

УДК 51-74:519.873:697

**Саконова С.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [Sazonovappb@vgasu.vrn.ru](mailto:Sazonovappb@vgasu.vrn.ru)

**Манохин В.Я.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [manohinprof@mail.ru](mailto:manohinprof@mail.ru)

**Манохин М.В.** – ассистент

E-mail: [fellfrostqtw@gmail.com](mailto:fellfrostqtw@gmail.com)

**Николенко С.Д.** – кандидат технических наук, профессор

E-mail: [nikolenkoppb1@yandex.ru](mailto:nikolenkoppb1@yandex.ru)

**Воронежский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84

### **Математическое моделирование резервирования систем теплоснабжения в аварийных ситуациях**

#### **Аннотация**

В работе приведены результаты математического моделирования задач параметрического и структурного резервирования для систем теплоснабжения. Последовательно рассмотрены задача увеличения диаметров линий при неизменной конфигурации системы теплоснабжения и задача изменения конфигурации системы теплоснабжения. Математические модели основаны на применении энергетического эквивалентирования при анализе возмущенного состояния системы теплоснабжения. Разработан алгоритм решения задачи формирования нагруженного резерва при управлении функционированием систем теплоснабжения. Численная реализация полученных моделей в составе программного комплекса для дистанционной технической диагностики систем теплоснабжения повысит оперативность при принятии решений в диспетчерских пунктах и поможет своевременно предотвратить аварии в системах. Разработки могут практически использоваться при проектировании и эксплуатации систем теплоснабжения.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, резервирование, системы теплоснабжения, аварии, энергетическое эквивалентирование, потокораспределение.

#### **Введение**

Обобщим результаты исследований, изложенных в работах [1, 2, 3], посвященных разработке моделей и алгоритмов формирования резерва мощности в аварийных ситуациях при эксплуатации систем теплоснабжения (СТС). Рассмотрим комплексное решение задач увеличения диаметров линий при неизменной конфигурации системы теплоснабжения [1] и изменения конфигурации системы теплоснабжения [2]. При формировании комплексных математических моделей при анализе возмущенного состояния системы теплоснабжения [3] применим энергетическое эквивалентирование [4, 5]. Новизна разработанных математических моделей заключается в том, что ранее на основе применения энергетического эквивалентирования выполнялся анализ потокораспределения только для открытых систем водо- и газоснабжения [5, 6], а СТС как системы закрытого или смешенного типа не рассматривались. В работах [7, 8, 9] рассмотрены математические модели для процесса реструктуризации и параметрическая оптимизация городских систем газоснабжения.

Задача обоснования резерва мощности СТС включает две подзадачи: структурное резервирование [2] (установление числа и места источников питания, конфигурации кольцевания сети, размещения секционирующих задвижек) и параметрическое [1] резервирование (увеличение диаметров линий при неизменной конфигурации сети). Формирование полноценного аварийного резерва системы возможно, когда транспортное резервирование выступает как сопутствующая (вложенная) процедура мероприятий по структурному резервированию.

Конечная цель разработки – создание современной автоматизированной системы управления, для которой можно использовать математические модели резервирования в составе программного обеспечения для технической диагностики при эксплуатации

систем теплоснабжения. С помощью автоматизированной системы управления при комплексном решении проблем диагностики станет возможным оперативно обработать информацию о состоянии рассматриваемого объекта с целью принятия решения в случае возникновения аварий или изменения режимов функционирования.

