

4. *Eisert J., Wilkens M., Lewenstein M.* Quantum Games and Quantum Strategies // *Phys.Rev.Lett.* 83:3077. 1999. arXiv:quant-ph/9806088v3.
5. *Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Касаркин А.В.* Использование квантовой запутанности для увеличения выигрыша в задачах теории игр для двух и трех игроков // *Информатизация и связь*. – 2013. – № 5. – С. 103-106.
6. *Думачев В. Н.* Модели и алгоритмы квантовой информации: Монография. – Воронеж: ВИМВД, 2009. – 231 с.
7. *Flitney Adrian P. Abbott Derek.* An introduction to quantum game theory // *Fluct. Noise Lett.* 2. 2002. R175-87. arXiv:quant-ph/0208069v2.
8. *Eisert J., Wilkens M.* Quantum Games // *J. Mod. Opt.* 47 2543. 2000. arXiv:quant-ph/0004076v1.
9. *Касаркин А. В.* Квантовая запутанность и квантовая теория игр // *Высокопроизводительные вычислительные системы: Сб. науч. тр. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2012. – Вып. 2. – С. 16-20.*
10. *Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Касаркин А.В.* Квантовая запутанность и её значение в теории игр // *Сб. тр. X Всероссийской научной конференции молодых ученых аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление – ИТСАиУ-2012».* – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2012. – Т. 1. – С. 222-225.
11. *Касаркин А.В., Гушанский С.М.* Очищение запутанности // *Сб. науч. тр. третьей Всероссийской школы-семинара аспирантов, студентов и молодых ученых ИМАП-2011.* – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2011. – С. 210-212.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.А. Башков.

Гузик Вячеслав Филиппович – Южный федеральный университет; e-mail: gvf@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1; тел.: +78634371656; кафедра вычислительной техники; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Гушанский Сергей Михайлович – e-mail: kron@pbox.ttn.ru; кафедра вычислительной техники; доцент.

Касаркин Алексей Викторович – e-mail: kav589@mail.ru; кафедра вычислительной техники; магистрант.

Guzik Viacheslav Filipovich – Southern Federal University; e-mail: gvf@tsure.ru; 1, Engelsa street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; head the department; dr. of eng. sc.; professor.

Gushanskiy Sergey Mihaylovich – e-mail: kron@pbox.ttn.ru; the department of computer engineering; associate professor.

Kasarkin Alexey Viktorovich – e-mail: kav589@mail.ru; the department of computer engineering; undergraduate.

УДК 681.51

В.М. Радионов

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОЦИКЛОНОМ КАК СЛОЖНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

Рассматриваются вопросы формирования адаптивной системы управления центробежным гидравлическим классификатором по качественным и количественным критериям для повышения энергоэффективности обогатительных фабрик. Гидродинамика гидроциклона представлена сложной внутренней структурой потока, численное моделирование которого остается нетривиальной задачей. Проведен анализ существующих моделей. Быстрое стохастическое изменение свойств и состава пульпы и различные ограничения проведения измерений при получении информации о состоянии объекта управления требуют применения

перспективных ультразвуковых средств контроля, с использованием эффектов высокоэнергетического ультразвука. Гранулометрический состав многофазной суспензии определяется через функцию пространственного распределения частиц твердой фазы в контролируемом объеме, на который оказывают ультразвуковое воздействие. Выявлена определенная аналогия пространственного перераспределения частиц при высокоэнергетическом ультразвуковом воздействии, с подобным пространственным перераспределением под действием комплекса сил в поле центробежных сил гидроциклона. Гидроциклон в предложенной системе управления рассматривается как сложный динамический объект в условиях неопределенности параметров и неполной информации о состоянии. В качестве примера представлены зависимости точности регулирования с использованием предложенных моделей.

Гидроциклон; ультразвуковой контроль; адаптивная система управления.

