

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СВАРКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОГЛОЩАЮЩИХ ВСТАВОК КОНТЕЙНЕРОВ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

В. А. БОГДАНОВСКИЙ, В. М. ГАВВА, Н. М. МАХЛИН, А. Д. ЧЕРЕДНИК, А. В. ТКАЧЕНКО, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. Б. КУДРЯШЕВ, А. П. КУЛИКОВ, А. В. КОВАЛЮК, инженеры
(ОП «Атомэнергомаш» ГП НАЭК «Энергоатом», г. Киев)

Рассмотрено применение автоматической орбитальной сварки ТИГ для получения герметичных стыкозамковых соединений поглощающих элементов, являющихся основой поглощающих вставок контейнеров хранения отработанного ядерного топлива. Приведены результаты обработки технологии сварки ТИГ и области оптимальных режимов при выполнении этих соединений, описана промышленная установка для сварки замковых соединений поглощающих элементов и результаты ее опробования.

Ключевые слова: автоматическая орбитальная сварка, поглощающие вставки, атомные электростанции, стыкозамковые соединения, технологический стенд, ядерная безопасность

В соответствии с требованиями ядерной безопасности водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) энергоблоков атомных электростанций (АЭС) для поддержания требуемого уровня подкритичности топливные тепловыделяющие сборки (ТВС) комплектуют поглощающими стержнями системы управления и защиты (ПС СУЗ). Такой же принцип обеспечения ядерной безопасности применяют и в отношении хранения отработанного ядерного топлива, согласно чему значение коэффициента размножения нейтронов не должно превышать 0,95 в условиях нормальной эксплуатации и при проектных авариях [1–3].

Одним из способов обеспечения ядерной безопасности грузов вентилируемых контейнеров хранения сухого хранилища отработанного ядерного топлива (ВКХ СХОЯТ) является комплектация отработанных ТВС поглощающими вставками (ПВ), используемыми наряду с отработанными ПС СУЗ и компенсирующими дефицит последних.

Применяемая в ВКХ СХОЯТ Запорожской АЭС ПВ разработки Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» (НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ) представляет собой траверсу и 18 поглощающих элементов (ПЭЛов). Траверса ПВ служит для обеспечения одновременной транспортировки ПЭЛов и их дистанционирования при проведении

транспортно-технологических операций. ПЭЛы предназначены для размещения поглощающего материала в направляющих каналах отработанных ТВС. По конструкции, форме, габаритным и установочным размерам ПЭЛы являются аналогом ПС СУЗ.

ПЭЛ состоит из оболочки (рис. 1), наполненной виброуплотненным порошком карбида бора, утяжелителя, наконечника, конуса (заглушки) и пробки. Для изготовления оболочки используется труба диаметром 8,2 мм с толщиной стенки 0,6 мм из хромоникелевой стали аустенитного класса 08X18H10T или 12X18H10T, наконечника и конуса (пруток из такой же стали).

Согласно разработанной и применяемой в НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ технологии изготовления ПВ, герметизирующие стыкозамковые соединения оболочки ПЭЛа с его наконечником и конусом выполняют способом дуговой сварки поворотных стыков неплавящимся электродом в инертных газах, при котором свариваемое изделие подвергается вращению вокруг своей оси со сварочной скоростью, а горелка с неплавящимся электродом находится в фиксированном пространственном

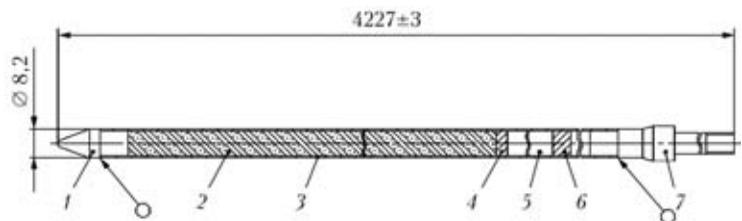


Рис. 1. Схема ПЭЛа: 1 — конус (заглушка); 2 — наполнитель (порошок карбида бора); 3 — оболочка; 4, 6 — пробки; 5 — утяжелитель; 7 — наконечник



