

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

В.И. Мельников*, М.А. Камнев*, G. Gerbeth, S. Eckert****

**Нижегородский государственный технический университет, г. Н.Новгород*

***Научно-исследовательский центр Розендорф, г. Дрезден*



Разработаны новые волноводные ультразвуковые датчики для контроля и диагностики жидкометаллического теплоносителя, использующие волноводы продольных и сдвиговых волн. Подтверждена возможность применения этих датчиков для контроля процессов в расплаве натрия и эвтектике свинец–висмут. Разработана и проверена на практике технология подготовки поверхности волновода, с целью обеспечения акустического контакта в жидкометаллической среде. Выполнены измерения профиля скорости эвтектики свинец–висмут и натрия в трубопроводах в различных температурных диапазонах.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие и безопасная эксплуатация ядерных энергетических установок с жидкометаллическим теплоносителем неразрывно сочетается с разработкой и использованием совершенных систем контроля и средств их диагностики. Важным компонентом таких систем являются приборы контроля состояния теплоносителя, от быстродействия и надежности которых во многом зависит правильный выбор технологического регламента и обоснованность действия персонала, особенно в нештатных ситуациях. Изучение поведения теплоносителя необходимо и при отработке перспективных конструкций и элементов будущих ядерных энергетических установок. Применение ультразвуковых приборов и устройств для диагностики процессов в жидкометаллическом теплоносителе является технически обоснованным. Проведенные ранее исследования различных авторов подтверждают перспективность работ в этом направлении [1].

В настоящее время выполнены успешные эксперименты с использованием акустической техники, направленные на решение следующих задач:

- обнаружение вскипания натриевого теплоносителя;
- регистрация течи в теплообменниках натрий–вода;
- обнаружение посторонних предметов в теплоносителе над активной зоной реактора;
- измерение уровня и расхода жидкометаллического теплоносителя в трубопроводах [1–6].

Однако практическое применение акустических систем при эксплуатации ядерных энергетических установок для контроля процессов в жидкометаллическом теплоносителе фактически отсутствует. Основными причинами, препятствующими их использованию в ядерной энергетике, являются

- недостаточная стойкость погружных датчиков, подвергающихся воздействию высокой температуры и радиации (при этом их стоимость весьма значительна);
- проблема акустического контакта приемной поверхности датчика с расплавом;
- низкий уровень используемой электроники для детектирования и генерации акустических сигналов.

В настоящей работе приводятся результаты исследований, направленные на совершенствование и разработку новых акустических датчиков для диагностики жидкометаллических теплоносителей.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Традиционные конструкции высокотемпературных акустических датчиков основаны на использовании теплостойких пьезоэлектрических материалов, сохраняющих пьезоактивность вплоть до температуры порядка 1000°C. Из них наиболее распространены ниобат лития LiNbO_3 (точка Кюри 1210°C), фосфат галлия GaPO_4 (точка Кюри 900°C).

На практике использование данных пьезоэлектрических материалов при высоких температурах затруднено по целому ряду причин. Наиболее существенные из них следующие.

1. Для обеспечения акустического контакта пьезоэлектрического кристалла с корпусом датчика необходимо применение связующей прокладки. В виду того, что использование разного рода смазок практически исключается из-за разрушения их при высокой температуре, применяют инертный мягкий металл, например, золотую фольгу, что, однако, не гарантирует устойчивую работу датчика при термокачках. Корпус датчика должен быть изготовлен из материала, мало подверженного деформации в широком диапазоне температур.

2. Для вывода электрических сигналов от датчика используется металлический кабель с изолятором на основе окиси алюминия, обладающий высокой погонной емкостью и гигроскопичностью, существенно снижающий амплитуду полезного сигнала.

3. Ниобат лития при высокой температуре становится весьма чувствительным к составу окружающей газовой атмосферы, в частности, к кислороду.

4. С ростом температуры значительно уменьшаются константы пьезоактивности этих материалов (в десять раз и более) при изначально существенно меньших пьезомодулях по сравнению, например, с пьезокерамикой типа цирконат титанат свинца.