V.M. Radionov

ADAPTIVE CONTROL HYDROCYCLONE AS COMPLEX DYNAMIC OBJECTS

Considers the problem of adaptive control system of hydraulic centrifugal classifier on qualitative and quantitative criteria for energy efficiency concentrators. Hydrodynamics hydrocyclone presented complex internal structure flow, numerical simulation which is a non-trivial task. The analysis of existing models. Fast stochastic variation of the properties and composition of the pulp and various restrictions measurements and obtaining information about the state of the control object require perspective ultrasonic controls using high-energy effects of ultrasound. Granulometric composition of a multiphase suspension is determined by the function of the spatial distribution of solid particles in a controlled volume, which have sonication. Spotted a certain analogy of spatial redistribution of particles in high-energy ultrasonic treatment, with similar spatial redistribution under the influence of forces in the complex field of centrifugal forces hydrocyclone. Hydrocyclone in the proposed control system viewed as a complex dynamic object under conditions of uncertainty parameters and incomplete information about the state. As an example, shows the dependence of control accuracy using the proposed models.

Hydrocyclone; ultrasonic means control; adaptive control system.

Анализ исследований и публикаций: Повышение энергоэффективности обогатительного передела обуславливает применение современных подходов к автоматизации процессов. На стадии измельчения классификации расходуется значительная часть энергоресурсов, а гидроциклон-классификатор по сути формирует показатели цикла. В работах [1, 2, 6], предложены математические модели сепарационных характеристик, проведено исследование структуры течения и сепарационных процессов в гидроциклоне с учетом турбулентности потока и турбулентной диффузии частиц. Из-за сложности решения систем уравнений в трехмерной постановке вводятся некоторые ограничения в виде определенных, несколько идеализированных условий. Сложность математического описания трудноформализуемых нелинейных процессов в турбулентном потоке гидроциклона обуславливает необходимость уточнения эмпирическими методами, которые также ограничены возможностями и условиями проведения измерений, временем для анализа проб и др.

С развитием современных ультразвуковых средств воздействия и контроля, описанных в работе [3, 7], появляется возможность контроля ряда различных свойств многофазных, агрессивных, газонаполненных сред, и что важно в режиме реального времени процесса. В работе [4, 8] рассмотрены вопросы идентификации параметров состояния сложных динамических объектов с векторными входами и выходами, что позволяет снизить влияние неопределенностей процесса и неточностей математических моделей на качество управления.

Задачей исследований является разработка адаптивной системы управления гидроциклоном, на основе принципов векторного управления, с идентификацией параметров состояния объекта, на основе ультразвуковых средств воздействия и контроля многофазных суспензий.

Основные моменты исследования: Особенности большинства объектов обогащительного передела таковы, что точное математическое описание либо отсутствует, либо ограничено определенными или неопределенными условиями, либо изменяется в широких пределах, чаще всего по причине сложности или невозможности измерения параметров состояния объекта в процессе работы. Для решения задач управления сложными динамическими многомерными объектами с векторными входами и выходами, в условиях неопределенности или неполноты информации о состоянии объекта управления используют системы управления на основе робастных и адаптивных подходов, с возможностью идентификации недостающих параметров, что позволяет повысить надежность систем, а также снизить технологические требования при их проектировании.

Система управления такого объекта должна содержать информацию о математической модели исследуемого объекта и информацию о состоянии самого объекта. Рассмотренные модели описания процессов измельчения, классификации, сепарации многофазных сред требуют достаточно сложных математических решений, с принятием определенных ограничений, начальных условий [2], при несоответствии которым данные о модели объекта могут являться (в определенном диапазоне) неточными. Поэтому дополнительная настройка параметров модели по истории наблюдений за входами и выходами системы может существенно улучшить качество управления системой.

В определенных ситуациях, которые связаны с вырожденностью движения объекта на рассматриваемом интервале времени, что часто характерно для режимов движения, когда переходные процессы в системе близки к завершению, и при возникновении бифуркаций, процессы идентификации не всегда могут привести к ожидаемым результатам. В таких случаях более адекватными прогнозирующими свойствами будут обладать априорные модели.