положении. Сварка оболочки с конусом производится в аргоне, а оболочки с наконечником — в контролируемой среде (гелии) [4]. Для процесса сварки используют специализированные установки АСТЭ-7 и СА-281 разработки НИКИМТ (г. Москва) [5]. Такая технология обеспечивает требуемое качество сварных соединений ПЭЛов, что подтверждается опытом изготовления ПВ и их эксплуатации в ВКХ СХОЯТ Запорожской АЭС. Вместе с тем увеличение объемов изготовления ПЭЛов, обусловленное наметившимся ростом потребности в ПВ, в определенной степени сдерживается особенностями находящихся в длительной эксплуатации установок для сварки поворотных стыков, их функциональными возможностями и уровнем конечной производительности, сложностями модернизации этого оборудования или его замены новым. Отмеченные особенности применяемого оборудования затрудняют и модернизацию некоторых составляющих технологического цикла изготовления ПЭЛов.

Одним из возможных путей совершенствования существующей технологии изготовления ПВ является разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона совместно с ОП «Атомэнергомаш» ГП НАЭК «Энергоатом» технология герметизации стыкозамковых соединений ПЭЛов способом автоматической орбитальной сварки неповоротных стыков неплавящимся электродом в инертных газах (сварка GTAW) и технологическое оборудование для осуществления этого процесса.

Отработку технологии сварки GTAW оболочки ПЭЛа с его наконечником и конусом выполняли с использованием разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона и промышленно изготавливаемого автомата АДЦ 627 УЗ.1 для орбитальной сварки неповоротных стыков трубопроводов.

Автомат АДЦ 627 УЗ.1 обеспечивает выполнение двух видов работы («Наладка» и «Сварка»), двух видов управления («Ручное» или «Автоматическое») и реализацию заданных циклов сварки в ее непрерывном режиме, режиме шагоимпульсной сварки или сварки модулированным током. В состав автомата входят многофункциональный источник питания чопперного типа ИЦ 616 УЗ.1 для сварки неплавящимся электродом в инертных газах, блок контроллера (система управления) ИЦ 616.20.00.000, выносной пульт управления (пульт оператора) ИЦ 616.30.00.000, головка сварочная АДЦ 627.03.00.000 и коллектор АДЦ 625.07.00.000.

При отработке технологии сварки стыкозамковых соединений ПЭЛов исходили из результатов и рекомендаций ранее проведенных исследований [6, 7], в которых установлены следующие особенности сварки GTAW тонкостенных изделий без присадочной проволоки:

основными факторами, влияющими на качество сварных соединений, являются характер изменения в процессе сварки погонной энергии и тепловложения, форма заточки и состояние рабочей части вольфрамового электрода, состояние поверхности основного металла;

определяющими параметрами сварки GTAW без присадочной проволоки являются сварочный ток, напряжение дуги, скорость сварки и расход инертного газа, соотношения значений которых должны соответствовать определенной расчетно-экспериментальным путем области режимов сварки, обеспечивающей высокое качество сварного шва [8];

нахлесточные типы сварных соединений (к которым относятся и стыко-замковые соединения ПЭЛов) (по сравнению со стыковыми) менее чувствительны к нестабильности параметров режима сварки, но при их выполнении необходимо некоторое смещение (до 0,5 мм) электрода от линии стыка и его наклон под углом 15° в сторону большего теплоотода [7] (рис. 2).

Для определения областей оптимальных режимов однопроходной сварки GTAW стыкозамковых соединений оболочки ПЭЛа с его конусом и наконечником проводили опытные сварки на образцах (макетах) ПЭЛов. При подготовке образцов под сварку выполняли подрезку торцов макетов оболочек (отрезков трубы диаметром 8,2 мм из стали 08X18H10T) и обезжиривание как этих макетов, так и конусов и наконечников. Сборку соединений под сварку производили по схеме, приведенной на рис. 2, обеспечивая при этом плотную посадку (d10) конуса или наконечника с оболочкой.