В связи с этим целесообразно вынести электромеханические преобразователи за пределы высокотемпературной зоны, а их акустическую связь с жидкометаллическим теплоносителем осуществлять при помощи волноводов (звукопроводов). При этом становится возможным использовать высококачественную пьезокерамику для генерации и приема ультразвуковых волн и применять хорошо отработанные технологии ее монтажа и согласования с электрической линией связи. Вместе с тем, без учета физических и конструктивных особенностей волноводных линий связи, эффективная передача ультразвуковых колебаний по волноводам практически исключается. Это подтверждается неуспешным опытом применения волноводных датчиков в исследованиях по изучению возможности регистрации кипения натрия в реакторе БОР-60 по акустическому шуму [4], что, по нашему мнению, не в последнюю очередь связано с неправильным выбором геометрии волновода.

В настоящее время в литературных источниках представлен ряд удачных конструкций волноводных датчиков, использующих волноводы продольных и сдвиговых волн, но задачу развития техники и технологии использования таких датчиков для диагностики жидкометаллического теплоносителя нельзя считать полностью решенной. В данной работе мы рассматриваем вопросы разработки и применения волноводных датчиков продольных и сдвиговых волн.

ДАТЧИКИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ВОЛНОВОДЫ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН

Основными параметрами, определяющими качество передачи ультразвуковых колебаний по волноводу, является правильный выбор его геометрии и частоты ультразвуковых колебаний. Для бездисперсионной передачи продольных волн нулевого порядка по цилиндрическому волноводу необходимо выполнение условия:

$$\frac{(d \cdot f)}{c} < 0,1, \quad (1)$$

где d – диаметр волновода; f – верхняя граница частоты передаваемых колебаний; c – скорость продольных волн в волноводе на нулевой частоте.

Игнорирование выполнения представленного соотношения приводит к возникновению в волноводе волн более высокого порядка, распространяющихся с различными скоростями и уносящих большую часть энергии. В результате происходит ослабление полезного сигнала, появление множества паразитных волн, причем с ростом длины волновода эти процессы многократно усиливаются.

Например, согласно соотношению (1), предельная частота сигналов, передаваемых по стальному волноводу диаметром 0,8 мм, составляет не более 600 кГц, а при диаметре волновода 8 мм – всего 60 кГц. Поскольку диаметр такого волновода много меньше длины ультразвуковой волны в теплоносителе, при передаче сигналов возникает проблема ввода акустического сигнала в теплоноситель, для решения которой следует использовать специальные конструктивные элементы. Разработка и особенно использование последних в жидком металле весьма затруднена.

Возможным выходом из этой ситуации является использование комбинированного волновода, составленного из тонких стержней, собранных в пучок и обеспечивающего поршневой характер излучения. На практике изготовление наборного волновода из тонких проволок встречает серьезные технологические затруднения, особенно возрастающие при необходимости изготовления высокочастотных датчиков с рабочей частотой до 4–5 МГц, поскольку при этом необходимо использовать волноводы диаметром около 0,1 мм.

Для решения задачи передачи ультразвуковых колебаний в широком диапазоне частот нами предложено использовать волноводы, сформированные из тонкой фольги, свернутой в виде трубки. При этом сравнительно легко можно выполнить условие (1), где в первом приближении диаметр волновода d следует заменить на толщину фольги h . В этом случае технология сборки датчика существенно упрощается, а надежность работы увеличивается.

Конструкция одного из вариантов волноводного датчика с волноводом, свитым из фольги, представлена на рис. 1. Волновод изготовлен из стальной нержавеющей

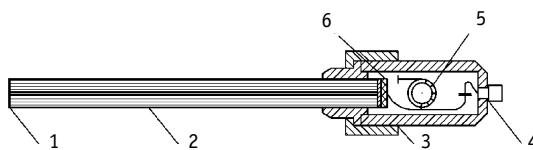


Рис.1. Конструкция датчика с витым волноводом: 1 – узел герметизации; 2 – волновод; 3 – корпус; 4 – разъем; 5 – трансформатор; 6 – пьезоэлемент

фольги 0X18H10T толщиной 0,1 мм, которая свернута соосно вокруг капиллярной трубки. К одному из кончиков волновода присоединен пьезоэлемент в виде диска диаметром 7,5 мм, толщиной 0,4 мм, изготовленный из керамики ЦТС-19. Рабочий кончик волновода загерметизирован диском из фольги. Наружный диаметр волновода 7,5 мм, длина варьируется от 100 до 1000 мм и более. Максимальная рабочая частота такого датчика достигает 4 МГц, при ширине полосы пропускания около 1 МГц. Затухание сигнала, обусловленное потерями при преобразовании электрического сигнала в акустический и обратно и двойном пробеге акустического сигнала в волноводе длиной 1000 мм при температуре 20°C, составляет примерно 36 дБ. При этом затухание сигнала собственно в материале волновода на частоте 4 МГц всего 14 дБ. Согласование пьезопреобразователя с линией связи и подавление возможных помех обеспечивает трансформатор с дифференциальной вторичной обмоткой.