### Применение эмпирического соотношения для оценки потери мощности системы в результате отказов линейных элементов

Оценку потерь мощности можно выполнить непосредственно путем реализации математической модели (ММ) анализа потокораспределения возмущенного состояния системы теплоснабжения [3], однако подход такой нельзя рекомендовать для практического использования, поскольку даже при условии ординарности отказов линейных элементов объем вычислений оказывается слишком большим. В последнее время был найден перспективный для практики способ преодоления этой проблемы [4, 5]. На основе обработки результатов вычислительного эксперимента была установлена явная корреляция между относительным расходом на участке  $\bar{Q}_i = Q_i / g_a$  (отношение  $Q_i$  к общему притоку через источники питания системы  $g_s$ , причем оба значения определяются для невозмущенной системы – до отключения этого участка) и относительной потерей производственной мощности при отказе, то есть отношением  $Dg = (g_a - g_s^{av}) / g_a$ . Здесь подстрочный индекс (S) соответствует полному (суммарному) расходу целевого продукта (ЦП) в сети, проходящему через питатели, а надстрочный индекс «ав» – относится к аварийному режиму – после отключения элемента). Обработка результатов вычислительных экспериментов с двумя варьируемыми параметрами приводит к аппроксимационной зависимости вида  $Dg = a\bar{Q}_i^2 + b\bar{Q}_i$ , причем аргумент и функция выражаются в процентах. Такую зависимость можно считать эмпирическим соотношением для оценки потери мощности системы в результате отказов линейных элементов. Построение аналога такой аппроксимации для СТС не будем рассматривать, поскольку при известной методологии обработки данных имитационного моделирования отказов, он становится скорее инженерным, нежели научным вопросом. Для рассмотрения методов резервирования будем полагать, что коэффициенты аппроксимации, то есть значения  $a$  и  $b$  известны.

### Процедура формирования транспортного резерва

Рассмотрим сначала процедуру формирования транспортного резерва [1]. С учетом традиционного приема нормирования надежности, вместо ее векторной оптимизации в сочетании с экономичностью за исходную информацию для резервирования примем пониженное («лимитированное») потребление ЦП  $g_j^{лим}$ , определяемое исходя из категории потребителей. Транспортное резервирование для области эксплуатации СТС в инженерном смысле можно рассматривать как поиск наиболее рациональных вариантов замены труб в тепловой сети с целью сохранения ее работоспособного состояния в условиях отказов. Под содержательной постановкой задачи моделирования при формировании резерва мощности будем подразумевать поиск мероприятий, потенциально восстанавливающих работоспособность системы в результате последовательного перебора ординарных отказов ее участков (элементов). Вопрос о том, какие именно элементы подлежат проверке и в какой последовательности, очевидно, является прерогативой специалистов по эксплуатации.

Полагаем, что из всего множества энергоузлов (ЭУ) на лимитированное потребление контролируются все узлы присоединения потребителей. Состояние отказа системы будем определять условием, когда при выходе из строя  $i$ -го участка, хотя бы в одном ЭУ из контролируемого подмножества, отбор воды потребителем оказывается таким, что выполняется условие  $g_s^{av} < g_j^{лим} = K_j^{лим} \cdot \hat{g}_j$ , (где  $\hat{g}_j$  – расчетное потребление от ЭУ  $j$ ). Для установившегося потокораспределения общее потребление  $g_a = \sum_j g_j$ ;  $(j \in J_{h(f)}^z \cup J_{h(p)}^z \cup J_{h(g)}^z)$  представляет производственную мощность СТС. Систему будем считать восстановленной по отношению к какому-либо конкретному варианту аварийной

ситуации  $i$ -го элемента, если для всех контролируемых ЭУ за счет увеличения (резервирования) диаметров на некоторой группе элементов условие  $g_j^{as} \geq K_j^{lim} \cdot \hat{g}_j$  будет выполнено. Значения  $K_j^{lim}$  принимаются в соответствии с установленными нормами.

Автономную оценку аварийной ситуации лишь на основе  $g_j^{lim}$ , то есть без учета влияния абонентских подсистем (АП) нельзя считать объективной. Если эти данные использовать в качестве граничных условий для анализа потокораспределения в системе при исключенном аварийном элементе, то получаемые при этом расчетные значения напоров  $h_j^{as}$  у потребителей не гарантируют пропуск  $g_j^{lim}$  через АП. То есть, корректно определить резерв мощности можно лишь используя оба типа данных или их взаимосвязь. Отборы  $g_j$  на подсистемы отопления и горячего водоснабжения (ГВ) и давление  $h_j$  в ЭУ  $j$  для любого режима функционирования системы (в том числе и при отказе) однозначно связаны через полные гидравлические сопротивления соответствующих эквивалентных участков  $x_j^2$ . Величина  $x_j^2$  может быть найдена по данным номинального режима функционирования СТС. Полученное таким образом значение  $x_j^2$  можно рассматривать в качестве верхнего предела действительного гидравлического сопротивления АП, так как в аварийной ситуации реакция потребителя обычно направлена на его уменьшение.