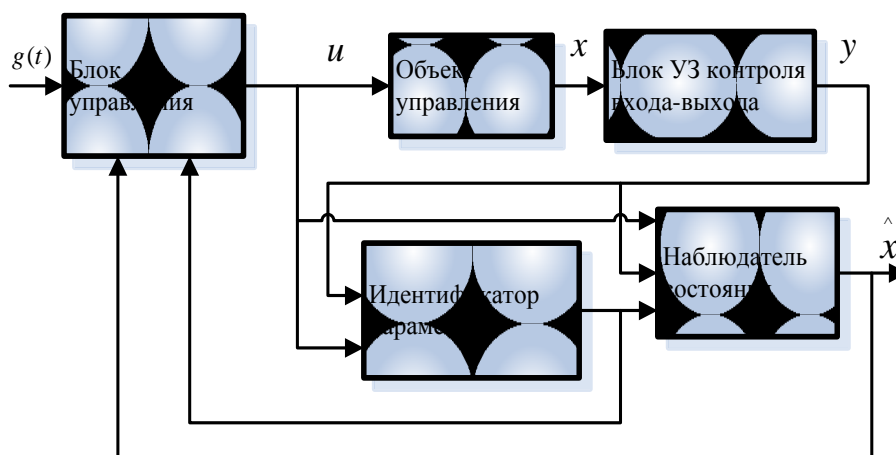


Рис. 1. Адаптивная система управления гидроциклоном идентификационного типа

Построение адаптивной системы требует создания математической структуры, интегрирующей в себя как априорные модели динамики объекта, так и алгоритмы параметрической идентификации объекта, оценку вектора состояния динамической системы, синтез управления объектом.

Качественный критерий работы гидроциклона определяется гранулометрическим составом слива, соответственно эффективное регулирование по данному критерию требует достоверной информации о гранулометрическом составе питания гидроциклона. Актуальную гранулометрическую характеристику многофазной суспензии в режиме реального времени процесса, и даже модель поведения частиц можно получить через функцию пространственного распределения частиц твердой фазы с помощью ультразвуковых средств воздействия и контроля. Для этого в системе текущего контроля входных и выходных параметров пульпы, с определенной дискретностью, с помощью ультразвуковых колебательных систем (УЗКС), на пульпу оказывают воздействие высокоэнергетическим ультразвуком. Под действием ультразвукового давлением частицы твердой фазы пространственно перераспределяются в контролируемом объеме, в зависимости от крупности и плотности, причем важна определенная аналогия такого пространственного перераспределения с подобным перераспределением под действием комплекса сил, действующих в поле центробежных сил гидроциклона.

Одновременно в канале контроля, кроме общих параметров пульпы, измеряются величины затухания ультразвукового зондирующего сигнала, в моменты воздействия высокоэнергетического ультразвука (1), и в моменты отсутствия такого воздействия (2).

На основе отношения этих величин затухания определяют элементы функции распределения частиц по крупности, и плотности, поскольку эта величина зависит от интенсивности ультразвукового поля, времени воздействия и распределения частиц по плотности и размерам [3, 7]:

$$S_0 = \ln \left(\frac{I_0 \pi R^2}{\tilde{I}_v} \right) = \frac{Wl}{\pi} \int_0^{\infty} dr f_{\eta}(r) \sigma(r, \nu), \quad (1)$$

$$S_1 = \left(\frac{I_0 \pi R^2}{I_v} \right) = \frac{Wl}{\pi} \int_0^{\infty} dr f_{\eta}(r) \sigma(r, \nu) \times \left[\int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} d\rho \tilde{\phi}(r, \rho) \frac{e^{\alpha z_0}}{e^{\alpha z_0} - \alpha \beta t} St(e^{\alpha z_0} - 1 - \alpha \beta t) \right]. \quad (2)$$

По сути полученная информация характеризует не только гранулометрический состав пульпы, но и по определенной аналогии прогнозирует будущее поведение частиц твердой фазы после подачи пульпы в гидроциклон. Это дает возможность идентифицировать параметры объекта управления, в режиме реального времени корректировать настройки аппарата, при этом регулировать давление пульпы на входе в гидроциклон, в соответствии с реальными характеристиками поступающей пульпы, изменяя параметры разделения для корректировки гранулометрического состава слива гидроциклона.