Затухание сигнала в волноводе описывается известной формулой:

$$A = A_0 \cdot \exp[-\alpha(t) \cdot l], \quad (2)$$

где l – длина волновода; $\alpha(t)$ – постоянная затухания; A_0 , A – амплитуда сигнала на входе в волновод и на его выходе соответственно.

Постоянная затухания зависит от материала волновода, его температуры и частоты. Для определения ослабления сигнала, возникающего при нагреве волновода, была экспериментально определена зависимость постоянной затухания нормальных продольных волн нулевого порядка от температуры (рис. 2). Согласно полученным результатам использование стали типа 0X18H10T при температуре свыше 800°C нецелесообразно ввиду значительного увеличения потерь ультразвука. Вид зависимости

постоянной затухания от частоты – линейный.

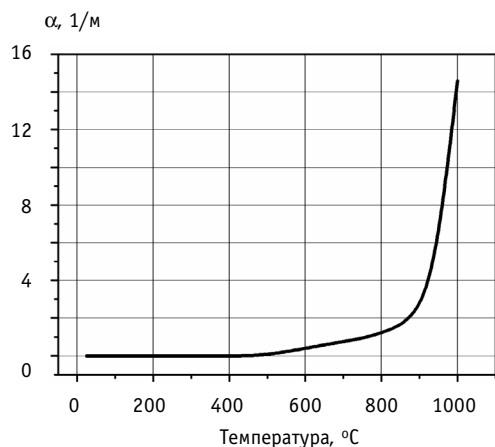


Рис. 2. Зависимость постоянной затухания ультразвука в стали 0X18H10T от температуры на частоте 500 кГц

Другой серьезной проблемой, требующей решения, является задача обеспечения акустического контакта волновода с контролируемой средой. Она должна решаться индивидуально в зависимости от сочетания материала волновода и вида жидкометаллического теплоносителя. Нами были разработаны технологические приемы, позволившие обеспечить в широком диапазоне температур надежный контакт волновода с жидким натрием, свинцом, оловом, эвтектическими сплавами свинец–висмут, медь–цинк и другими расплавами. Рассмотрение этих приемов в данной статье мы опускаем.

ДАТЧИКИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ВОЛНОВОДЫ СДВИГОВЫХ ВОЛН

При разработке датчика с волноводом сдвиговых волн необходимо решить ряд проблем. Основные из них это – правильный выбор геометрических размеров волновода и частоты для сведения к минимуму дисперсии сигналов при транспортировке акустических импульсов, выбор и оптимизация электромеханического преобразователя сдвиговых волн, поиск технических приемов эффективной передачи сигналов из волновода в расплав. В таких датчиках обычно используется волновод прямоугольного сечения.

Для бездисперсионной передачи нормальных сдвиговых волн нулевого порядка необходимо выполнение условия:

$$\frac{hf}{c} \geq 1, \quad (3)$$

где h – толщина волновода, f и c – соответствуют обозначениям из формулы (1).

Отсюда следует, что при толщине волновода 2 мм частота передаваемых сигналов должна быть выше 2,5 МГц.

Генерацию сдвиговых волн в волноводе можно осуществлять при помощи пьезопреобразователей со специально поляризованной структурой. Однако такие преобразователи достаточно редки и дороги. Значительно проще осуществить генерацию сдвиговой волны путем расщепления продольной волны при ее падении на скошенную поверхность (рис. 3). В соответствии с законом синусов сдвиговая волна, имеющая скорость распространения в стали около 3000 м/с, будет отражаться от поверхности под углом меньшим, чем продольная волна, скорость которой 6200 м/с. Если выбрать угол скоса волновода около 61° , то вектор распространения сдвиговой волны будет направлен по оси волновода и она будет свободно распространяться по нему. Продольная волна, падая под косым углом на поверхность волновода и многократно переотражаясь, трансформируется в волны высоких порядков, рассеивается и диссипирует.

Сдвиговые волны не излучаются в жидкость, поэтому их необходимо трансформировать в продольные или поверхностные волны. Во втором случае энергия акустических сигналов, передаваемых в расплав, может быть существенно увеличена. Разумеется, сказанное справедливо и при работе датчика в режиме приема.