При известных нормативах потребления из условия  $h_j^{lim} - h_j^* = x_j^2 (g_j^{lim})^a$  можно установить минимальный уровень потенциалов в ЭУ  $h_j^{lim}$ , ниже которого гидравлическое сопротивление АП не позволит обеспечить пропуск лимитированного отбора потребителю. Первое соотношение используется применительно к подсистемам ГВ, а второе для подсистем отопления и ГВ при закрытой схеме. В случае использования этих соотношений одновременно, что возможно для абонентов, имеющих как отопительные подсистемы, так и открытые подсистемы ГВ достаточно принимать наибольшее значение.

Поиск мероприятий по резервированию должен выполняться на основе двух условий:  $g_j^{as} \geq g_j^{lim}$ ;  $h_j^{as} \geq h_j^{lim}$ . В действительности условие  $x_j^2 = const$  не соблюдается, но тенденции в изменении гидравлического сопротивления АП будут лишь усиливать установленные неравенства. При обеспечении указанных ограничений возможно бесчисленное множество вариантов, поскольку возможно увеличение диаметров труб на нескольких участках одновременно и привлечение экономических показателей становится неизбежным. Задачу формирования нагруженного резерва можно квалифицировать как аналог известной задачи параметрической оптимизации. Отличие состоит в том, что она должна выполняться в виде цикла вычислений, каждая итерация которого включает два этапа: первый предназначен для имитации (прогноза) аварийной ситуации, связанной с исключением, вышедшего из строя элемента; второй - обеспечивает нахождение резерва по всей совокупности оставшихся элементов, гарантирующего лимитированное потребление у абонентов. Первый этап представляет из себя задачу анализа возмущенного состояния и выполняется на основе ММ из работы [3].

Второй этап резервирования можно представить как задачу дискретного нелинейного математического программирования, которая может быть реализована применительно к СТС на основе аппроксимационного алгоритма. Вместо номинального потребления  $\hat{g}_j$  фиксируются лимитированные отборы  $\hat{g}_j^{lim}$ , определяемые двумя идентичными соотношениями вида  $\hat{g}_j^{lim} = K_j^{lim} \cdot \hat{g}_j$ , каждое из которых отвечает за конкретную подсистему АП.

### Алгоритм решения задачи формирования нагруженного резерва

Ниже приведен алгоритм решения задачи формирования нагруженного резерва при управлении функционированием СТС.

1. По результатам решения задачи статического оценивания во всех ЭУ рассчитываются узловые отборы  $g_j$  и коэффициенты гидравлического сопротивления  $x_j^2$  для эквивалентных участков.

2. Производится анализ потокораспределения по ММ из работы [3] с исключенным аварийным участком и определяются расчетные параметры  $g_j^{ae}$  и  $h_j^{ae}$  для множества контролируемых узлов.

3. Для всех категорий потребителей в соответствии с  $K_j^{лим}$  устанавливается лимитированный отбор потребителя.

4. Значения рассчитанных в пункте 3  $g_j^{ae}$  для ЭУ сравниваются с  $g_j^{лим}$ . Если  $g_j^{ae} \geq g_j^{лим}$ , то  $\hat{g}_j = g_j^{ae}$ ; в случае, если  $g_j^{ae} < g_j^{лим}$ , то принимают  $\hat{g}_j = g_j^{лим}$ .

5. По установленным величинам  $\hat{g}_j$  рассчитываются значения  $h_j^{лим}$  с помощью гидравлических характеристик ( $\chi_j^2$ ) эквивалентных линий, определенных в пункте 1.

6. Вычисляются значения  $Dh_j = h_j^{лим} - h_j^{ae}$  для тех ЭУ, отбор от которых  $g_j^{ae} < g_j^{лим}$ . Весь диапазон  $Dh_j$  разбивается на совокупность интервалов  $d\hat{h}_j$ .

7. Решается задача точного потокораспределения по ММ из работы [4] при установленных и фиксируемых  $\hat{g}_j$ . Полученные в результате анализа значения расчетных расходов участков в дальнейшем фиксируются, то есть  $Q_i = const$ .

