УДК 681.586`326`773: 621.311.004 DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-2

Д. И. Нефедьев, Н. П. Кривулин, В. П. Маланин,
В. В. Кикот, А. В. Зверовщиков

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВСКИПАНИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

D. I. Nefediev, N. P. Krivulin, V. P. Malanin, V. V. Kikot, A. V. Zverovshchikov

FORECASTING THE EFFERVESCENCE OF THE WORKING ENVIRONMENT TO PREVENT EMERGENCY OPERATION OF POWER PLANTS USING PIEZOELECTRIC ACOUSTIC PRESSURE SENSORS

А н н о т а ц и я. ***Актуальность и цели.*** При эксплуатации энергетических установок актуальна проблема прогнозирования, своевременного обнаружения и минимизации последствий воздействия дестабилизирующих факторов. Например, возрастание градиента температуры рабочей среды (теплоносителя, топлива, окислителя и пр.) с достижением температуры ее кипения сопровождается многократным увеличением давления и может стать причиной неконтролируемого (аварийного) режима эксплуатации энергетической установки. Объектом исследования являются процессы изменения акустического шума в диапазоне частот и температуры рабочей среды на протяжении времени от начальных стадий кипения до вскипания рабочей среды. Предмет исследования – способы определения вскипания рабочей среды. Целью работы является исследование возможностей прогнозирования вскипания рабочей среды для предотвращения аварийных режимов эксплуатации энергетических установок с использованием пьезоэлектрических датчиков акустического давления. ***Материалы и методы.*** При математическом моделировании процесса эксплуатации пьезоэлектрических датчиков при кипении рабочей среды использовались методы операционного исчисления. Для расчета значения прогнозируемой длительности времени до вскипания с использованием предлагаемой математической модели использовалось программное обеспечение MathCAD. В экспериментальных исследованиях использовались положения теории планирования эксперимента и принципы математической обработки результатов. ***Результаты.*** Предложена методика прогнозирования вскипания рабочей среды для предотвращения аварийных режимов эксплуатации энергетических установок с использованием пьезоэлектрических датчиков акустического давления. Методика основана на анализе временных зависимостей значений выходных сигналов пьезоэлектрических датчиков информативных относительно акустического давления и температур пьезоэлементов датчиков. Изложены результаты экспериментов по определению временных зависимостей выходных сигналов датчиков. ***Выводы.*** Использование предлагаемой методики способа позволит увеличить задел научно-технических решений, направленных на предотвращение аварийных ситуаций при эксплуатации энергетических установок.

A b s t r a c t. ***Background***. In the operation of power plants is an actual problem of forecasting, early detection and minimize the consequences of exposure to destabilizing factors. For example, the increase of the temperature gradient of the working medium (coolant, fuel, oxidant, etc.) with the temperature reaching its boiling point is accompanied by a multiple increase in pressure and can cause uncontrolled (emergency) mode of operation of the power plant. The object of study is the process of changing of the acoustic noise in the frequency range and temperature of the working environment over time from the initial stages of the boil to boil the working environment. Subject of research – methods of determining the boiling working medium. The aim of this work is to study possibilities of prediction of the boiling of the working environment to prevent emergency modes of operation of power plants using piezoelectric sensors acoustic pressure. ***Materials and methods***. In mathematical modeling of the process of operation of piezoelectric sensors during boiling of the working environment, we used the methods of operational calculus. To calculate the values of the predictable duration of time to boil using the proposed mathematical model used MathCAD software. In the experimental studies used the tenets of the theory of experiment planning and the principles of mathematical processing of the results. ***Results***. The proposed method for predicting boiling of the working environment to prevent emergency modes of operation of power plants using piezoelectric sensors acoustic pressure. The technique is based on the analysis of time dependences of values of output signals of the piezoelectric sensors informative regarding the acoustic pressure and the temperature of piezoelectric sensors. The results of experiments to determine time dependencies of the output signals of the sensors. ***Conclusions***. Using the proposed method the method will allow to increase a backlog of scientific and technical solutions aimed at prevention of emergency situations in the operation of power plants.

К л ю ч е в ы е с л о в а: прогнозирование, аварийный режим, эксплуатация энергетической установки, датчики акустического давления.

K e y w o r d s: forecasting, emergency operation, operation of power plant, sensors of acoustic pressure.

