

УДК 681.5

Ю.В. Ильюшин, В.Е. Трушников

**РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОЛЕМ БУРОВЫХ ШНЕКОВ
ДОБЫЧИ ГОРЯЧЕЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ВОДЫ
КИСЛОВОДСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НАРЗАНА**

Кисловодское месторождения минеральной воды (нарзана) имеет ряд особенностей, делающих невозможной применение обычных методов добычи минеральной воды для этого месторождения. Рассмотрены методы управления температурным полем буровых шнеков и трубопроводов, добывающих сульфатный горячий нарзан. Рассматриваемый метод также применим и для некоторых видов доломитного нарзана.

Ключевые слова: нарзан, нагревательные элементы, управление температурой, математическая модель.

Введение

Кисловодское месторождение минеральной воды (нарзана) располагается к югу и северу от города Кисловодска. Источники, находятся в окрестностях рек Березовка и Аликоновка. Это предпочтительно холодный доломитный и холодный сульфатный нарзан. Дальше на север располагаются соленые сульфатные источники Ессентуков, горячие сероводородные источники Пятигорска.

Вдоль рек Кабардинка, Кичмалка и других вплоть до «долины Нарзанов» и Главного Кавказского хребта располагаются горячие источники нарзана. Применение данных нарзанов в лечебных целях трудно оценить, его применяют как для ванн, так и для употребления. Однако применение данной воды вызывает множество проблем, связанных с наименьшей потерей лечебных свойств при транспортировке. Все нарзаны, в независимости от их свойств и месторождения, имеют отличительную особенность, которая заключается в том, что после разлива воду необходимо употребить в течение трех часов. По истечении этого срока нарзан теряет все свои лечебные свойства. С целью увеличения продолжительности сохранения нарзаном свойств его разливают в стеклянную тару с максимальным сохранением микрофлоры минеральной воды. Такие требования к разливу накладывают и определенные требования к процессу добычи минеральной воды и доставки к месту разливу. Разлив горячей минеральной воды требует доставку минеральной воды в горячем виде с температурой, соответствующей температуре добычи. В настоящее время нагрев осуществляется за счет сплошных нагревательных элементов [1-5]. В данной работе рассматривается возможность их замены на секционные нагревательные элементы [6-8].

Анализ математической модели и синтез регулятора

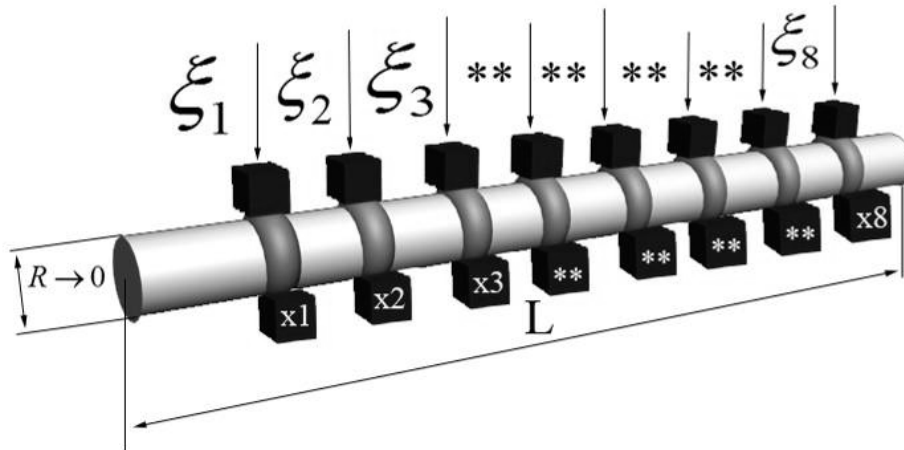


Рис. 1. Объект управления – цилиндрический стержень.

Рассмотрим дискретное управление цилиндрическим изотропным стержнем с радиусом R , длиной l и температуропроводностью материала a^2 (см. рис. 1.). Секционный нагревательный элемент ξ_i , размещается на боковой границы трубы. Управление данным секционным нагревательным элементом производится с помощью релейных элементов. Концы трубы будут изолированы.