Конструкция датчика с волноводом сдвиговых волн представлена на рис. 3. Волновод изготовлен из стали 0Х18Н10Т в виде полосы сечением 3×4 мм длиной 200 мм и установлен в корпус. Используется пьезоэлемент из керамики ЦТС-19 4×2 мм, толщиной 0,4 мм. Нижняя часть волновода выполнена скошенной для трансформации сдвиговой волны в поверхностную. При этом диаграмма направленности лепестка излучения оказывается наклоненной под углом около 33° в воде при нормальных условиях. Внизу волновод загерметизирован диском из фольги. Рабочая частота датчика 6 МГц, при ширине полосы пропускания около 1 МГц. Затухание сигнала, обусловленное потерями при преобразовании электрического сигнала в акустический и обратно и двойном пробеге акустического сигнала в волноводе при температуре 20°C , составляет примерно 40 дБ. Для согласования пьезопреобразователя с линией связи используется трансформатор с дифференциальной вторичной обмоткой.

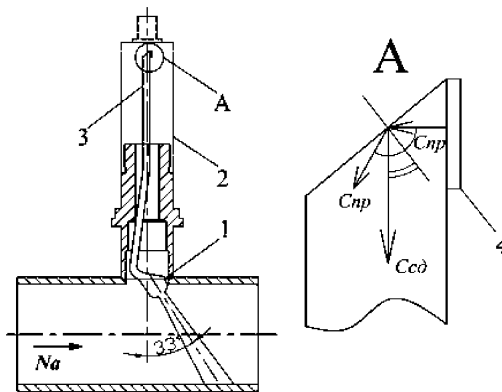


Рис.3. Конструкция датчика с волноводом сдвиговых волн: 1 – поверхность излучения; 2 – корпус датчика; 3 – волновод; 4 – пьезопреобразователь

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛНОВОДНЫХ ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Ультразвуковые волноводные датчики были использованы нами в системах измерения скорости движения жидкого натрия и сплава свинец–висмут по трубопроводам, а также в ряде локальных экспериментов по отработке контрольного оборудования. Опыты по измерению скорости натриевого теплоносителя в трубопроводе проводились на стенде НАТАН в исследовательском центре Розендорф (Германия) [7].

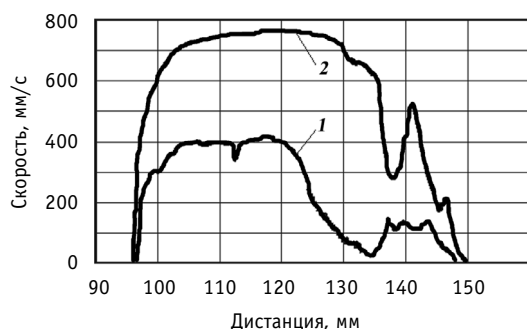


Рис. 4. Профиль скорости натрия в экспериментальном канале: 1 – скорость натрия 430 мм/с; 2 – скорость натрия 640 мм/с

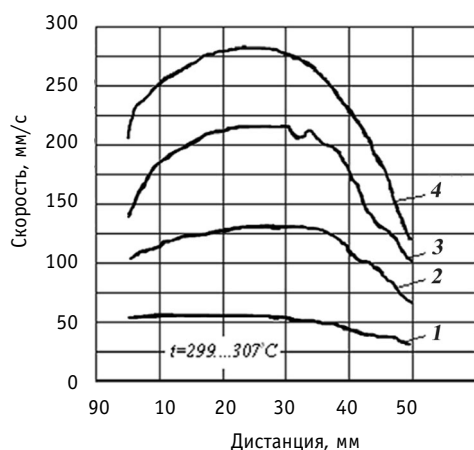


Рис. 5. Профиль скорости эвтектики свинец-висмут в экспериментальном канале. Расход теплоносителя: 1 – 25% от максимального; 2 – 50% от максимального; 3 – 75% от максимального; 4 – максимальный

измеренный профиль скорости при различных расходах сплава для этого случая показан на рис. 5.

Для отработки технологии движения газовой фазы в жидкометаллическом теплоносителе были выполнены измерения профиля скорости перемещения расплава, вызванного движением цепочки всплывающих пузырьков в емкости со сплавом Рl–Вi [9].