Сварку оболочки с конусом выполняли в аргоне с варьированием следующих параметров ее режима: сварочный ток — 25; 28; 30; 32; 35А, напряжение на дуге — 9...11 В при ее длине от

Техническая характеристика автомата АДЦ 627.УЗ.1

| | |
|---|------------------|
| Диапазон диаметров свариваемых труб, мм | 8...24 |
| Наименьшее межтрубное расстояние, мм | 60 |
| Пределы регулирования значений сварочного тока, А: | |
| нижнее, не более | 8 |
| верхнее, не менее | 260 |
| Пределы регулирования напряжения на дуге, В | 8...24 |
| Наибольшее отклонение сварочного тока от заданного значения при колебаниях напряжения питающей сети не более номинального значения и изменениях длины не более ±2,0 мм от заданного значения, % | ±2 |
| Точность поддержания заданного значения напряжения дуги, В, не хуже | ±0,20 |
| Пределы регулирования скорости вращения планшайбы головки сварочной, об/мин | 0,3...12,0 |
| Номинальный диаметр вольфрамового электрода (марок ВЛ, ВИ или ВТ), мм | 1,6 |
| Номинальное радиальное перемещение горелки, мм | 15 |
| Наибольшее перемещение горелки поперек стыка, мм | ±1 |
| Количество проходов дуги | 1...4 |

0,5 до 1,5 мм, скорость сварки — от 11,5 до 13,5 м/ч (от 7,64 до 8,97 об/мин), длительность плавного нарастания сварочного тока — от 0,5 до 1,5 с, длительность «прогрева» (интервала времени между моментами окончания плавного нарастания сварочного тока и начала вращения дуги) — от 1,0 до 1,5 с, длительность плавного спада сварочного тока в завершающей стадии процесса сварки (заварки кратера) — от 1,0 до 2,5 с, расход инертного газа — от 5 до 8 л/мин.

Сварку оболочки с наконечником осуществляли в гелии с учетом характеристик дуги, обусловленных его тепло- и электрофизическими свойствами. При этом сварочный ток составлял 16; 18; 20; 22; 25 А, напряжение на дуге — 18,0...21,5 В при длине дуги от 0,5 до 1,5 мм, длительность плавного спада сварочного тока (заварки кратера) — от 1,0 до 3,5 с, значения других параметров режима сварки варьировались в пределах, принятых для опытных сварок в аргоне оболочки ПЭЛа с конусом.

Качество полученных при опытных сварках соединений оценивали путем визуально-измерительного контроля, металлографических исследований, испытаний на стойкость против межкристаллитной коррозии (МКК) и контроля герметичности. Визуально-измерительный контроль выполняли в соответствии с требованиями действующей в отрасли нормативной документации [9] с помощью микрометра, а также лупы и бинокулярного микроскопа (например, МВС-9) при увеличении 8...10. Металлографические исследования производили на вырезанных из полученных сварных соединений макрошлифах с использованием металлографического микроскопа при увеличении 50...100, при этом определяли глубину провара, наличие дефектов в металле шва (неметаллических включений, пор, свищей и несплавлений), структуру металла шва и зоны термического влияния, размеры аустенитного зерна. Испытания на стойкость против МКК металла зоны сварного шва и ЗТВ проводили по методу АМУ ГОСТ 6032-89. Контроль герметичности осуществляли с помощью масс-спектрометра и гелиевого течеискателя ПТИ-10 методом вакуумной камеры в соответствии с требованиями и методикой, регламентируемой действующей нормативно-технической документацией [10].

Выполнение нескольких серий опытных сварок оболочки ПЭЛа с его конусом и наконечником, всесторонний контроль качества этих сварных соединений и анализ полученных результатов позволили установить, что для обеспечения стабильно высокого качества стыкозамковых соединений ПЭЛов основные параметры режимов сварки GTAW должны соответствовать значениям, указанным в таблице.