Введение

При эксплуатации энергетических установок актуальна проблема прогнозирования, своевременного обнаружения и минимизации последствий воздействия дестабилизирующих факторов [1–4]. Например, возрастание градиента температуры рабочей среды (теплоносителя, топлива, окислителя и пр.) с достижением температуры ее кипения сопровождается многократным увеличением давления (рис. 1) и может стать причиной неконтролируемого (аварийного) режима эксплуатации энергетической установки [5]. Исследование возможностей прогнозирования вскипания рабочей среды для предотвращения аварийных режимов эксплуатации является актуальной задачей, решение которой способствует повышению надежности энергетических установок.

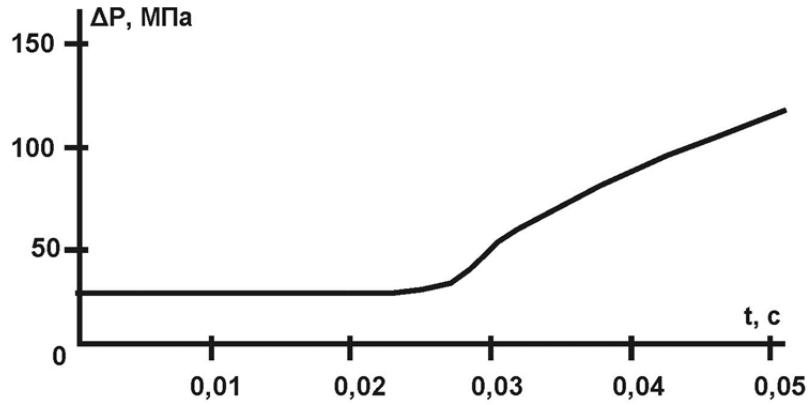

Рис. 1. Повышение давления воды при вскипании на поверхности трубчатого элемента [5]

Известен способ определения вскипания по изменению амплитуды акустических волн, которые генерируются звуковым излучателем, при их прохождении через образующиеся пузырьки пара [6]. Там же приводится способ без использования звукового излучателя, основанный на определении вскипания по возрастанию амплитуды акустического шума, а в работе [7] описывается способ, основанный на анализе изменений спектра акустического шума рабочей среды. Недостатком данных способов является низкая точность определения вскипания в связи с ошибками определения вскипания из-за воздействия посторонних источников акустического шума, например, от подвижных элементов конструкции энергетической установки при изменении режимов ее эксплуатации.

Известен способ обнаружения кипения нагреваемой жидкости, заключающийся в регистрации изменения амплитуды ультразвукового импульсного сигнала при прохождении его сквозь тело, на поверхности которого происходит кипение жидкости [8].

Недостаток этого способа – низкая точность обнаружения кипения при нагревании жидкости погруженным в нее телом, имеющим горизонтальные поверхности, в связи с одинаковыми изменениями амплитуды сигнала, излученного источником ультразвука, при кипении и при отсутствии кипения жидкости из-за скопления жидкости в паровой фазе под горизонтальными поверхностями погруженного в жидкость тела.

Целью работы является исследование возможностей прогнозирования вскипания рабочей среды для предотвращения аварийных режимов эксплуатации энергетических установок с использованием пьезоэлектрических датчиков акустического давления.

Для достижения поставленной цели требуется:

1) получить временные зависимости выходных сигналов пьезоэлектрических датчиков с параметрами, информативными не только относительно акустического давления, но и относительно температур пьезоэлементов датчиков, и сформулировать критерии, позволяющие спрогнозировать длительность времени от начальных стадий кипения до вскипания рабочей среды;

2) на основе сформулированных критериев разработать математическую модель процесса эксплуатации пьезоэлектрических датчиков, применение которой позволит спрогнозировать длительность времени от начальной стадии кипения до вскипания рабочей среды.

Основная часть

Временные зависимости выходных сигналов пьезоэлектрических датчиков акустического давления с параметрами, информативными относительно акустического давления и температур пьезоэлементов датчиков, определены с использованием лабораторной установки, схема которой приведена на рис. 2.