Опыты проводились с использованием емкости диаметром 125 мм и высотой 250 мм, который содержал около 2,5 л сплава (рис. 6). Нагрев осуществлялся при помощи электронагревателя и контролировался термодарами. Диапазон рабочих температур 180–300°C. Последовательность пузырьков формировалась впрыскиванием азота через капилляр с внутренним диаметром 0,5 мм. Кончик датчика погружался в сплав сверху и находился на дистанции 150 мм по вертикали и 30 мм по горизонтали от точки впрыска газа. Угол наклона датчика от вертикали 20°. Расход газа составил 3 см³/с. Типичный профиль скорости, определенный при помощи этой системы, показан на рис. 7. По нему можно наблюдать движение как жидкой фазы теплоносителя, так и газовых включений.

Измерения проводились в температурном диапазоне 150–300°C. Датчики с волноводом длиной 200 мм устанавливались в трубе прямоугольного сечения 44×44 мм под углом к оси трубы 20°. Рабочая частота ультразвука 4 МГц. Профиль скорости натрия определялся при помощи импульсной доплеровской системы, которая позволяла измерять скорость рассеивателей в потоке на различном удалении от датчика.

Некоторые экспериментальные результаты по измерению профиля скорости потока натрия при помощи датчика с витым волноводом продольных волн представлены на рис. 4.

Аналогичные профили скорости натриевого теплоносителя были получены нами при помощи датчиков с волноводами сдвиговых волн (рис. 3).

Витые волноводные датчики были использованы также для измерения профиля скорости потока эвтектики свинец-висмут. В частности, в петле «Тезис» в исследовательском центре Карлсруэ (Германия) датчики устойчиво работали в течение 72 ч, обеспечивая измерение профиля скорости движения сплава в температурном диапазоне 180–350°C [8]. Датчики устанавливались в цилиндрической трубе диаметром 60 мм под углом 45°. Характерный

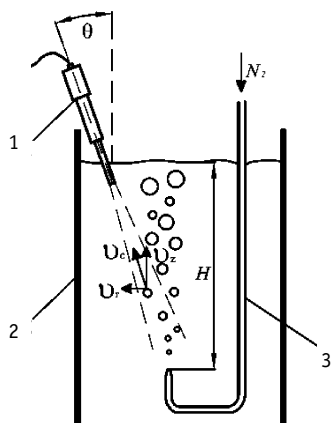


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для исследования движения всплывающих пузырьков: 1 — датчик; 2 — экспериментальная емкость; 3 — капилляр

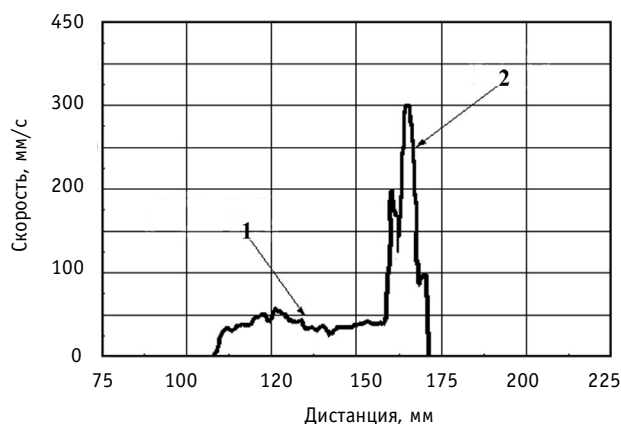


Рис. 7. Профиль скорости движения теплоносителя (1) и пузырьков газа (2)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны новые волноводные ультразвуковые датчики для контроля и диагностики жидкометаллического теплоносителя, использующие волноводы продольных и сдвиговых волн. Подтверждена возможность применения этих датчиков для контроля процессов в расплаве натрия и эвтектике свинец–висмут. Разработана и проверена на практике технология подготовки поверхности волновода, с целью обеспечения акустического контакта в жидкометаллической среде. Выполнены измерения профиля скорости эвтектики свинец–висмут и натрия в трубопроводах в различных температурных диапазонах.