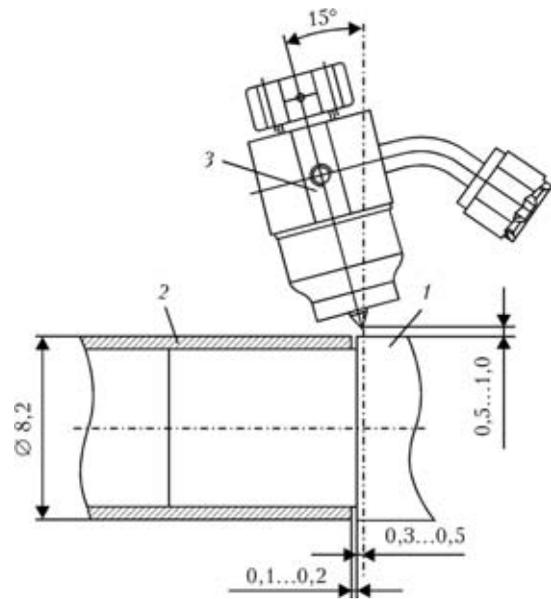


Рис. 2. Схема собранного под сварку стыкозамкового соединения ПЭЛа: 1 — конус (наконечник); 2 — оболочка; 3 — горелка с неплавящимся электродом

Результаты проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона экспериментальных и опытно-технологических работ по отработке технологии сварки GTAW герметизирующих стыкозамковых соединений ПЭЛов подтвердили целесообразность промышленного применения этой технологии при серийном производстве как ПВ для ВКХ СХОЯТ, так и (в перспективе) ПС СУЗ для ТВС реакторов типа ВВЭР.

Для обеспечения возможности осуществления сварки GTAW герметизирующих соединений ПЭЛов и аналогичных им изделий при их промышленном изготовлении в ОП «Атомэнергомаш» ГП НАЭК «Энергоатом» разработан и изготовлен специальный технологический стенд, схема которого приведена на рис. 3.

В состав стенда входят все составные части АДЦ 627 УЗ.1 для орбитальной сварки неповоротных стыков неплавящимся электродом в инертных газах, сварочная камера, агрегат вакуумный золотниковый, направляющий ложемент и газобаллонная стойка.

Камера (рис. 3) с жестко закрепленной внутри ее сварочной головкой обеспечивает:

повторяемость, а при необходимости и корректировку, фиксацию пространственного положения и центровку подготовленных под сварку стыкозамковых соединений ПЭЛов относительно неплавящегося электрода горелки, установленной на планшайбе сварочной головки;

свободный доступ к сварочной головке и ее корректорам пространственного положения горелки с неплавящимся электродом, что облегчает техническое обслуживание головки без извлечения из камеры;



Основные параметры режимов сварки GTAW соединений ПЭЛов

| Параметр | Оболочка-конус | Оболочка-наконечник |
|---|--|-----------------------|
| Марка вольфрамового электрода диаметром 1,6 мм | ЭВИ-1; ЭВИ-2; ЭВИ-3; ЭВТ-15; ЭВЛ-20 по ГОСТ 23949-80 или WT-20; WR-2; WR-2D фирмы «Abicor Binzel» | |
| Защитный газ | Аргон по ГОСТ 10157-79 | Гелий по ТУ 51-940-80 |
| Сварочный ток, А | 30,0±1,2 | 20,0±1,0 |
| Напряжение на дуге, В | 9...10 | 19...20 |
| Длина дуги, мм | 0,5...1,0 | |
| Скорость сварки (скорость вращения планшайбы головки сварочной), м/ч (об/мин) | 12,0±0,4 (7,98±0,27) | 13,0±0,45 (8,63±0,30) |
| Длительность плавного нарастания сварочного тока, с | 1,0±0,1 | |
| Длительность интервала времени прогрева, с | 0,75±0,05 | |
| Длительность плавного спада сварочного тока (заварки кратера), с | 2,0±0,1 | 3,0±0,1 |
| Расход защитного газа, л/мин | 5,9...7,1 | 4,9...6,1 |
| Длительность предварительной продувки зоны сварки защитным газом (интервал времени «газ до сварки»), с, не менее | 5...10 | |
| Длительность обдува зоны сварки защитным газом на завершающем этапе цикла сварки (интервал времени «газ после сварки»), с, не менее | 10...20 | |

электрическую изоляцию токогазоподвода сварочной горелки и цепей управления ее вращателя относительно корпуса камеры, свариваемого изделия и других нетоковедущих частей входящего в состав станда оборудования;

выполнение требований по герметичности при вакуумировании внутреннего объема камеры для последующего создания в нем контролируемой среды путем его заполнения гелием с поддержанием избыточного давления на уровне (1,96±0,2) кПа;

возможность наблюдения за ходом процесса сварки через смотровое окно. Внешний вид камеры приведен на рис. 4.