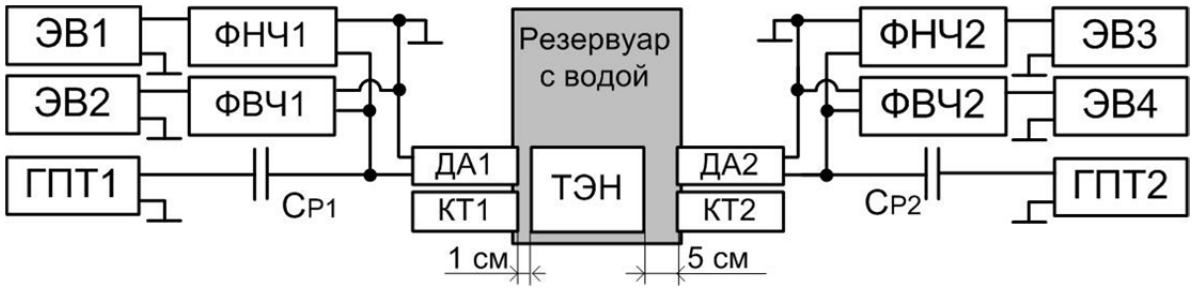

Рис. 2. Схема лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из резервуара с водой, термоэлектрического нагревательного элемента ТЭН, двух пьезоэлектрических датчиков акустического давления ДА1 и ДА2 типа ДХС 525 [9], контрольных термометров КТ1 и КТ2 типа ТЛ-2 ГОСТ 215-73, причем ДА1 и КТ1 установлены на расстоянии 1 см, а ДА2 и КТ2 – на расстоянии 5 см от нагревательной поверхности ТЭНа. Градиент повышения температуры воды в используемой установке составляет 120 ºС в час.

Измерительная цепь состоит из генераторов переменного синусоидального тока частотой 1 МГц и амплитудой 12 В ГПТ1 и ГПТ2 типа HandyScope HS4, разделительных конденса-

торов C_{P1} и C_{P2}, фильтров низких частот ФНЧ1 и ФНЧ2 со значениями верхней границы полосы пропускания 10 кГц, фильтров высоких частот ФВЧ1 и ФВЧ2 со значениями нижней границы полосы пропускания 1 МГц, электронных цифровых вольтметров ЭВ1–ЭВ4 типа В7–78.

Пьезоэлементы датчиков ДА и ДА2 изготовлены из модифицированного пьезоматериала ЦТС-83Г, что позволяет использовать их для измерения не только акустического давления, но и температур пьезоэлементов датчиков [10]. Информативными относительно акустического давления являются среднеквадратичные значения (СКЗ) амплитуды выходных напряжений ДА1, ДА2 на частоте от 20 Гц до 10 кГц. Информативными относительно температуры являются СКЗ амплитуды выходных напряжений ДА1, ДА2 на частоте 1 МГц.

На рис. 3 приведены результаты определения временных зависимостей выходных сигналов пьезоэлектрических датчиков.