Параметрическая идентификация линейного динамического объекта, динамика которого описывается в виде [4, 8]:

$$\begin{cases} X = AX + BU \\ Y = CX + DU; X(t_0) = X_{ic} \end{cases}, \quad (3)$$

где $X = \{n, 1\}$, $U = \{m, 1\}$, $Y = \{r, 1\}$

Матрица системы A , элементы которой определяются структурной схемой системы и значениями ее параметров, характеризует динамические свойства системы, ее свободное движение. Матрица управления B характеризует влияние внешних воздействий на переменные состояния системы, т.е. определяет чувствительность системы к внешним воздействиям (задающим и возмущающим). Матрица наблюдения C характеризует связь выходной величины системы с вектором состояния. При гидравлической классификации в гидроциклонах не все составляющие вектора состояния являются наблюдаемыми сигналами, т.е. могут быть измерены с помощью каких-либо датчиков, в то время как входной и выходной сигнал всегда наблюдаем. Матрица связи D устанавливает связь выходной величины системы с внешним воздействием.

Рассмотрим модель

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = \hat{A} \hat{X} + \hat{B} U \\ \hat{Y} = \hat{C} \hat{X} + \hat{D} U; \hat{X}(t_0) = \hat{X}_{ic} \end{cases} \quad (4)$$

Требуется по результатам наблюдений векторных входа и выхода $U(t), Y(t)$ объекта (3) определить параметры системы (4), исходя из минимума рассогласования выхода модели (4) и наблюдений объекта (3), во временной области, т.е. минимизации следующего функционала (при нулевых начальных условиях):

$$J(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}) = \int_{t_0}^t \sum_{j=1..r} e_j^2(t) dt, \quad (5)$$

$$e_j = Y_j - \hat{C}_j (sI - \hat{A})^{-1} \hat{B} U - \hat{D}_j U$$

где e_j – ошибка рассогласования j -го выхода ($j=1..r$) модели (4) и j -го выхода объекта (3). Таким образом, требуется найти такие параметры системы (4), чтобы рассогласование векторных выхода объекта (3) и выхода модели (4) было минимальным во временной области в смысле критерия (5).

Задача параметрической идентификации ММО-объекта, в случае векторных входов и выходов, с сохранением порядка модели может быть основана на идентификации r скалярных динамических объектов.

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}}_j = \hat{A}_j \hat{X}_j + \hat{B}_j U \\ y_j = \hat{C}_j \hat{X}_j + \hat{D}_j U; \hat{X}_j(t_0) = \hat{X}_{icj} \end{cases} \quad (6)$$

где $\hat{X}_j = \{n, 1\}, U = \{m, 1\}, y_j = \{1, 1\}, j = 1..r$.

Далее, для каждого скалярного объекта (6) с уже найденными параметрами аппроксимируется векторный выход Y объекта (3) векторным выходом \hat{Y}_j системы (6):

$$\hat{Y}_j = C_{Fj} \hat{X}_j + D_{Fj} U. \quad (7)$$

Заменой переменных

$$A_{Fe} = [C_{Fj}; D_{Fj}] W_j = \begin{bmatrix} \hat{X}_j; U \end{bmatrix} \quad (8)$$

задача вычисления матриц C_{Fj}, D_{Fj} сводится к задаче решения системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестной матрицы A_{Fe} :

$$Y_j = A_{Fe} W_j, \quad (9)$$

где матрица A_{Fe} искомым параметров может быть вычислена итерационными методами (например, lsqr) на основе SVD-разложения и др., зависящего от структуры матрицы W_j .

Получаем r вариантов модели динамики МИМО-объекта:

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}}_j = \hat{A}_j \hat{X}_j + \hat{B}_j U \\ \hat{Y}_j = C_{Fj} \hat{X}_j + D_{Fj} U; \hat{X}_j(t_0) = \hat{X}_{icj} \end{cases}, \quad (10)$$

где $C_{Fj} = \{r, n\}; D_{Fj} = \{r, m\}; j = 1..r$.

За искомую модель (4) принимается лучшая по критерию (5) из r вариантов моделей (10).

Промоделировав с помощью MATLAB некоторые процессы происходящие в различных блоках рассмотренной многомерной адаптивной САУ с векторными входами и выходами. Рассмотрим регулирование по качественным и количественным критериям.

