

## АВТОМАТ ДЛЯ ДУГОВОЙ ПОДВОДНОЙ СВАРКИ МОКРЫМ СПОСОБОМ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ\*

В. А. ЛЕБЕДЕВ<sup>1</sup>, С. Ю. МАКСИМОВ<sup>1</sup>, В. Г. ПИЧАК<sup>1</sup>, Д. И. ЗАЙНУЛИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup> «Greenfield Energy Limited», Великобритания

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология и оборудование, позволяющие способом мокрой дуговой сварки порошковой проволокой в автоматическом режиме выполнять сварку конструктивных элементов, надежно изолирующих нижнюю часть колонны теплообменника. Уникальность работы состоит в создании сварочного автомата, способного работать погруженным в трубу внутренним диаметром 119 мм на глубину 200 м в среду жидкого теплоносителя. При разработке полуавтомата использовали специальные моментные электроприводы для механизмов подачи электродной проволоки и сварочного перемещения. Был разработан специальный кабель со сварочными кабелями и проводами управления, способными работать на большом расстоянии от источников питания дуги и системы управления. Разработана конструкция разматывателя кабеля с цифровой регистрацией положения автомата по длине трубы. Результаты апробации показали, что применение специального сварочного автомата позволяет повысить надежность теплообменника, сократить временные потери при выполнении работ по его герметизации, рационально использовать монтажную площадь, снизить финансовые затраты. Библиогр. 5, рис. 8.

*Ключевые слова:* дуговая мокрая сварка, геотермальные теплообменники, герметизация, автомат, источник питания, разматыватель кабеля, система управления

Способ механизированной дуговой сварки мокрым способом, оборудование и порошковая проволока для его реализации были предложены в ИЭС им. Е.О. Патона [1] и получают в настоящее время развитие в различных сферах. Это ремонт кораблей и судов, подводных продуктопроводов, портовых подводных сооружений и др. [2, 3].

Одним из новых объектов эффективного применения сварки мокрым способом являются комплексы компании «Greenfield Energy Limited» – разработчика технологии и оператора энергоэффективных комплексов «Geoscart™», объединяющих такие системы обеспечения производственных потребностей, как отопительные системы замкнутого цикла, системы подготовки расходной горячей воды для производственных нужд, холодильные установки и системы кондиционирования воздуха.

Система «Geoscart™» была разработана для управления тепловыми потоками общественных и коммерческих зданий и предприятий с непрерывным энергопотреблением высокой плотности, такими, как современные супермаркеты, предприятия гостиничного бизнеса повышенного класса, стационарные больничные комплексы, а также удовлетворения производственных потребностей предприятий пищевой и фармакологической промышленности. Одной из главных функциональных особенностей системы «Geoscart™» является

возможность сохранять излишки тепловой энергии до момента, когда возникает дефицит этой энергии. Компания использует геотермальные теплообменники специальной конструкции для быстрой и эффективной передачи излишков или дефицита низкопотенциальной тепловой энергии, используя высокую плотность и теплоемкость геологических формаций, расположенных значительно ниже поверхностных грунтов. Стандартными глубинами для основной транзакции теплообменного процесса являются диапазоны до 200 м ниже уровня поверхности земли.

При строительстве теплообменников, количество которых может достигать нескольких десятков в зависимости от размера объекта, используются принципы, схожие с методами, применяемыми при бурении нефтегазовых скважин, но с некоторыми отличиями в технологии строительства. В частности, для замкнутых теплообменников необходима гарантированная изоляция нижней части эксплуатационной колонны во избежание потерь дорогостоящей теплопроводящей рабочей жидкости, производящейся из композиции экологически чистых пропиленгликолей, выделенных из растительной массы. Для этих целей используются заглушки специальной конструкции, изготовленные из органической невулканизированной уплотненной резины. Однако опыт эксплуатации теплообменников показал, что вследствие естественного старения материала заглушки в процессе эксплуатации ее размеры изменяются и появляется утечка

\* В работе принимали участие В. К. Зяхор, И. С. Кузьмин, В. Г. Новгородский, Н. А. Поддубный, И. В. Лендел.