8. Решением системы уравнений параметрической оптимизации в пределах итерации  $k$ , при заданном итеративном шаге  $d\hat{h}_j$  и фиксированном, согласно пункту 8, вычисляются поправки  $dD_{ir}^{(k)}$  и новые расчетные значения диаметров труб по формуле  $D_{ir}^{(k+1)} = D_{ir}^{(k)} + dD_{ir}^{(k)}$  при этом принимается, что  $d\hat{h}_j = 0$  для ЭУ, узловой отбор от которых  $g_j^{ae} \geq g_j^{лим}$ .

9. Переходя к итерации  $k+1$ , пункт 9 повторяется с новыми значениями элементов диагональных матриц  $G$  и  $B$ , определенными для вычисленных величин  $D_{ir}^{(k+1)}$  и фиксированном потокораспределении. Этот цикл производится до полной выборки интервалов  $Dh_j$ , что соответствует новым расчетным диаметрам труб, которые удовлетворяют условиям  $g_j^{ae} \geq g_j^{лим}$ ;  $h_j^{ae} \geq h_j^{лим}$ .

10. Выполняется процедура стандартизации диаметров.

Цикл расчетов завершается, когда последний из отключаемых участков в списке не нарушает условия  $h_j^{ae} \geq h_j^{лим}$  для всех ЭУ. Разработанный алгоритм в состоянии обеспечить требуемый уровень надежности снабжения абонентов исходя из лимитированного потребления (определяемого показателем  $K_j^{лим}$ ).

### Процедура формирования структурного резерва

Одним из наиболее часто реализуемых мероприятий структурного резервирования является установка перемычек на подающих магистралях систем теплоснабжения. Содержательную сущность этой задачи можно представить как решение двух основных вопросов: первый – как определить диаметры перемычек, если их состав и месторасположение известны; второй – каково должно быть их общее количество и если оно регламентировано, то каким образом. Метод формирования структурного резерва должен отвечать на оба поставленных вопроса, причем очевидно, что даже по смыслу они взаимосвязаны.

Структурная модель СТС, работающей в аварийном режиме содержит  $n1$  функционирующих участков (исключая элемент, вышедший из строя),  $n2$  участков эквивалентирующих АП, и присоединяемых к каждому из множества  $J_h^z$  ЭУ, через которые ЦП поступает к потребителям,  $n3$  резервных линий (перемычек). Из множества ЭУ выделим подмножество  $J_h^z$  контролируемых ЭУ - потребителей, отбор от которых при функционировании резерва должен быть лимитирован, то есть не может опускаться ниже своего аварийного значения  $g_j^{ae} = g_j^{лим} = K_j^{лим} \cdot \hat{g}_j$  (где  $\hat{g}_j$  - расчетное потребление от ЭУ  $j$  до аварии). Остальные (не контролируемые) ЭУ потребителей  $J_h^z \setminus J_h^z$  либо не

требуют жесткого регламентирования по  $g_j^{лим} (K_j^{лим})$ , либо не подлежат восстановлению в результате любой аварийной ситуации, поскольку всегда соблюдается условие  $g_j^{ae} \geq g_j^{лим}$ . Отметим, что при параметрическом резервировании все без исключения узлы попадают в разряд контролируемых.

Как и для параметрического варианта резервирования участие фиктивных эквивалентов АП, но не для всех, а лишь для контролируемых ЭУ  $J_k^z$  нужно исключить тем же способом. То есть, имея метрические параметры соответствующих фиктивных участков и лимитированное потребление по замыкающим соотношениям можно установить требуемые потенциалы. Таким образом, под  $n2$  следует подразумевать лишь совокупность эквивалентов от неконтролируемых ЭУ.