Сравним показатели точности регулирования по параметрам граничной крупности, который также определяет выход контрольного класса крупности, и производительности, в разомкнутом и замкнутом контурах регулирования, на основе математической модели рис. 2 и с комбинацией математической и ультразвуковой модели рис. 3.

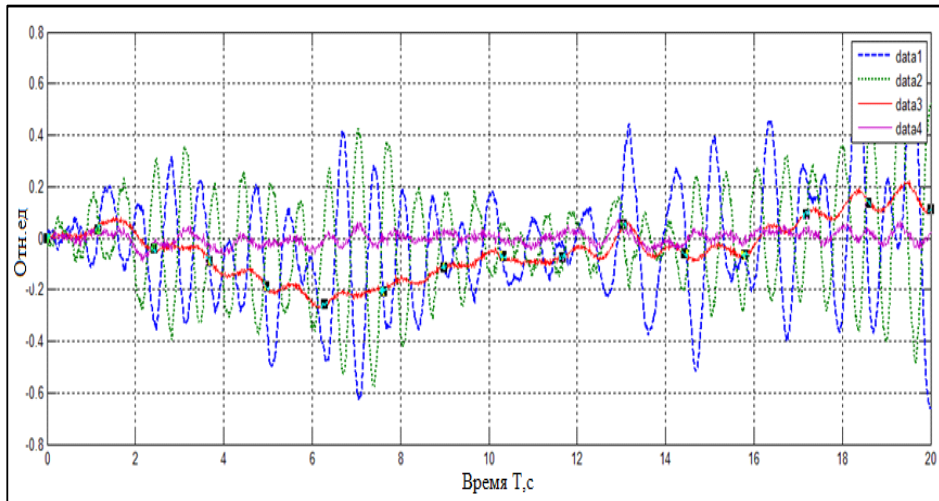


Рис. 2. Регулировка по параметру граничной крупности-data3, и производительности-data4, разомкнутый контур регулирования data1, data2

Наблюдается изменение по параметру крупности граничного зерна. Поскольку более точная априорная математическая модель ориентирована на количественный критерий, выход контрольного класса крупности зависит от плотности и давления.

Современные методы ультразвукового воздействия и контроля состояния позволяют смоделировать приближенную к реальной динамике разделения частиц твердой фазы, с учетом стохастических изменений свойств пульпы. Привязка к реальной модели разделения частиц твердой фазы дает более точную информацию о состоянии пульпы в текущий момент времени, уже с учетом динамики изменений свойств пульпы и физико-минералогических свойств твердой фазы (рис. 3).

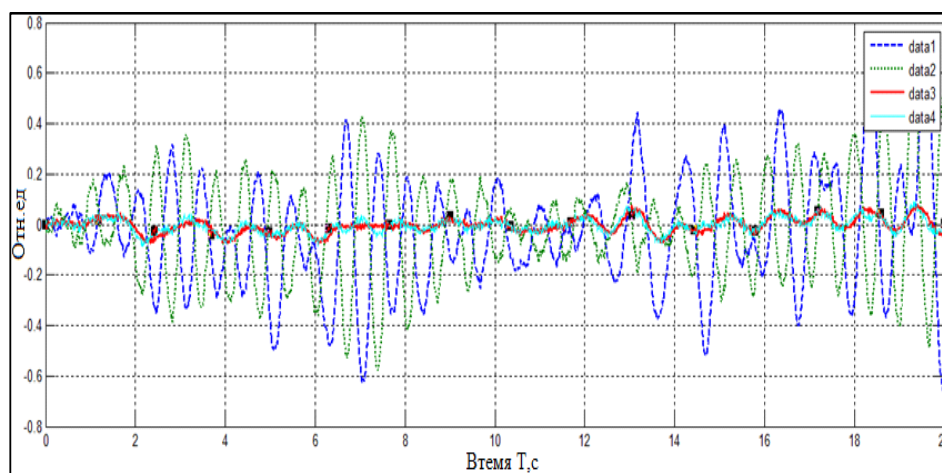


Рис. 3. Регулирование с комбинацией математической и ультразвуковой модели. В замкнутом – data3,4, и разомкнутом контуре – data1,2

В конкретном случае применительно к гидроциклону реальная модель разделения частиц твердой фазы дает более точную информацию о состоянии пульпы в текущий момент времени, уже с учетом динамики изменений свойств пульпы и физико-минералогических свойств твердой фазы.