Рис. 1. Горловина трубы теплообменника и наружные условия выполнения работ

ка рабочей жидкости. Установка новой заглушки требует остановки работы комплекса. С учетом того, что теплообменники обычно располагаются на территории парковок автотранспорта вблизи обслуживаемого объекта, эта операция приводит к существенным финансовым потерям в дополнение к потерям эффективности работы при снижении уровня жидкости. В качестве альтернативы в ИЭС им. Е. О. Патона был предложен способ герметизации труб теплообменника путем установки и приварки доньшка.

Целью настоящей работы была разработка и внедрение специального сварочного автомата и технологии его применения для приварки заглушки-доньшка внутри трубы на глубинах до 200 м, что позволит уменьшить временные потери; сократить финансовые затраты; снизить потерю полезной площади; повысить надежность теплообменника.

Конструкция горловины трубы и условия выполнения работ показаны на рис. 1.

Условия и среда выполнения сварки определяют сложность решаемой задачи как по техническим, так и технологическим аспектам. В основу разработки был положен опыт ИЭС им. Е. О. Патона по созданию механизированного оборудования для сварки мокрым способом с применением специальных электродных порошковых проволок. Однако достаточно большие глубины сварки, крайне стесненные условия (внутренний диаметр трубы не превышает 120 мм), а также среда (25 %-й водный раствор пропиленгликоля), потребовали большого объема дополнительных исследований как по отдельным узлам сварочного оборудования, так и по технологии сварки и сварочным материалам, поскольку опыт конструирования оборудования и его применения в автоматическом цикле сварки для этих условий в ИЭС им. Е. О. Патона отсутствует, как и в мировой практике.

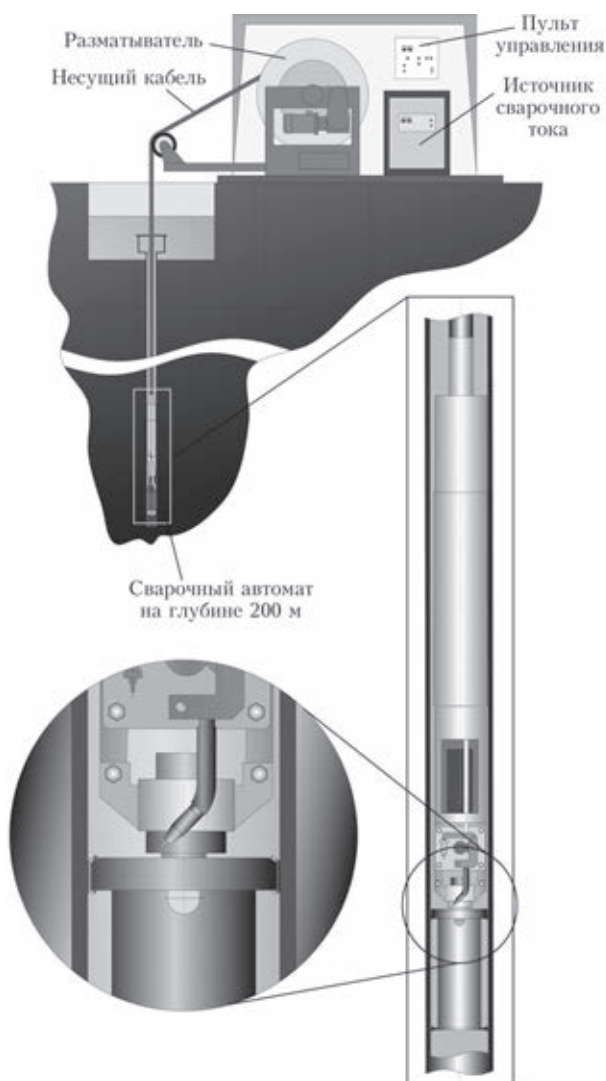


Рис. 2. Комплекс оборудования для автоматической сварки на большой глубине внутри трубы