Задача формирования структурного резерва [2] формализуется линейризованной системой уравнений вида:

$$\begin{pmatrix} C_{r'n1} & C_{r'n2} & C_{r'n3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (S_{n1(d)} + S(Q_{n1(d)}^u)) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & dQ_{n1'1}^u \\ S_{n2(d)} & 0 & 0_{n2'1} \\ 0 & 0 & S_{n2(d)} & dQ_{n3'1}^u \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} (R_{n1(d)} + R(Q_{n1(d)}^u)) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0_{n1'1} \\ 0 & R_{n2(d)} & 0 \\ 0 & 0 & R_{n2(d)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u} \\ \dot{y} \\ \dot{p} \end{pmatrix} = M_{p'e}^t \cdot d\hat{H}_{e'1} \pm \hat{a}_i H(Q)_i^u; \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} K_{r'n1} & 0_{r'n2} & K_{r'n3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (S_{n1(d)} + S(Q_{n1(d)}^u)) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & dQ_{n1'1}^u \\ S_{n2(d)} & 0 & 0_{n2'1} \\ 0 & 0 & S_{n2(d)} & dQ_{n3'1}^u \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} (R_{n1(d)} + R(Q_{n1(d)}^u)) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0_{n1'1} \\ 0 & R_{n2(d)} & 0 \\ 0 & 0 & R_{n2(d)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u} \\ \dot{y} \\ \dot{p} \end{pmatrix} = 0_{r'1} \pm \hat{a}_i H(Q)_i^u; \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} A_{m'n1} & A_{m'n2} & A_{m'n3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dQ_{n1'1}^u \\ dQ_{n2'1}^u \\ dQ_{n3'1}^u \end{pmatrix} = 0_{m'1}; \quad (3)$$

$$E_{n1(d)} \cdot (B_{n1(d)} \cdot Q_{n1'1} + T\mathcal{C}_{n1'1}) = - \mathbf{r}_{n1'm}^t \cdot T\mathcal{C}_{m'1}; \quad (4)$$

$$\mathbf{s}_{Am'n1} \cdot Q_{n1(d)}^u \cdot T\mathcal{C}_{n1'1} - \mathbf{r}_{Am'n1} \cdot Q_{n1(d)}^u \cdot T\mathcal{C}_{n1'1} = \mathbf{r}_{gm1(d)} \cdot T\mathcal{C}_{m'1} - \mathbf{s}_{gm(d)} \cdot \hat{T}_{m'1}; \quad (5)$$

где элементы диагональных матриц  $S$  и  $R$  принимают значения  $S_i = a_s Q_i^{a-1} D_i^{-b}$ ,  $R_i = b_s Q_i^{a-1} D_i^{-(1+b)}$  и соответственно относятся к основным участкам схемы и к перемычкам (резервным элементам);  $dQ$ ,  $\delta D$ ,  $d\hat{H}$  – поправки к расчетным расходам, диаметрам резервных линий, фиксированным узловым потенциалам (только в контролируемых узлах);  $s_i$  – коэффициент гидравлического сопротивления участка  $i$ . Остальные обозначения соответствуют введенным в работах [3, 5] обозначениям. Дополнительно отметим, что нижним индексом «n2» помечены эквиваленты подсистем ГВ открытого типа (если таковые имеются), а индексом «n3» – эквиваленты всех остальных подсистем абонентских подсистем, включая участки обратных магистралей тепловой сети до мест подключения подпиточных насосов. Используются обозначения:  $C$ ,  $K$ ,  $A$  – матрицы смежности независимых цепей, контуров и матрица инцидентий соответственно;  $M$  – матрица маршрутов; « $t$ » – символ транспонирования; « $d$ » – признак диагональной матрицы; « $l$ » – признак матрицы-столбца;  $T\mathcal{C}$ ,  $T\mathcal{C}$  – температуры в начальном узле после смещения и в конечном узле до смещения соответственно. Гидравлические параметры режима связанные моделями потокораспределения [3] включают: расходы среды на ветвях  $Q$ , или отборы в узлах  $g$ , потенциалы в узлах  $H$  и т.д.

Поскольку задача формирования ненагруженного резерва относится к анализу возмущенного состояния, то потенциалы в ЭУ: присоединения источников и в висящих

узлах эквивалентных участков не претерпевают изменений и для них значения  $d\hat{H} = 0$ . Таким образом, поправки  $d\hat{H}_j$  вводятся только для множества контролируемых узлов в соответствии с традиционными условиями фиксирования узлового потенциала:

Неизвестными в (1)-(5) являются расчетные расходы всех функционирующих в аварийном режиме участков, фиктивных и резервных линий, а также диаметры перемычек, то есть:  $n1+n2+2\cdot n3$ . Удвоенное значение слагаемого  $n3$  возникает из-за того, что для резервных линий определению подлежат поправки не только в соответствующих им расходах, но и диаметрах. В работах [2, 10] учитываются вопросы замкнутости системы уравнений и устойчивости их решения.