Рассмотрим математическую модель (см. рисунок) и проведем синтез управляющих воздействий на трубы:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2},$$

где: начальные граничные условия:

$$T(x,0) = T_0(x); \quad T(0,t) = T(l,t) = 0;$$

Требуется найти параметры решения функции $T(x, t)$, которые выбираются согласно заданным начальным условиям, в качестве которых могут выступать равенства, неравенства или условия. Синтез проводится с использованием аналитических решений начально-краевых задач. Для представления обобщённого решения можно использовать формальный ряд

$$T(x,t) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} a_n \exp \left[- \left(\frac{n\pi a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{n\pi}{l} x.$$

$$\frac{2a_1}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi a}{l} \right)^2 t^* \right] \sin \frac{\pi}{l} x^* = T_{зад}(x^*, t^*).$$

$$T(x,t) \approx \frac{2a_1}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi a}{l} \right)^2 t_i \right] \sin \frac{\pi}{l} x^* = T_{i,зад}(x^*, t_i).$$

Используя ряд с конечным числом слагаемых, решение поставленной задачи сводится к следующему уравнению:

$$T(x_i, t_j) = \frac{2}{l} \sum a_n \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t_j \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_i = T_{i,j,зад}(x_i, t_j).$$

Применяя функцию Грина, получим следующие выражения действия первого источника на семь последующих датчиков

$$T(x_1, t, \tau_0, \xi_1) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^k \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1$$

$$T(x_1, t, \tau_0, \xi_2) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^k \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_2$$

$$T(x_1, t, \tau_0, \xi_3) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^k \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_3$$

$$T(x_1, t, \tau_0, \xi_4) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^k \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_4$$

$$T(x_1, t, \tau_0, \xi_5) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^k \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_5$$

$$T(x_1, t, \tau_0, \xi_6) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^k \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_6$$

$$T(x_1, t, \tau_0, \xi_7) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^k \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_7$$

Действие всех источников, на датчики x_1, x_2, x_3 :

$$T(x_1, t, \tau_0) = \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i ;$$

$$T(x_2, t, \tau_0) = \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_2 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i ;$$

$$T(x_3, t, \tau_0) = \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_3 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i ;$$

$$T(x_4, t, \tau_0) = \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_4 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i ;$$

$$T(x_5, t, \tau_0) = \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_5 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i ;$$

$$T(x_6, t, \tau_0) = \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_6 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i ;$$

$$T(x_7, t, \tau_0) = \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_7 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i ;$$

В общем виде, для N - го количества источников и датчиков d , выражение функции начального нагрева при точки наблюдения x_j будет выглядеть следующим образом

$$T(x_j, t, \tau_0) = \sum_{i=1}^d \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_j \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i ,$$

где $j = 1, 2, \dots, d$.

Через некоторое время температура трубы (пренебрежимо малой толщины- стержня) будет понижаться из-за действия нулевых граничных условий. В точке изотропного стержня x_j функция, $T(x_j, t, \tau_0)$ убывая, достигнет заданного температурного режима $T_{\text{зад}}$. При $t = \tau_1$, включается импульсный источник с релейным принципом управления ξ_j , соответствующий датчику x_j . Тогда в момент времени τ_1 температурный источник x_1 выводит значение равное заданному температурному режиму $T_{\text{зад}}$. Далее включается источник ξ_1 и воздействует на все датчики.

$$T(x_1, t, \tau_1, \xi_1) = \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1 ;$$

$$T(x_2, t, \tau_1, \xi_1) = \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_2 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1 ;$$

$$T(x_3, t, \tau_1, \xi_1) = \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_3 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1 ;$$

$$T(x_4, t, \tau_1, \xi_1) = \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_4 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1 ;$$

$$T(x_5, t, \tau_1, \xi_1) = \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_5 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1 ;$$

$$T(x_6, t, \tau_1, \xi_1) = \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_6 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1 ;$$

$$T(x_7, t, \tau_1, \xi_1) = \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_7 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1 ;$$

Рассчитаем суммарное температурное воздействие всех датчиков на все источники:

$$\begin{aligned}
T(x_1, t) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i + \\
&+ \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1; \\
T(x_2, t) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_2 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i + \\
&+ \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_2 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1; \\
T(x_3, t) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_3 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i + \\
&+ \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_3 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1; \\
T(x_4, t) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_4 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i + \\
&+ \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_4 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1; \\
T(x_5, t) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_5 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i + \\
&+ \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_5 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1; \\
T(x_6, t) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_6 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i + \\
&+ \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_6 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1; \\
T(x_7, t) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_7 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i + \\
&+ \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_7 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1
\end{aligned}$$