Разработка собственно автомата для приварки доньшка на большой глубине – это только часть комплекса, в состав которого должен входить источник сварочного тока специальной разработки (удаленность места сварки с неизбежным падением сварочного напряжения в кабеле), специальный грузонесущий кабель с силовыми жилами и проводами управления, а также устройство для опускания и подъема сварочного автомата. Весь комплект оборудования и условия его применения приведены на рис. 2.

Алгоритм выполнения сварки предусматривает, что привариваемое доньшко специальной конструкции перед погружением устанавливается в зажиме сварочного автомата, а после приваривания и начала подъема автомата расцепляется с ним.

Учитывая, что все без исключения объекты комплекса не могли быть выбраны из промышленно выпускаемого оборудования, представляет интерес особенности их разработки и конструирования.

Рассмотрим автомат АДСП-200 для мокрой сварки на большой глубине в стесненных условиях. Автомат представляет собой трубчатую металлоконструкцию, объединяющую следующие основные узлы: модуль подачи электродной проволоки, модуль вращения сварочной головки (механизма подачи), модуль контактных узлов. Модуль подачи и модуль вращения выполнены на основе безредукторных компьютеризованных электроприводов постоянного тока в составе безколлекторных электродвигателей с конической передачей на подающий ролик. Модуль подачи состоит из устройства прижима электродной проволоки, мундштука с направляющим каналом и токоподводящим наконечником. Дополнительно модуль включает колебатель мундштука, а также узел фиксации доньшка с регулятором усилия фиксации для гарантированного расцепления автомата с доньшком после цикла сварки, а также скользящим контактным узлом токопередачи сварочного напряжения (обратный кабель «-»). Введение в состав модуля колебателя мундштука обусловлено наличием достаточно больших зазоров между привариваемым доньшком и внутренней поверхностью трубы с одной стороны и невозможностью существенно увеличивать режимы сварки из-за возможного перегрева узлов автомата и прожога стенки трубы. Направляющий канал, в котором размещается необходимый для однофазового цикла сварки запас электродной проволоки, выполнен из пластика с низким коэффициентом трения. Длина канала 15...18 м. Учитывая стесненные условия, электродная проволока не наматывается как обычно на кассету, а находится в расправленном состоянии. При этом достигается два эффекта: экономия пространства для систем автомата и существенное снижение усилия при подаче. Для защиты от жидкой среды электродвигатель механизма подачи заключен в герметический бокс, заливаемый изолирующе-смазывающей жидкостью, и имеющий компенсирующую диафрагму, а также специальный герметичный разъем для подвода кабеля управления.

Основные сложности при разработке автомата для сварки АДСП-200 состояли в выборе компоновочных решений в крайне ограниченном пространстве с проведением большого количества экспериментальных исследований с созданием макетов узлов сварочного оборудования и имитацией условий сварки. Это дало возможность эффективного решения задачи разработки колебателя мундштука оригинальной конструкции, привод которого совмещен с приводом подачи электродной проволоки,

и, как следствие, увеличения требуемого момента на валу приводного электродвигателя. Невозможность установки датчиков положения мундштука относительно свариваемого стыка определила поиски технических решений в двух направлениях. Перед опусканием автомата мундштук ориентируется по будущему зазору относительно закрепленного в зажим доньшка. Начало и окончание сварки возможно с любого места и программируется заранее контроллерной системой управления модулем поворота с анализом пути, пройденного мундштуком, а далее по аналогичному алгоритму производится операция перекрытия шва автоматом.

На рис. 3 представлен внешний вид сварочного автомата АДСП-200 в положении перед погружением для сварки.