Выводы. Современные средства ультразвукового воздействия и контроля состояния многофазных сред позволяют проводить измерение параметров векторов входа и выхода, с достаточным быстродействием, в режиме реального времени. Это позволяет системе управления решать две задачи – идентификацию неизвестных параметров и адаптивное оценивание вектора состояния объекта при наличии информации только о структуре математической модели объекта и не требуется знания точной информации о параметрах объекта. Решение задачи производится в классе линейных дискретных и непрерывных систем в процессе функционирования системы.

Принимая во внимание возможную некоторую неточность математических моделей в определенных режимах, для повышения качества регулирования целесообразно использовать приближенную к реальной ультразвуковую модель разделения в гидроциклоне, на основе функции пространственного распределения частиц в поле высокоэнергетического ультразвука, аналогичную с подобной функцией распределения в поле центробежных сил гидроциклона.

Исследования реального процесса колебания физико-химических и минералогических свойств железорудной пульпы показывают, что возможности ультразвуковых способов воздействия и контроля позволяют производить корректировку

регулятора или параметров модели как непрерывно, так и при возникновении определенных изменений в составе и свойствах поступающего в гидроциклон потока. Определение моментов необходимой коррекции может происходить, в том числе, на основе анализа изменения дисперсии ультразвукового сигнала, что соответствует изменению параметров суспензии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дик И.Г., Матвиенко О.В., Неессе Т. Моделирование гидродинамики и сепарации в гидроциклоне // Теоретические основы химической технологии. – 2000. – Т. 34, № 5. – С. 478-488.
2. Евтюшкин Е.В. Математическое моделирование движения дисперсной фазы и сепарации в гидроциклоне: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск: Государственный архитектурно-строительный университет, 2007.
3. Моркун В.С. Ультразвуковой контроль характеристик твердой фазы пульпы // Обогащение руд. – 1992. – № 2. – С. 41-45.
4. Надеждин О.В. Координатно-параметрическая идентификация динамической системы с векторными входом и выходом // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2009. – № 6. – С. 50-63.
5. Мирошни, И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
6. Матвиенко О.В., Дик И.Г. Численное исследование сепарационных характеристик гидроциклона при различных режимах загрузки твердой фазы // ТОХТ. – 2006. – Т. 40, № 2. – С. 216-221.
7. Моркун В.С. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов и адаптивное управление процессами измельчения-классификации руд на его базе: Дис. ... д-ра техн. наук. – Кривой Рог, 1999.
8. Надеждин О.В. Матричная идентификация нелинейного нестационарного объекта управления // Междун. школа-семинар БИКАМП-03: Сб. тр. – СПб.: СПбГУАП, 2003. – С. 68-71.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.

Радионов Владислав Михайлович – Криворожский национальный университет; e-mail: vm159@qip.ru; 50065, ул. Буденного, 1-29, г. Кривой Рог, Украина; тел.: +380679809340; кафедра компьютерных систем и сетей; аспирант.

Radionov Vladislav Mikhajlovich – Krivoy Rog National University; e-mail: vm159@qip.ru; 1-29, Budennogo Krivoy Rog street, 50065, Ukraine; phone: +380679809340; the department of computer systems and networks; postgraduate student.

УДК 534.231:621.3.092

С.В. Соломичева, В.П. Тарасюк

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В БАРАБАНЕ КОТЛА

При анализе типов и характеристик ультразвуковых преобразователей, с учетом рабочей температуры и других особенностей барабана котла, был выбран цилиндрический раздельно-совмещенный пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) из термоустойчивого пьезоматериала – ниобата лития (допустимая температура эксплуатации 1160 °С). Предложена модель акустического поля излучателя в ближней и дальней зонах вдоль оси излучения а также ее расхождения, что дает возможность оценить значения давления, интенсивности и смещения частиц звукового поля в любой точке излучения. Исследованы