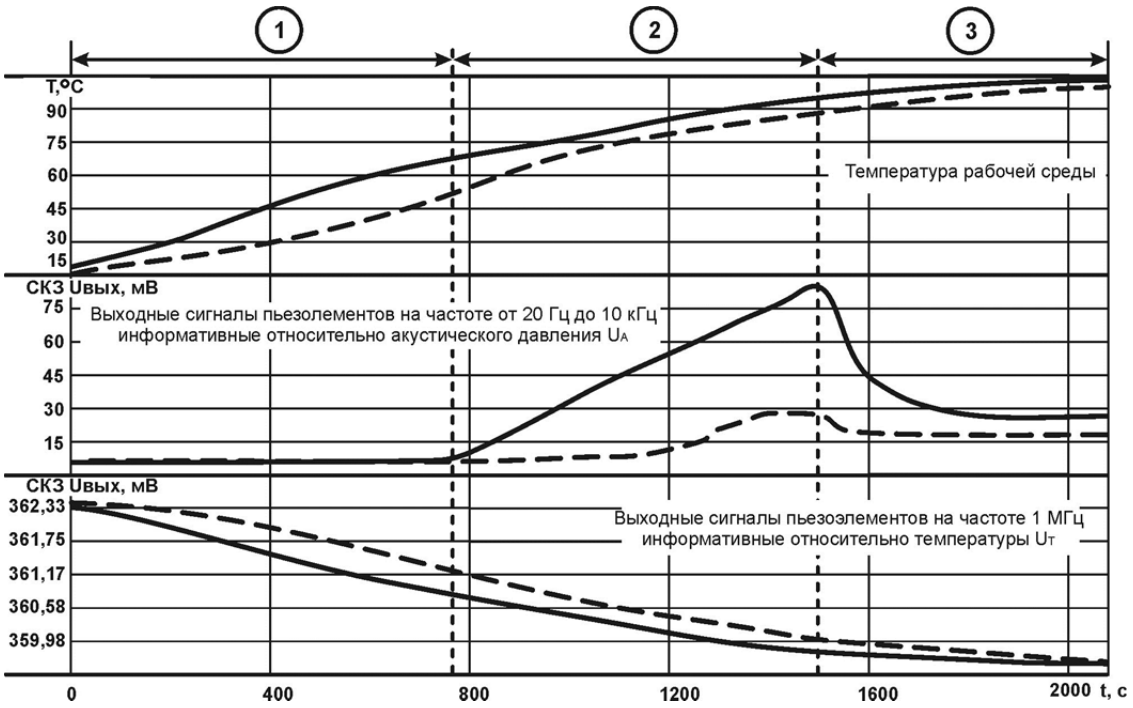

Рис. 3. Выявление критериев для определения времени от ранней стадии кипения до вскипания рабочей среды

В течение первого интервала с 0 до 330 с, до начальной стадии кипения, на поверхности ТЭНа образуются пузырьки пара диаметром до 0,5 мм, изменения акустического давления незначительны. Во втором интервале с 331 по 1560 с, на начальной стадии кипения, на поверхности ТЭНа продолжается образование и отделение пузырьков пара, диаметр которых увеличивается с 0,5 до 7 мм с ростом температуры. Этот процесс сопровождается ростом акустического давления. В момент времени равный 1560 с акустическое давление достигает своего максимального значения. В начале третьего интервала, который длится с 1561 по 2100 с, вода вскипает и кипит с образованием пузырьков пара диаметром до 1 см, что сопровождается снижением акустического давления.

Анализ результатов эксперимента показал, что спрогнозировать длительность времени до вскипания рабочей среды (длительность второго интервала показана на рис. 3) можно на основе использования математической модели процесса эксплуатации пьезоэлектрического датчика при вскипании рабочей среды на основе двух следующих критериев:

1) критерий начальной стадии кипения, которым является соответствие измеренных при эксплуатации СКЗ амплитуды выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2, информативных относительно измеряемого акустического давления и температуры рабочей среды, значениям, которые соответствуют начальной стадии кипения;

2) критерий вскипания рабочей среды, которым является соответствие измеренных при эксплуатации СКЗ амплитуды выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2 информативных отно-

сительно измеряемого акустического давления и температуры рабочей среды, значениям, которые соответствуют моменту вскипания рабочей среды.

Параметры математической модели процесса эксплуатации предлагается определять по результатам измерения СКЗ амплитуды выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2 в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации, при известных значениях объема сосуда и рабочей среды, плотности, давления, температуры вскипания рабочей среды.

Физические явления, которые наблюдаются в чувствительном элементе пьезоэлектрического датчика при вскипании рабочей среды, не дают возможности составить полную физическую модель процесса его эксплуатации из-за необходимости учета влияния многих воздействующих факторов и дать ее математическое описание [4, 6]. Поэтому в качестве математической модели процесса эксплуатации пьезоэлектрического датчика рассматривается модель вида «вход-выход» для дискретных динамических систем с распределенными параметрами, которая описывается уравнением вида [11, 12]

$$U_{AK}(k,m)=\sum_{i=0}^{k}\sum_{j=0}^{m-1}g(k,i,m,j)x(i,j), \tag{1}$$

где $m = 1$ – для датчика ДА1, а $m = 2$ – для датчика ДА2; $k = 0, 1, 2, \ldots$ – временные отсчеты измерения СКЗ амплитуды выходного напряжения для ДА1 и ДА2 на частоте от 20 Гц до 10 кГц; $x(k,1)=U_1(k)$, $x(k,2)=U_2(k)$, $k=0,1,2,...$ – СКЗ амплитуды выходного напряжения ДА1 и ДА2 на частоте от 20 Гц до 10 кГц (информативные относительно измеряемого акустического давления); $g(k,i,m,j)$ – импульсная переходная функция процесса эксплуатации пьезоэлектрического датчика; $U_{AK}(k,m)$ – выходной сигнал, в качестве которого выступает индикаторная функция, определяемая выражением

$$U_{AK}(k,m)=\begin{cases}0, & k=0,1,2,...,k_v-1,\\ 1, & k=k_v,k_v+1,...,k_K, \quad m=1,2,\\ 0, & k=k_K+1,k_K+2,...,\end{cases} \tag{2}$$

где k_v – временной отсчет, соответствующий начальной стадии кипения; k_K – временной отсчет, соответствующий вскипанию рабочей среды.