В основе алгоритма решения задачи структурного резервирования также лежит аппроксимационный алгоритм, который дает возможность определить гидравлические характеристики перемычек. Линейная система уравнений (1)-(5) решается на каждой итерации при задаваемых в  $\{J_k^z\}$  ЭУ унарной расчетной схемы значениях итеративных поправок  $d\hat{H}_j^{(k)}$ , позволяющих восстановить работоспособность системы в результате аварии, в соответствии с регламентируемыми значениями  $K_j^{лим}$ , при этом определяются значения  $Q_i^{(k)}$  и поправки к диаметрам  $dD_i^{(k)}$ . Для каждой последующей итерации величины  $Q_i$  и  $D_i$  вычисляются по результатам предыдущей, в соответствии с зависимостями:  $Q_i^{(k+1)} = Q_i^{(k)} + dQ_i^{(k)}$ ;  $D_i^{(k+1)} = D_i^{(k)} + dD_i^{(k)}$ .

Особенностью реализации алгоритма является обеспечение условия, чтобы поправки  $dD_i^{(k)}$  для двух подмножеств участков (реальные участки –  $n1$  и фиктивные эквиваленты АП –  $n2$ ) были равны нулю, поскольку в ходе решения изменению подлежат только диаметры перемычек. Это достигается за счет уже использования множителя недопустимости к соответствующим элементам диагональных матриц  $R$  начиная с первой и во всех последующих итерациях.

Для численной апробации и доказательства работоспособности разработанных математических моделей резервирования разработан вычислительный комплекс на базе пакета прикладных программ Hydrograph [5]. Основное предназначение пакета заключается в проведении гидравлических и технико-экономических расчетов в двух проблемных областях управления трубопроводными системами: проектирования и эксплуатации. Характер целевого продукта (газ, вода, нефть или любой другой ингредиент) принципиального влияния на компоновку программных средств в рамках загрузочных модулей не оказывает и определяет лишь совокупность констант, задающих вид и параметры соотношений гидравлики. Методологической базой пакета являются результаты исследований на основе применения энергетического эквивалентирования [5]. В составе пакета Hydrograph имеется 79 программных модулей, содержащих около 8,5 тысяч операторов.

Поскольку в разрабатываемом вычислительном комплексе используются типовые модули пакета, приведем краткое описание их назначения. Программные модули распределены по пяти следующим группам: программы управления, обеспечивающие управление выполнением отдельных этапов решения задач; программы формирования структурного состава гидравлической системы, обеспечивающие накопление и систематизацию информации о структурных элементах системы; программы ввода и вывода данных, производящие систематизацию исходных данных и результатов расчета; сервисные программы, способствующие удобству восприятия результатов расчета и сообщений об ошибках при анализе исходных данных и в процессе решения задач; вычислительные программы, реализующие стандартные алгоритмы математических методов для решения типовых задач прикладной математики.

Результаты численного решения рассматриваемой задачи приведены в работах [11, 12]. В работе [11] выполнена оценка надежности гидравлических систем при проведении вычислительных экспериментов с ординарными отказами линейных элементов. В работе [12] приведены результаты расширенного вычислительного эксперимента по оценке надежности и резервированию распределительных гидравлических систем при отказах структурных элементов. Проведенный вычислительный эксперимент доказал работоспособность разработанных математических моделей резервирования.

Сравнения результатов численного эксперимента приведены в работах [11, 12]. По результатам выполненных экспериментов сделаны выводы. В данной работе разработаны математические модели, с помощью которых можно рассчитать все недостающие параметры состояния СТС при условии оснащения ее датчиками давления и температурными датчиками в энергоузлах. Датчики должны быть оснащены устройствами телемеханики для синхронного опроса их на всей системе. Полученная таким образом информация, называемая «мгновенным снимком системы». Она должна синхронно поступить в диспетчерский пункт в качестве входных данных при расчете по разработанному программному комплексу. Выходными параметрами после расчета будет вся ранее недостающая информация о системе.