Следует отметить сложность задачи подвода и герметизации сварочных кабелей и проводов управления. Большая длина предопределила необходимость разработки технических решений по их быстрой стыковке с системами автомата и герметизации. Это и специальные глубоководные разъемы, и заливаемые легкоплавкими диэлектриками муфты.

*Источник сварочного тока типа ВДУ 25-506 МП.* Очевидно, что используя традиционные источники сварочного тока с жесткими внешними вольт-амперными характеристиками (ВАХ), реализовать процесс сварки с требуемыми характеристиками на значительном удалении объекта сварки невозможно. Это следует из экспериментальных исследований и выводов работы [4]. Из-за больших длин сварочных кабелей ограниченного сечения (увеличивается активное сопротивление внешней цепи, а, следовательно, повышается падение напряжения на кабеле) существенно изменяется ВАХ источника в зоне горения дуги. При этом компенсация падения напряжения во внешней цепи за счет увеличения напряжения не приводит к необходимому результату. Заметно меняется индуктивность системы «источник–дуга», что отрицательным образом

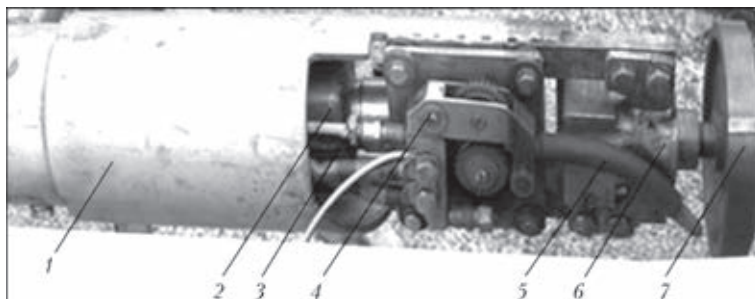


Рис. 3. Автомат для сварки в стесненных условиях на большой глубине: 1 — корпус; 2 — механизм вращения; 3 — направляющий канал; 4 — подающий механизм с колебателем мундштука; 5 — мундштук; 6 — крепление и элементы токопередачи на доньшко; 7 — доньшко



Рис. 4. Источник сварочного тока для работы с удаленными объектами

сказывается на характере горения дуги и переносе электродного металла. Для решения этих задач был разработан и изготовлен специализированный источник ВДУ 25-506 МП для механизированной и автоматической сварки при большом удалении подающего механизма (автомата) от источника питания, в том числе и мокрой автоматической сварки на глубине 200 м. На рис. 4 представлен внешний вид источника ВДУ 25-506 МП.

Для обеспечения высокого качества сварки при применении различных видов электродной проволоки источник имеет возможность регулирования динамических характеристик для установки необходимой для конкретного типа проволоки скорости нарастания тока. Возможность таких дополнительных регулировок обеспечивается с помощью программируемого логического контроллера фирмы «Molleg» (Германия). Применение принципа пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулирования динамики сварочного контура для создания необходимых характеристик источника питания при работе с длинными сварочными кабелями позволяет гарантировать его стабильную работу во всем диапазоне регулировок и повторяемость выбранных параметров настройки.

**Кабель.** Как показали результаты экспериментирования по возможностям передачи сварочного тока, сигналов управления и регулирования, единственно правильным техническим решением для работы в стесненных условиях является объединение всех электрических цепей в одном кабеле, который, к тому же, должен быть грузонесущим,

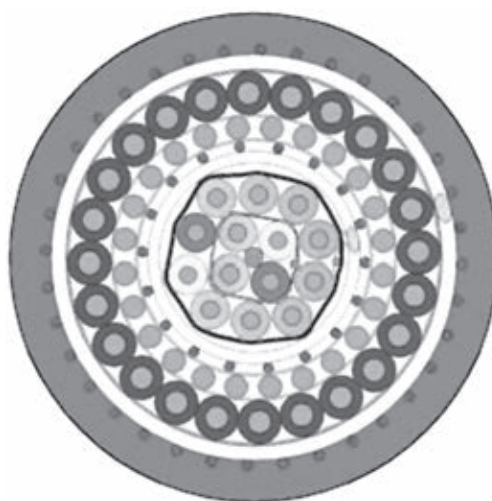


Рис. 5. Сечение кабеля для подводной автоматизированной сварки

т. е. выдерживать массу автомата, собственную массу, а также преодолевать гидростатическое сопротивление среды на этапах погружения и извлечения.