Агрегат (рис. 3) предназначен для осуществления вакуумирования внутреннего объема камеры с разрежением до уровня не менее 1,33 Па.

Ложемент является направляющей опорой для размещения в стенде свариваемого ПЭЛа, предохраняющей его оболочку от деформаций и механических повреждений при выполнении как подготовительно-заключительных операций, так и сварки герметизирующих соединений ПЭЛа.

Опробование в производственных условиях ОП «Атомэнергомаш» ГП НАЭК «Энергоатом» разработанной ИЭС им. Е. О. Патона технологии сварки GTAW герметизирующих соединений ПЭЛов показало, что при использовании станда (рис. 3) достигается не только стабильно высокое

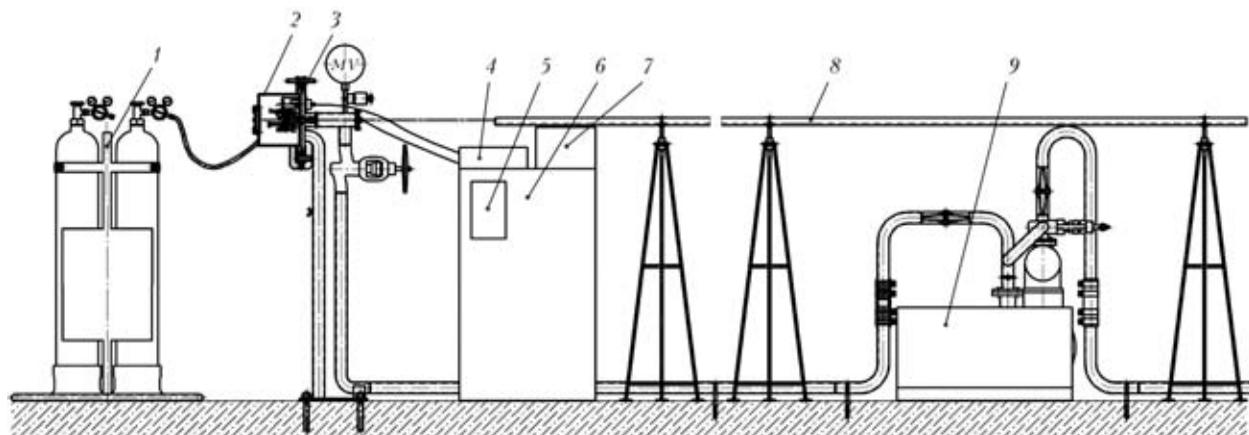


Рис. 3. Схема станда для сварки GTAW стыкозамковых соединений ПЭЛов: 1 — стойка газобаллонная; 2 — сварочная камера; 3 — головка сварочная АДЦ 627.03.00.000; 4 — коллектор АДЦ 625.07.00.000; 5 — пульт управления выносной ИЦ 616.30.00.000; 6 — источник питания ИЦ 616.УЗ.1; 7 — блок контроллера ИЦ 616.20.00.000; 8 — ложемент; 9 — агрегат вакуумный золотниковый

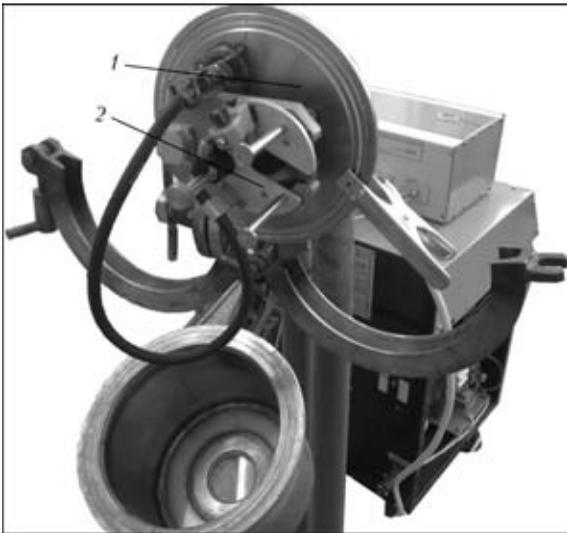


Рис. 4. Внешний вид камеры (1) и сварочной головки АДЦ 627.03.00.000 (2)