В заключение отметим, что так как разработанный алгоритм позволяет восполнять недостающую информацию о системе, то на основе получения такой информации можно оперативно восстанавливать штатный режим работы (в последствии с ремонтом аварийных участков) за счет рассчитанного с помощью программного комплекса наиболее рационального варианта установки резервных элементов.

### **Заключение**

В результате проведенной работы получены математические модели задачи резервирования систем теплоснабжения. Последовательно рассмотрены задачи параметрического и структурного резервирования. Формирование полноценного аварийного резерва системы обеспечено при условии, когда транспортное резервирование выступает как сопутствующая процедура мероприятий по структурному резервированию. В основу задачи обоснования резерва мощности положена математическая модель анализа потокораспределения возмущенного состояния системы теплоснабжения, разработанная на основе применения энергетического эквивалентирования.

Создание современной автоматизированной системы управления на базе разработанных математических моделей поможет своевременно обработать информацию о состоянии объекта управления и при комплексном решении проблем диагностики.

Численная реализация полученных моделей в составе программного комплекса для дистанционной диагностики систем теплоснабжения повысит оперативность при принятии решений по полученной и обработанной информации в диспетчерских пунктах и поможет своевременно предотвратить для таких систем аварии. Нарботки могут практически использоваться при проектировании и эксплуатации систем теплоснабжения.

### **Список библиографических ссылок**

1. Сазонова С.А. Транспортное резервирование систем теплоснабжения // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2011, т. 7, № 2. – С. 99-101.
2. Сазонова С.А. Структурное резервирование систем теплоснабжения // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2010, т. 6, № 12. – С. 179-183.
3. Сазонова С.А. Итоги разработок математических моделей анализа потокораспределения для систем теплоснабжения // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2011, т. 7, № 5. – С. 68-71.
4. Колодяжный С.А., Сушко Е.А., Сазонова С.А. Применение энергетического эквивалентирования для формирования граничных условий к модели анализа потокораспределения системы теплоснабжения // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения, 2013, № 3 (12). – С. 8-15.
5. Щербаков В.И., Панов М.Я., Квасов И.С. Анализ, оптимальный синтез и реновация городских систем водоснабжения и газоснабжения. – Воронеж: ВГУ, 2001. – 292 с.
6. Панов М.Я., Петров Ю.Ф., Щербаков В.И. Модели управления функционированием систем подачи и распределения воды. – Воронеж: ВГАСУ, 2012. – 272 с.
7. Колосов А.И., Панов М.Я., Стогней В.Г. Моделирование потокораспределения на этапе развития структуры городских систем газоснабжения // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2013, т. 9, № 3-1. – С. 56-62.

8. Колосов А.И., Панов М.Я. Математическое моделирование процесса реструктуризации городских систем газоснабжения низкой степени давления // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура, 2013, № 2 (30). – С. 34-41.
9. Панов М.Я., Суворова Ю.В. Параметрическая оптимизация городских систем газоснабжения // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения, 2013, № 1 (10). – С. 10-14.
10. Колодяжный С.А., Переславцева И.И. Математическое моделирование динамики основных опасных факторов в начальной стадии пожара // Известия КГАСУ, 2014, № 4 (30). – С. 403-412.
11. Сазонова С.А., Манохин В.Я. Оценка надежности систем газоснабжения при проведении вычислительных экспериментов с ординарными отказами линейных элементов // Научный вестник ВГАСУ. Серия: Высокие технологии. Экология. – Воронеж: ВГАСУ, 2015, № 1. – С. 138-147.
12. Мезенцев А.Б., Сазонова С.А. Результаты расширенного вычислительного эксперимента по оценке надежности и резервированию распределительных гидравлических систем // Моделирование систем и процессов, 2015, № 2. – С. 26-29.