В промышленности отсутствуют кабели, способные удовлетворить такой комплекс требований. Решить все определенные выше задачи оказалось возможным при целенаправленной разработке кабеля, который получил техническое название «Кабель гибкий бронированный упрочненный погружной для электрической сварки КГБУПЭС 2x95+(4x2,5)э+(10x2,5)э» [5].

**Основные технические характеристики кабеля**

расчетная масса 1 км кабеля, кг.....	3850
наружный диаметр кабеля, мм.....	47,5
растягивающее усилие, Н не менее.....	20000
минимальный радиус внутренней петли изгиба	
кабеля в наружных диаметрах кабеля, не менее.....	8

Следует отметить, что все проводники с рациональной разбивкой по жилам и проводникам для обеспечения надежной изоляции и гибкости изготовлены из меди. Проводники питания и управления выполнены экранированными. На кабель нанесены мерные (на расстоянии одного метра) метки для дополнительного контроля длины его разматывания или сматывания. Поперечное сечение сложной конструкции кабеля КГБУПЭС 2x95+(4x2,5)э+(10x2,5)э показано на рис. 5. Обеспечение прочности кабеля при значительном растягивающем усилии осуществляется дополнительно введенными стальными охватывающими гибкими элементами, в том числе гибкой броней. Дополнительное упрочнение обеспечивалось большим количеством лавсановых нитей разного диаметра. Изоляция каждого проводника и слоя проводников выполнялась с применением надежных современных изолирующих материалов — ПЭТ-Э пленки, фолсан и др. с многократным (3...4 раза) перекрытием.

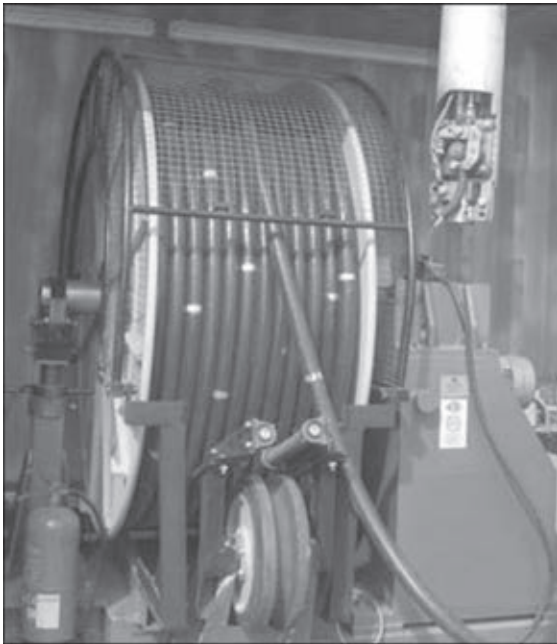


Рис. 6. Внешний вид разматывателя кабеля

*Разматыватель кабеля.* Разматыватель кабеля предназначен для хранения, транспортировки, подъема и опускания сварочного автомата в трубу на глубину 200 м и его последующего извлечения и представляет собой барабан решетчато-стержневой конструкции, установленный на приводном валу вращателя. Вал с другого конца дополнительно опирается на регулируемую по положению роликоопору (люнет). Вращательное движение вала с барабаном с регулируемой частотой осуществляется от регулируемого частотного электропривода с асинхронным электродвигателем, соединенным через редуктор с валом барабана. Конструкция барабана предусматривает наличие

специальной кабельной коробки для оперативного подключения сварочных кабелей и кабелей управления. Вся конструкция барабана, вращателя и роликоопоры установлена на сварной станине.