В более сокращенном виде для первых трех точек получим следующие результаты:

$$T(x_1, t) = T(x_1, t, \tau_0) + T(x_1, t, \tau_1), \quad T(x_2, t) = T(x_2, t, \tau_0) + T(x_2, t, \tau_1),$$

$$T(x_3, t) = T(x_3, t, \tau_0) + T(x_3, t, \tau_1).$$

С течением времени τ_2 в точке x_3 функция убывает и достигает заданного значения температурного режима $T_{зад}$. После этого включается релейный импульсный источник ζ_3 , который поставлен в соответствие датчику x_3 и создает температурное воздействие на все точки стержня. На каждую точку стержня продолжается воздействие функции начального нагрева. На описанном выше изложенного получим:

$$\begin{aligned} T(x_1, t) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i + \\ &+ \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1 + \\ &+ \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_2) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_3 \\ T(x_2, t) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_2 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i + \\ &+ \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_2 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1 + \\ &+ \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_2) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_2 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_3 \\ T(x_3, t) &= \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_3 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i + \\ &+ \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_3 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1 + \\ &+ \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_2) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_3 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_3 \end{aligned}$$

Тогда получим следующие соотношения температурных полей:

$$T(x_1, t) = T(x_1, t, \tau_0) + T(x_1, t, \tau_1) + T(x_1, t, \tau_2) + \dots + T(x_1, t, \tau_p);$$

$$T(x_2, t) = T(x_2, t, \tau_0) + T(x_2, t, \tau_1) + T(x_2, t, \tau_2) + \dots + T(x_2, t, \tau_p);$$

$$T(x_3, t) = T(x_3, t, \tau_0) + T(x_3, t, \tau_1) + T(x_3, t, \tau_2) + \dots + T(x_3, t, \tau_p);$$

Влияние же всех функций на все источники можно выразить следующим уравнением

$$\begin{aligned}
T(x, t) &= \sum_{i=1}^d \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp\left[-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{\pi n}{l} x \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i = \\
&= \frac{2}{l} \left[\exp\left[-\left(\frac{\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{\pi}{l} x \sin \frac{\pi}{l} \xi_1 + \exp\left[-\left(\frac{2\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{2\pi}{l} x \sin \frac{2\pi}{l} \xi_1 + \dots \right. \\
&+ \exp\left[-\left(\frac{k\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{k\pi}{l} x \sin \frac{k\pi}{l} \xi_1 \left. \right) + \left(\exp\left[-\left(\frac{\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{\pi}{l} x \sin \frac{\pi}{l} \xi_2 + \right. \\
&+ \exp\left[-\left(\frac{2\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{2\pi}{l} x \sin \frac{2\pi}{l} \xi_2 + \dots + \\
&+ \exp\left[-\left(\frac{k\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{k\pi}{l} x \sin \frac{k\pi}{l} \xi_2 \left. \right) + \left(\exp\left[-\left(\frac{\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{\pi}{l} x \sin \frac{\pi}{l} \xi_3 + \right. \\
&+ \exp\left[-\left(\frac{2\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{2\pi}{l} x \sin \frac{2\pi}{l} \xi_3 + \dots \\
&+ \exp\left[-\left(\frac{k\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{k\pi}{l} x \sin \frac{k\pi}{l} \xi_3 \left. \right) + \dots \left. \right] = \\
&= \frac{2}{l} \left[\exp\left[-\left(\frac{\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{\pi}{l} x \left(\sin \frac{\pi}{l} \xi_1 + \sin \frac{\pi}{l} \xi_2 + \sin \frac{\pi}{l} \xi_3 + \dots \right) + \right. \\
&+ \exp\left[-\left(\frac{2\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{2\pi}{l} x \left(\sin \frac{2\pi}{l} \xi_1 + \sin \frac{2\pi}{l} \xi_2 + \sin \frac{2\pi}{l} \xi_3 + \dots \right) + \\
&+ \exp\left[-\left(\frac{3\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{3\pi}{l} x \left(\sin \frac{3\pi}{l} \xi_1 + \sin \frac{3\pi}{l} \xi_2 + \sin \frac{3\pi}{l} \xi_3 + \dots \right) + \dots \left. \right];
\end{aligned}$$

Или в упрощенном виде

$$\begin{aligned}
T(x, t) &= \frac{2}{l} \left[\exp\left[-\left(\frac{\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{\pi}{l} x \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i + \right. \\
&+ \exp\left[-\left(\frac{3\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{3\pi}{l} x \sum_{i=1}^{\frac{d}{3}} \sin \frac{3\pi}{l} \xi_i + \dots \left. \right]
\end{aligned}$$

$$+ \exp \left[- \left(\frac{5\pi a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{5\pi}{l} x \sum_{i=1}^{d/5} \sin \frac{5\pi}{l} \xi_i + \dots \Big];$$