**Sazonova S.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [Sazonovappb@vgasu.vrn.ru](mailto:Sazonovappb@vgasu.vrn.ru)

**Manokhin V.Ya.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [manohinprof@mail.ru](mailto:manohinprof@mail.ru)

**Manokhin M.V.** – assistant

E-mail: [fellfrostqtw@gmail.com](mailto:fellfrostqtw@gmail.com)

**Nikolenko S.D.** – candidate of technical sciences, professor

E-mail: [nikolenkoppb1@yandex.ru](mailto:nikolenkoppb1@yandex.ru)

**Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering**

The organization address: 394006, Russia, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya st., 84

### **Mathematical modeling of backup heating systems in emergency situations**

#### **Resume**

The results of the development of mathematical models for the study of the problem of capacity reserve of heating systems. Consistently solved two problems of reservation: parametric and structural redundancy. Formation of a full emergency reserve system on the assumption that transport redundancy acts as a companion treatment measures for structural redundancy.

The basis of the study of the problem of provision of power laid the mathematical model of the flow distribution analysis of a perturbed state of the heating system, developed through the use of energy equivalenting. For the numerical implementation of the approach proposed to use in practice, a clear correlation between the relative flow in the area, and the relative loss of production capacity in case of failure.

The paper presents the developed algorithm for solving the problem of formation of a loaded reserve in managing the operation of heating systems. The features of the algorithm.

The ultimate goal of development-creation of a modern automatic control system, which can be used for the developed mathematical models and methods for technical diagnostics functioning heating systems. The automated control system will promptly process the information about the state of the control object and complex problem-solving diagnostics.

Numerical realization of the obtained models as a part of software for remote diagnosis of heating systems will increase the efficiency of decision-making on the received and processed information in the control room and in a timely manner will help prevent accidents such systems. These developments can virtually be used in the design and operation of heating systems.

**Keywords:** mathematical modeling, reservation systems, heating systems, accidents, energy equivalenting, flow distribution.



**Reference list**

1. Sazonova S.A. Transport standby of the heat supply system // The herald of state technical university in Voronezh, 2011, v. 7, № 2. – P. 99-101.
2. Sazonova S.A. Structured standby of the heat supply system // The herald of state technical university in Voronezh, 2010, v. 6, № 12. – P. 179-183.
3. Sazonova S.A. Totals of the developments of the mathematical models of distribution flow analysis for heat supply system. The herald of state technical university in Voronezh, 2011, v. 7, № 5. – P. 68-71.
4. Kolodyazhny S.A., Sushko E.A., Sazonova S.A. Application for the formation of energy equivalent boundary conditions for models of analysis of the heat supply system // Engineering systems and constructions, Voronezh, 2013, № 3. – P. 8-15.
5. Sherbakov V.I., Panov M.Ya., Kvasov I.S. Analysis, optimal synthesis and renovation municipal system water-supply and natural gas industry. – Voronezh: Publishing house VGU, 2001. – 292 p.
6. Panov M.Ya., Petrov Yu.F., Sherbakov V.I. Models of management systems functioning water supply and distribution. – Voronezh: VGASU, 2012. – 272 p.
7. Kolosov A.I., Panov M.Ya., Stogney V.G. Simulation of the flow distribution in the stage of development of the structure of urban gas supply systems // The herald of state technical university in Voronezh, 2013, v. 9, № 3-1. – P. 56-62.
8. Kolosov A.I., Panov M.Ya. Mathematical modeling of the process of restructuring the urban systems of gas supply of low pressure stage // Scientific Herald of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Building and architecture, 2013, № 2 (30). – P. 34-41.
9. Panov M.Ya., Suvorova Yu.V. Parametric optimization of urban gas supply systems // Engineering systems and constructions, Voronezh, 2013, № 1. – P. 10-14.
10. Kolodyazhny S.A., Pereslavl'tseva I.I. Mathematical modeling of the dynamics of the main hazards in the initial stage of fire // News of the KSUAE, 2014, № 4 (30). – P. 403-412.
11. Sazonova S.A., Manokhin V.Ya. Evaluation of reliability of gas supply systems during the computational experiments with ordinary fault line elements // Scientific Bulletin of the VGASU. Series: High-Tech. Ecology. – Voronezh: VGASU, 2015, № 1. – P. 138-147.
12. Mezentsev A.B., Sazonova S.A. The results of the extended computing experiment to assess the reliability and redundancy of distribution of hydraulic systems // Modeling of systems and processes, 2015, № 2. – P. 26-29.