Литература

1. Баранов В.М. Ультразвуковые измерения в атомной технике. — М.: Атомиздат, 1975. — 264 с.
2. Афанасьев В.А., Александров К.А., Кебадзе Б.В., и др. Эксперименты по вскипанию натрия в реакторе БОР-60//Атомная энергия. — 1978. — Т. 45. — № 5. — С. 338-342.
3. Югай В.С., Масагутов Р.Ф., Козлов Ф.А. Исследование акустических эффектов при течи воды в натрия//Атомная энергия. — 1983. — Т. 54. — № 3. — С. 170-173.
4. An ultrasonic waveguide for nuclear power plants / Watkins R.D., Gillespie A.B., Deighton M.O., Pike R.B.//Nuclear Power Plant Contz. and Instum. 1982. Vienna, 1983. — P. 593-604.
5. Boehmer L.S. Smith R.W. Ultrasonic instrument for continuous measurement of sodium levels in fast breeder reactors//IEEE Trans. Nucl. Sci. — 1976. — Т. 23. — P. 359-362.
6. Tageda Y. Development of an ultrasound velocity profile monitor//Nucl. Eng. Design. — 1991. — Т. 126. — P. 277-284.
7. Local and integral ultrasonic gauges for two-phase flow instrumentation in nuclear reactor and safety technology/Melnikov V.I. et al. Report FZR-303, ISSN 1437-322X, Forschungszentrum Rossendorf, Germany, November 2000. — 81 p.
8. Eckert S., Gunter G., Melnikov V.I., Lefhalm C.H., Knebel J. Application of ultrasound Doppler velocimetry to flows of hot metallic melts//Third International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering EPFL (Lausanne, Switzerland, 2002, September 9-11).
9. Eckert S., Gunter G., Melnikov V.I. Velocity measurements at high temperatures by ultrasound Doppler velocimetry using an acoustic wave-guide//Experiments in Fluids. — 2003. — V. 35. — P. 381-388.

Поступила в редакцию 25.01.2005

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039:32:338

Nuclear Technology – Guarantee of the Stable Development Russia in the 21 Century \V.M. Murogov, N.N. Ponomarev-Stepnoy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 6 pages, 1 table.

The gives brief analysis of the current and future role of the nuclear technology (first off all – nuclear energy) in the world and in Russia, specifically Russia, we could say, has to develop the nuclear technology (and nuclear energy, as the key for this development). The nuclear energy is not the only and not so much the part of energy market: it is the key element of the defence power of the russsian nuclear «triada» and moreover, nuclear science and technology predetermine the social-political and technical-economic development of our country in the 21 century.

УДК 681.51:621.039

Development and Research of the Ultrasound Wave-Guide Sensors for Control Liquid Metal Coolant \V.I. Melnikov, M.A. Kamnev, S. Eckert, G. Gerbeth; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 7 pages, 7 illustrations. – References, 9 titles.

New ultrasound wave-guide sensors employing longitudinal and shear wave-guide's for control and diagnostics liquid metal coolant have been developed. The sensor's application possibility for liquid sodium and lead-bismuth eutectic control has been confirmed. A technology of the wave-guide surface preparation aimed to achieve acoustic contact in the liquid metal medium have been developed and tested. Velocities profile various temperatures tests have been carried out in lead-bismuth eutectic and sodium.

УДК 681.51:621.311.25

Automatic Weld Flaw Detection Based on the Ultrasonic Testing of NPPs' Pipelines \A.O. Skomorokhov, P.A. Belousov, A.V. Nakhobov, A.S. Mokrousov, I.F. Schedrin, T.F. Kozak; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). Obninsk, 2005. – 10 pages, 7 illustrations, References – 7 titles.

The paper describes development of algorithms and software of «UZK-Analyst» – a system for automatic weld flaw detection in pipelines of RBMK-type nuclear power plants. The paper covers ultrasonic signals smoothing, dependence of detection levels and statistical characteristics of noise, calculation of flaw coordinates and false alarm minimization. The paper also contains a short description of a system software implementation.

УДК 621.039.586

Checking of Continuity of Boron Solution Delivery into Core during Rupture of the First Circuit with Equivalent Diameter 50 – 100 mm \A.N. Shkarovskiy, V.I. Aksenov, N.P. Serdun'; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 6 pages. – References, 7 titles.

Calculating research of accidents with rupture of the first circuit with equivalent diameter 50 – 100 mm and loss of coolant in reactor operation on power rating with the purpose to check the continuity of boron solution delivery into core is developed. The work is carried out with successive including of three steps of emergency cooling of core: boron injection with high pressure, vbhidrostorage reservoirs, boron injection with low pressure. It is shown, there are intersection in time of end of work of the step with more high pressure and begin of work of the step with more low pressure in all researching conditions. It is ensured reactor cooldown and its transfer in subcritical condition.