В начальный момент времени (при $t = 0$), выражение примет вид:

$$T(x,0) = \frac{2}{l} \left[\sin \frac{\pi}{l} x \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i + \sin \frac{3\pi}{l} x \sum_{i=1}^{d/3} \sin \frac{3\pi}{l} \xi_i + \right. \\ \left. + \sin \frac{5\pi}{l} x \sum_{i=1}^{d/5} \sin \frac{5\pi}{l} \xi_i + \dots \right];$$

где мощность начального сигнала, будет зависеть от количества составляющих ряда Фурье

$$S_1 = \int_0^l \sin \frac{\pi}{l} x dx = -\frac{l}{\pi} \cos \frac{\pi}{l} x \Big|_0^l = -\frac{l}{\pi} \cos \pi + \frac{l}{\pi} \cos 0 = \frac{2l}{\pi};$$

$$S_2 = \int_0^{l/3} \sin \frac{3\pi}{l} x dx = -\frac{l}{3\pi} \cos \frac{3\pi}{l} x \Big|_0^{l/3} = -\frac{l}{3\pi} \cos \pi + \frac{l}{3\pi} \cos 0 = \frac{2l}{3\pi} = \frac{1}{3} \left(\frac{2l}{\pi} \right);$$

$$S_3 = \int_0^{l/5} \sin \frac{5\pi}{l} x dx = -\frac{l}{5\pi} \cos \frac{5\pi}{l} x \Big|_0^{l/5} = -\frac{l}{5\pi} \cos \pi + \frac{l}{5\pi} \cos 0 = \frac{2l}{5\pi} = \frac{1}{5} \left(\frac{2l}{\pi} \right);$$

$$S_n = \int_0^{l/n} \sin \frac{\pi n}{l} x dx = \frac{1}{n} \left(\frac{2l}{\pi} \right), \text{ где } n - \text{нечётные.}$$

Так как $S_2 = \frac{1}{3} S_1$; $S_3 = \frac{1}{5} S_1$; ...; $S_n = \frac{1}{n} S_1$, то

$$T\left(\frac{l}{2}; 0\right) = \frac{2}{l} \left[\sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i - \sum_{i=1}^{d/3} \sin \frac{3\pi}{l} \xi_i + \sum_{i=1}^{d/5} \sin \frac{5\pi}{l} \xi_i - \dots \right] = \\ = \frac{2}{l} \left[\sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i + \frac{1}{5} \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i - \dots \right] = \\ = \frac{2}{l} \left(\sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i \right) \left(1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \frac{1}{9} - \dots \right) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i;$$

При $x = \frac{l}{4}$: $\sin \frac{\pi}{l} x = \frac{\sqrt{2}}{2}$, $\sin \frac{3\pi}{l} x = \frac{\sqrt{2}}{2}$, $\sin \frac{5\pi}{l} x = -\frac{\sqrt{2}}{2}$, ...,

тогда

$$T\left(\frac{l}{4}; 0\right) = \frac{2}{l} \left(\sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i \right) \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{3} \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{1}{5} \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{1}{7} \frac{\sqrt{2}}{2} + \dots \right) =$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{l} \left(\sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i \right) \left(1 + \frac{1}{3} - \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \frac{1}{9} + \dots \right);$$

При $x = \frac{l}{6}$: $\sin \frac{\pi}{l} x = \frac{1}{2}$, $\sin \frac{3\pi}{l} x = 1$, $\sin \frac{5\pi}{l} x = \frac{1}{2}$, $\sin \frac{7\pi}{l} x = -\frac{1}{2}$,
 $\sin \frac{9\pi}{l} x = -1$, ..., тогда

$$T\left(\frac{l}{6}; 0\right) = \frac{1}{l} \left(\sum_{i=1}^l \sin \frac{\pi}{l} \xi_i \right) \left(1 + \frac{2}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} - \frac{2}{9} + \dots \right);$$

У произвольной фиксированной точки отрезка:

$$T(x_j, t) = \sum_{i=1}^d \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_j \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i +$$

$$+ \sum_p \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_p) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_j \sin \frac{\pi n}{l} \xi_{z(p)}$$