Разматыватель включает собственную локальную систему управления и регулирования, позволяющую управлять как направлением вращения барабана, так и частотой его вращения. Для удобства ведения погружения или подъема автомата разматыватель имеет выносной пульт управления. Кроме того, разматыватель содержит направляющий ролик, обеспечивающий стабильное движение кабеля в трубу к месту сварки. Ролик снабжен обрезиненной торцевой канавкой, позволяющей иметь сцепление ролика с кабелем при его размотке. Ролик также связан с датчиком пути инкрементального типа (цифровой преобразователь движения кабеля), обеспечивающего отсчет длины размотанного (опущенного к месту сварки) кабеля с цифровой визуализацией результата. На рис. 6 представлен рассматриваемый разматыватель в положении подготовки автомата к погружению.

**Основные технические характеристики разматывателя кабеля**

диаметр барабана минимальный, мм .....	100
номинальная частота вращения, об/мин .....	0,267
диапазон регулирования частоты вращения.....	1:10
номинальный момент, Н·м .....	40095

*Система управления и регулирования автомата АДСП-200.* Система предназначена для наладочного управления направлением вращения электродвигателей механизмов подачи электродной проволоки и вращения, установления (задания) скоростей подачи проволоки и сварочного перемещения (вращения механизма подачи). Система управления и регулирования базируется на модуле управления циклами сварки, которых может быть несколько и которые отличаются по способу возбуждения дуги и заварки кратера шва. Модуль создан на базе программируемого контроллера. В состав этой системы также входят модули контроллерного управления электродвигателями автомата с возможностью установки и контроля частот вращения их валов, а также управления циклами сварки. Каждый из модулей снабжен собственным блоком стабилизированного питания. Все сказанное выше размещено в специальном пульте управления с элементами герметизации (рис. 7). В этом же пульте, но отдельно, размещено согласующее оборудование, например, развязывающие реле для дистанционного управления источником сварочного тока. На лицевой панели пульта установлены сигнальная арматура, элементы защиты от перегрузок и токов короткого замыкания, элементы управления и регулирования, а также стрелочные контрольно-измерительные