Время от начальных стадий кипения с требуемыми значениями акустического давления и температуры рабочей среды до момента вскипания определяется выражением $\Delta T_p = k_K - k_v + 1$.

Импульсная переходная функция находится при условии

$$g(k,i,m,j)=-\frac{1}{4\pi^2}\oint_{C_2}\oint_{C_1}G(z_1,z_2)[q_1(z_1)]^{-i}[q_2(z_2)]^{-j}z_1^{-k}z_2^{-m}dz_1dz_2, \tag{3}$$

где C_1, C_2 – контуры интегрирования, содержащие все особые точки функции $G(z_1,z_2)[q_1(z_1)]^{-i}[q_2(z_2)]^{-j}$.

При этом предполагается, что Z-преобразование импульсной переходной функции $g(k,i,m,j)$ по переменным k,m удовлетворяет условию

$$Z\left[g(k,i,m,j)\right]=G(z_1,z_2)[q_1(z_1)]^{-i}[q_2(z_2)]^{-j},$$

где функции $G(z_1,z_2),q_1(z_1),q_2(z_2)$ есть некоторые аналитические функции, значения которых определяются из решения системы уравнений

$$\begin{cases}G(z_1,z_2)X_1(q_1(z_1),q_2(z_2))=U_{AK}(z_1,z_2),\\ G(z_1,z_2)X_2(q_1(z_1),q_2(z_2))=U_{AK}(z_1,z_2),\\ G(z_1,z_2)X_3(q_1(z_1),q_2(z_2))=U_{AK}(z_1,z_2),\end{cases} \tag{4}$$

где $X_1(z_1,z_2)$, $X_2(z_1,z_2)$, $X_2(z_1,z_2)$ – Z-преобразования входных сигналов $x_1(k,m)$, $x_1(k,m)$, $x_1(k,m)$, $m=1,2$; $k=0,1,2,...$, которое определяется формулой

$$F(z_1,z_2)=\sum_{m=0}^{\infty}\sum_{k=0}^{\infty}f(k,m)z^{-k}z^{-m}.$$

Для разработки математической модели, определяемой выражением (1), требуется по временным зависимостям СКЗ амплитуд выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2 на частотах от 20 Гц до 10 кГц построить импульсную переходную функцию (3).

Для измеряемого акустического давления принято, что $U_1(k,m)$, $m=1,2$; $k=2l$, $l=0,1,2,...$ – четные отсчеты измеряемых СКЗ амплитуды выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2; $U_2(k,m)$, $m=1,2$; $k=2l+1, l=0,1,2,...$ – нечетные отсчеты измеряемых СКЗ амплитуды выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2; $x_3(k,m)=U_1(k)-U_2(k)$, $k=0,1,2,...$ – разность СКЗ амплитуды выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2.

Для определения значения длительности времени до вскипания рабочей среды, которое характеризуется не только началом переходного процесса в датчиках ДА1 и ДА2, но и его продолжительностью, определяются математические модели ДА1 и ДА2 в виде

$$U_{AK}(k,m)=\sum_{l=0}^{k}g(m,k,l)\cdot T(l), \qquad (5)$$

где m = 1, 2 – временные отсчеты измерения акустического давления; k = 0, 1, 2, ... – временные отсчеты измерения СКЗ амплитуды выходного напряжения ДА1 и ДА2 на частоте от 20 Гц до 10 кГц, информативные относительно акустического давления; l = 0, 1, 2, … – временные отсчеты измерения СКЗ амплитуды выходного напряжения ДА1 и ДА2 на частоте 1 МГц, информативные относительно температуры; $g(m,k,l)$ – импульсные переходные функции процесса эксплуатации датчиков ДА1 и ДА2; $T(l)$ – значения температуры рабочей среды, полученные с использованием СКЗ выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2 на частоте 1 МГц, информативных относительно температуры рабочей среды.

Метод определения импульсных переходных функций $g(m,k,l)$, $m=1,2; k=0,1,2,...$ аналогичен методу определения импульсной переходной функции $g(k,i,m,j)$ модели(1).