Вывод

В результате проведенных расчетов была спроектирована система автоматического управления распределённым техническим объектом – трубопроводом перекачки и добычи минеральной воды на рудном месторождении Кисловодского месторождения. Синтезированная система позволяет обеспечить температурное поле в трубе в соответствии с температурой добытой минеральной воды, что исключает нанесение вреда микрофлоре и минеральному составу добываемой воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Першин И.М. Анализ и синтез систем с распределёнными параметрами – Пятигорск, 2004, - 212 с.
2. Першин И.М., Малков А.В., Москаленко А.С. Технологически безопасные режимы эксплуатации гидротермальных объектов// Материалы всероссийской научной конференции «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу». – Пятигорск: СКФУ, 2013.
3. Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределёнными параметрами - Москва, Высшая школа, 2005, - 292 с.
4. Малков А.В., Першин И.М., Цаплева В.В. Технологическая безопасность эксплуатации гидротермальных источников. Журнал Известия ЮФУ. Технические науки- 2012. - №4 - С.25-31.
5. Першин И.М., Малков А.В. Синтез распределённых регуляторов для систем управления гидротермальными процессами. – М.: Научный мир, 2007. – 256 с.

6. *Ильюшин Ю.В.* Моделирование температурного поля на гибридном суперкомпьютере по технологии CUDA //Материалы всероссийской научной конференции «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу» / под. ред. Т.А. Шебзуховой, И.М. Першина, А.И. Чернобабова. – Пятигорск. ФГАОУ ВПО «СКФУ» (филиал) в г. Пятигорске 2013.–Т 2 (ч.1) – С 138- 142.

7. *Ильюшин Ю.В., Кравцова А.Л., Мардоян М.М., Санкин А.В.* Исследование устойчивости теплового поля туннельной печи конвейерного типа//Научное обозрение. 2012. № 4. С. 114-120.

8. *Ильюшин Ю.В.* Методика синтеза нелинейных регуляторов для распределенного объекта управления. // Научное обозрение. 2012. №5. – С. 14-17. **МИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ильюшин Ю.В. – кандидат технических наук, e-mail: bdbyu@rambler.ru,
Трушников В.Е. - доктор технических наук, доцент, e-mail: tvye@yandex.ru
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург.



UDC 681.5

DEVELOPMENT OF IMPULSE CONTROL TEMPERATURE FIELD DRILLING SCREW OIL HOT WATER MINERAL DEPOSIT KISLOVODSK NARZANS

Ilyushin Yu.V., Candidate of Engineering Sciences, e-mail: bdbyu@rambler.ru,
Trushnikov V.E., Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: tvye@yandex.ru
National Mineral Resource University "University of Mines".

Kislovodsk deposits of mineral water (narzan) has a number of features that make it impossible to use conventional methods of extraction of mineral water for this field. The methods of controlling temperature field drilling screws and pipe producing sulfate hot seltzer. Our method is also applicable for certain types of mineral water dolomite.

Hot mineral water filling requires that mineral water is delivered hot, with the temperature conforming to the temperature of the mineral water production. At present the water heating is effected by disc heating elements. The article discusses replaceability of the disc heating elements by the segmental heating elements.

Based on the calculations, an automatic control system has been designed for a distributed man-made object—production and transfer pipe at the Narzan Mineral Water Deposit at Kislovodsk. The synthesized system ensures sustained temperature field in the pipe in conformity with the produced mineral water temperature, which guards from degradation of microbiology and mineral composition of the mineral water.

Key words: seltzer, heating elements, temperature control, mathematical model.

REFERENCES

1. *Pershin I.M.*, Analysis and Synthesis of Distributed Systems. Pyatigorsk, 2004. 212 p.
2. *Pershin I.M., Malkov A.V., Tsapleva V.V.*, Technology-Safe Operation Regimes at Hydro-Lithosphere Objects, Proc. All-Russian Int. Conf. Higher-Education Knowledge to the Benefit of the North Caucasian Federal District. Pyatigorsk: SKFU, 2013.
3. *Rapoport E.Ya.*, Analysis and Synthesis of the Distributed Automatic Control. Moscow: Vysshaya shkola, 2005. 292 p.
4. *Malkov A.V., Pershin I.M., Tsapleva V.V.*, Technology-Safe Operation of Hydromineral Sources, *Zhurnal Izvestia YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2013, No. 4, pp. 25–31.
5. *Pershin I.M., Malkov A.V.*, Synthesis of Distributed Regulator Groups for Hydro-Lithosphere Process Control. Moscow: Nauchny mir, 2007. 256 p.