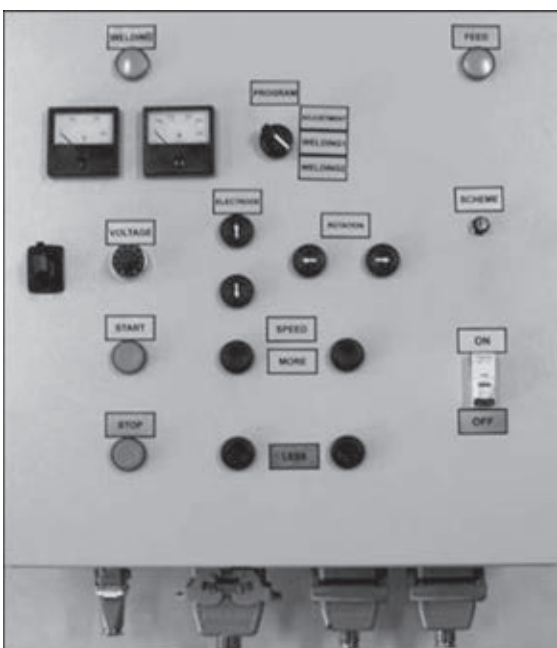


Рис. 7. Внешний вид пульта управления автоматом АДСП-200

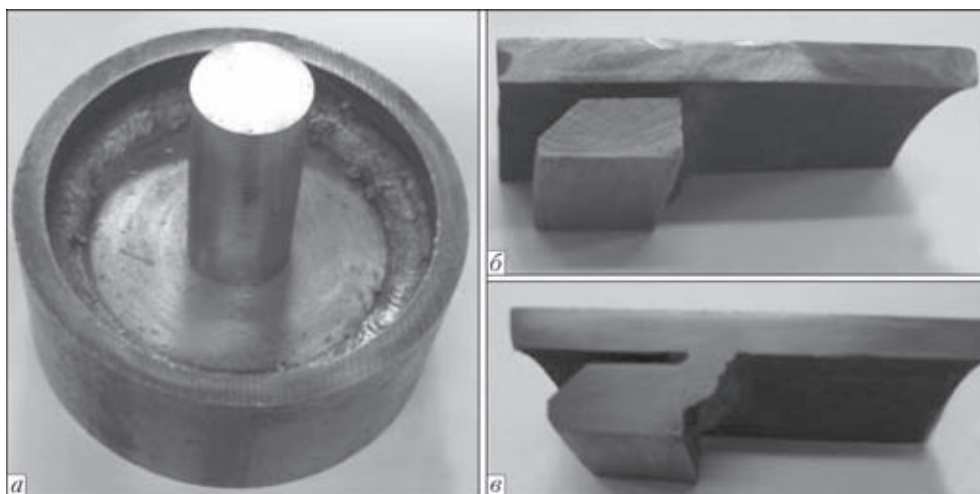


Рис. 8. Результаты приварки доньшка к внутренней поверхности трубы: *а* — кольцевой шов с перекрытием; *б* — реальный зазор между доньшком и трубой; *в* — форма сварного соединения

приборы. Связь с объектами управления осуществляется с помощью ряда разъемов.

Для проверки и наладки как отдельных узлов с автомата АДСП-200, так и комплекса в целом в ИЭС им. Е. О. Патона был создан специальный стенд, на котором проводили отработки элементов технологии. Глубоководные технологические эксперименты проводили в специальной барокамере. Некоторые результаты испытаний представлены на рис. 8. Следует отметить, что цикл сварки состоит из двух этапов: фиксация доньшка с использованием дугового процесса, предотвращающая вращение автомата с доньшком относительно трубы и выполнение цикла сварки по контуру зафиксированного доньшка с перекрытием шва.

Комплекс прошел производственную апробацию на объекте «GFE» (г. Лондон). Полученные результаты показали, что применение специального сварочного автомата позволяет повысить надежность теплообменника, сократить временные потери при выполнении работ по его герметизации, рационально использовать монтажную площадь, снизить финансовые затраты.

## Выводы

1. Предложена технология и оборудование, позволяющие способом мокрой дуговой сварки порошковой проволокой в автоматическом режиме осуществить сварку конструктивных элементов, надежно изолирующих нижнюю часть колонны теплообменника.

2. Разработан сварочный автомат, способный работать погруженным в трубу с внутренним диаметром 119 мм на глубину 200 м в среду жидкого теплоносителя.

1. Савич И. М., Смолярко В. Б., Камышев М. А. Технология и оборудование для полуавтоматической подводной сварки металлоконструкций // Нефтепромысл. стр.-во. – 1976. – № 1. – С. 10–11.
2. Кононенко В. Я., Рыбченков А. Г. Опыт мокрой механизированной сварки самозащитными порошковыми проволоками при ремонте под водой газо- и нефтепроводов // Автомат. сварка. – 1994. – № 9/10. – С. 29–32.
3. Кононенко В. Я., Грицай П. М. Мокрая механизированная сварка при ремонте корпусов судов // Морской флот. – 1994. – № 11–12. – С. 21–22.
4. Анализ возможности отработки системой саморегулирования характерных возмущений по длине дуги при подводной механизированной сварке / В. К. Лебедев, Ю. А. Узилевский, И. М. Савич, В. Я. Кононенко // Подводная сварка и резка металлов. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1980. – С. 10–23.
5. Высококачественные шланг-пакеты для подводной сварки и резки / В. Н. Мартинович, Н. П. Мартинович, В. А. Лебедев и др. // Автомат. сварка. – 2010. – № 9. – С. 42–44.

Поступила в редакцию 02.04.2014