Переходные процессы в датчиках ДА1 и ДА2 определяются переходными функциями (6) и (7) соответственно:

$$h_1(k,m)=\sum_{l=0}^{k}g(1,k,l),k=0,1,2,..., \qquad (6)$$

$$h_2(k,m)=\sum_{l=0}^{k}g(2,k,l),k=0,1,2,.... \qquad (7)$$

Заключение

Предлагаемые математические модели процесса эксплуатации пьезоэлектрических датчиков акустического давления позволяют при известных значениях объема сосуда и рабочей среды, плотности, давления, температуры вскипания рабочей среды:

1) прогнозировать длительность времени до вскипания рабочей среды с использованием выражения (1);

2) провести имитационное моделирование процесса эксплуатации пьезоэлектрического датчика при вскипании рабочей среды с использованием выражения (5);

3) определить с использованием выражения (5) качество переходных процессов в датчиках ДА1 и ДА2, описываемых уравнениями (6), (7).

Использование предлагаемого способа позволит увеличить задел научно-технических решений, направленных на предотвращение аварийных ситуаций при эксплуатации энергетических установок.

Библиографический список

1. Баринов, И. Н. Разработка и изготовление микроэлектронных датчиков давления для особо жестких условий эксплуатации / И. Н. Баринов, В. С. Волков, Б. В. Цыпин, С. П. Евдокимов // Датчики и системы. – 2014. – № 2. – С. 49–61.
2. Волков, В. С. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 1 (3). – С. 30–36.
3. Мокров, Е. А. Разработка высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / Е. А. Мокров, И. Н. Баринов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 1. – С. 23–27.
4. Коротких, А. Г. Основы гидродинамики и теплообмена в ядерных реакторах : учеб. пособие / А. Г. Коротких, И. В. Шаманин. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та, 2007. – 117 с.
5. Левин, А. А. Применение преобразования Гильберта-Хуанга в задачах экспериментального изучения теплофизических процессов / А. А. Левин, В. А. Спиряев // Обобщенные постановки и решения задач управления : сб. тр. Междунар. симп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – С. 28–29.
6. Пат. 2065604 РФ, С1, МПК G01N29/02, A47J27/212. Способ определения момента закипания жидкости и устройство для его осуществления / Миллер А. А. ; заявл. 25.04.1994 ; опубл. 20.08.1996.
7. Кривцов, В. А. Высокотемпературные акустические датчики с органосиликатной изоляцией / В. А. Кривцов, Р. Ф. Масагутов. – Л. : Наука, 1982. – 167 с.
8. А. с. SU 1503502 A1, МПК G01N 29/02. Способ обнаружения кипения нагреваемой жидкости / Смирнов О. В., Ремизов Ю. А. ; № 4288911/28 ; заявл. 04.05.1987 ; опубл. 27.03.1997.
9. Преобразователи. Системы. Каталог ОАО «НИИФИ». – Пенза : Пензенская правда, 2011. – С. 70–98.
10. Кикот, В. В. Разработка электронного преобразователя для пьезодатчика динамического давления / В. В. Кикот, В. П. Маланин, А. С. Баранов // Приборы. – 2015. – № 10. – С. 10–16.
11. Бойков, И. В. Аналитические и численные методы идентификации динамических систем : монография / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – 398 с.
12. Бойков, И. В. Математическая модель пьезодатчиков динамического давления / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин, В. В. Кикот // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 295–297.

Нефедьев Дмитрий Иванович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Nefediev Dmitriy Ivanovich
doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of information-measuring technique and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кривулин Николай Петрович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра высшей и прикладной математики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: krivulin@bk.ru

Krivulin Nikolay Petrovich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of high and applied mathematics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Маланин Владимир Павлович
кандидат технических наук,
инженер-электроник,
Научно-исследовательский институт физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: ait@pnzgu.ru

Malanin Vladimir Pavlovich
candidate of technical sciences,
electronic engineer,
Scientific-research Institute of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Кикот Виктор Викторович
кандидат технических наук,
начальник технологического бюро,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inbox@post.su

Kikot Viktor Viktorovich
candidate of technical sciences,
chief of technological bureau,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Зверовщиков Анатолий Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра технологии машиностроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tmspgu@mail.ru

Zverovshchikov Anatoliy Vladimirovich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of technology
of mechanical engineering,
Пензенский государственный университет
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.586`326`773: 621.311.004

Прогнозирование вскипания рабочей среды для предотвращения аварийных режимов эксплуатации энергетических установок с использованием пьезоэлектрических датчиков акустического давления / Д. И. Нефедьев, Н. П. Кривулин, В. П. Маланин, В. В. Кикот, А. В. Зверовщиков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – №4 (22). – С. 14–21. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-2.