качество сварных соединений ПЭЛов, но и несколько снижаются трудоемкость и продолжительность предшествующих процессу сварки наладочных операций (по сравнению с существующей технологией сварки поворотных стыков), а также упрощается подготовка сварщиков и обслуживающего персонала. Результаты опробования послужили весомыми аргументами в пользу организации в ОП «Атомэнергомаш» специализированного участка по промышленному изготовлению ПЭЛов. Технологическое оснащение и производительность этого участка при использовании одного сварочного стенда позволяют производить до 1200 ПЭЛов в год. На оборудовании участка изготовлена опытная партия ПЭЛов, образцы которой подвергнуты комплексным испытаниям (в том числе методами разрушающего контроля) в НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ. В результате этих испытаний установлено полное соответствие качества выполненных по технологии сварки GTAW соединений ПЭЛов требованиям нормативной документации. Установлено также, что по глубине провара, структуре металла шва и ЗТВ, размерам аустенитного зерна и механической прочности стыкозамковые соединения ПЭЛов, сваренные по технологии сварки GTAW, идентичны таковым, выполняемым по существующей технологии сварки поворотных стыков.

Application of automatic orbital TIG welding is considered for production of tight butt-clutch joints on absorbing elements, which are the base of the absorbing inserts of the used nuclear fuel storage containers. Results of optimisation of the TIG welding technology and ranges of optimal parameters for making such joints are presented. The industrial unit designed for welding of the clutch joint on the absorbing elements and the results of its run-up operation are described.

Выводы

1. Разработанная технология сварки GTAW нахлесточных соединений разнотолщинных тел вращения малых диаметров с применением орбитальных автоматов типа АДЦ 627 УЗ.1 обеспечивает возможность выполнения высококачественных стыкозамковых соединений ПЭЛов и подобных им изделий.
2. Промышленное применение разработанной технологии сварки GTAW и средств технологического оснащения позволит изготавливать ПВ, ПС СУЗ и аналогичные им изделия в объемах, соответствующих потребностям атомной энергетики.

1. ПН АЭ Г-14-029-91. Правила безопасности при хранении и транспортировке ядерного топлива на объектах атомной энергетики / Госатомнадзор СССР. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 34 с.
2. НП 306.2.105-2004. Основні положення забезпечення безпеки проміжних сховищ сухого типу. — К.: Держатомрегулювання, 2004. — 36 с.
3. Технічний регламент щодо контейнерів для зберігання та захоронення радіоактивних відходів / Постанова КМ України № 939 від 18.07.2007. — К., 2007. — 14 с.
4. Исследования технологии изготовления и разработка программы освоения производства ПС СУЗ в Украине: Отчет НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ. — Харьков, 1999. — 197 с.
5. Сварочное оборудование: Каталог / Под ред. А. А. Куркумели. — М.: ЦНИИатоминформ, 1985. — 147 с.
6. Ищенко Ю. С. Физико-технологические основы формирования швов в процессе дуговой сварки // Сварка в атомной промышленности и энергетике: Тр. НИКИМТ. — М.: ИздАТ, 2002. — Т.2. — С. 204-240.
7. Букаров В. А. Технология дуговой автоматической сварки в защитных газах // Там же. — М.: ИздАТ, 2002. — Т.1. — С. 149-210.
8. Полосков С. И., Букаров В. А., Ищенко Ю. С. Влияние отклонений параметров режима аргонодуговой сварки неповоротных стыков труб на качество сварных соединений // Сварка и смежные технологии: Сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. — Москва, сент., 2000. — М.: МЭИ, 2000. — С. 22-25.
9. Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Визуальный и измерительный контроль ПН АЭ Г-7-016-89 / Госатомнадзор СССР. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 4 с.
10. Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Контроль герметичности. Газовые и жидкостные методы ПН АЭ Г-7-019-89 / Госатомнадзор СССР. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 34 с.

Поступила в редакцию 27.07.2011