nonsinusoidal operating conditions in electric networks on the basis of measurements [Text] / A. Z. Gamm, L. I. Kovernikova // International Review on Modelling and Simulations. – 2011. – Vol. 4. – № 6. – P. 3051-3058.
8. The efficiency of developing small-scale gas-turbine and diesel-based cogeneration power installations for providing gas to the regions of Russia [Text] / A. M. Karasevich, A. V. Fedyaev, O. N. Fedyaeva, E. V. Sennova // Thermal Engineering. – 2000. – Vol. 47. – № 12. – P. 1084-1089.
9. Static estimation of gas supply systems [Text] / S. A. Kolodyazhny, Ye. A. Sushko, S. A. Sazonova, A. A. Sedayev // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. – 2014. – № 2 (22). – С. 15-26.
10. Novitskii, N. N. Calculation of the flow distribution in hydraulic circuits based on their linearization by nodal models of secants and chords [Text] / N. N. Novitskii // Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 60. – № 14. – P. 1051-1060.
11. Panov, M. Ya. Prompt management on the basis of the disturbed state of the urban gas supply system [Text] / M. Ya. Panov, G. N. Martynenko, A. I. Kolosov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2017. – № 1 (33). – С. 23-30.
12. Current trends in the formation of regional power supply markets [Text] / E. V. Sennova, A. V. Fedyaev, A. M. Karasevich, V. G. Sidler // International Journal of Global Energy Issues. – 2003. – Vol. 20. – № 4. – P. 425-433.

References

1. Evdokimov A. G., Tevjashev A. D., Dubrovskij V. V. *Modelirovanie i optimizacija potokoraspredelelnija v inzhenernyh setjah* [Modelling and optimization of load flow in engineering networks]. Moscow, 1990, 368 p. (In Russian).
2. Hasilev V. Ja., Merenkov A. P., Kaganovich B. M., Svetlov K. S., Takajshvili M. K. *Metody i algoritmy rascheta teplovyh setej* [Methods and algorithms for calculating heat networks], Moscow, 1978, 175 p. (In Russian).
3. Novitsky N. N. *Otsenivanie parametrov gidravlicheskih tsepej* [Estimation of hydraulic circuit parameters].

Novosibirsk, 1998, 213 p. (In Russian).

4. Sazonova S. A. *Modeli ocenki vozmushhennogo sostojaniya sistemy teplosnabzhenija* [Models for estimating the disturbed state of a heat supply system]. *Inzhenernaja fizika* [Engineering Physics]. 2010, no. 3, pp. 45-46. (In Russian).

5. Merenkov A. P. [et al.]. *Teorija gidravlicheskih cepej* [Theory of hydraulic circuits]. Moscow, 1985, 280 p. (In Russian).

6. Bazarov G. P., Kvasov I. S., Panov M. Ya. Distribution of flows in pipeline systems with nonisothermal viscous gas flow. *Izvestija Akademii nauk. Serija himicheskaja* [Proceedings of the Academy of Sciences. A series of chemical]. 1998, p. 92.

7. Gamm A. Z., Kovernikova L. I. Estimation of nonsinusoidal operating conditions in electric networks on the basis of measurements. *International Review on Modelling and Simulations*, 2011, vol. 4, no. 6, pp. 3051-3058.

8. Karasevich A. M., Fedyaev A.V ., Fedyaeva O. N., Sennova E. V. The efficiency of developing small-scale gas-turbine and diesel-based cogeneration power installations for providing gas to the regions of Russia. *Thermal Engineering*, 2000, vol. 47, no. 12, pp. 1084-1089.

9. Kolodyazhny S. A., Sushko Ye. A., Sazonova S. A., Sedayev A. A. Static estimation of gas supply systems. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2014, no. 2 (22), pp. 15-26.

10. Novitskii N. N. Calculation of the flow distribution in hydraulic circuits based on their linearization by nodal models of secants and chords. *Thermal Engineering*, 2013, vol. 60, no. 14, pp. 1051-1060.

11. Panov M. Ya., Martynenko G. N., Kolosov A. I. Prompt management on the basis of the disturbed state of the urban gas supply system. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2017, no. 1 (33), pp. 23-30.

12. Sennova E. V., Fedyaev A. V., Karasevich A. M., Sidler V. G. Current trends in the formation of regional power supply markets. *International Journal of Global Energy Issues*, 2003, vol. 20, no. 4, pp. 425-433.

Сведения об авторах

Сазонова Светлана Анатольевна – доцент кафедры техносферной и пожарной безопасности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», кандидат технических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: Sazonovappb@vgasu.vrn.ru.

Николенко Сергей Дмитриевич – профессор кафедры техносферной и пожарной безопасности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», кандидат технических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: nikolenkoppb1@yandex.ru.

Манохин Максим Вячеславович – ассистент кафедры техносферной и пожарной безопасности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: fellfrostqtw@gmail.com.

Information about authors

Sazonova Svetlana Anatolievna – associate professor of department of Technosphere and Fire Safety of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Technical University», PhD in Engineering, Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: Sazonovappb@vgasu.vrn.ru.

Nikolenko Sergey Dmitrievich – professor of department of Technosphere and Fire Safety of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Technical University», PhD in Engineering, Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: nikolenkoppb1@yandex.ru.

Manohin Maksim Vjacheslavovich – assistant of department of Technosphere and Fire Safety of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Technical University», PhD in Engineering, Voronezh, Russian Federation; e-mail: fellfrostqtw@gmail.com.