
СЕКЦИЯ 8

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ
ПРОИЗВОДСТВО,
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ
УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ
ЦИКЛОМ**

УДК 004.8; 621.791

**КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
РАБОТЫ СВАРЩИКОВ**

Болотов С.В., к.т.н., доцент,
Белорусско-Российский университет,
e-mail: s.v.bolotov@mail.ru

Захарченков К.В., к.т.н.,
Белорусско-Российский университет,
e-mail: zaharchenkovkv@mail.ru

Фурманов В.А.,
ИООО «GoDel Technologies»,
e-mail: fupkaa@gmail.com

Макаров Е.В.,
ИООО «iTechArt»,
e-mail: jastapanda@gmail.com

Бобков Н.К.,
Белорусско-Российский университет

1. ВВЕДЕНИЕ

Информационные системы контроля сварочных работ широко используются на сварочных предприятиях, что является следствием перехода к Индустрии 4.0 [1,2]. Производители сварочного

оборудования ESAB, Kemppi, Fronius и др. предлагают собственные системы сбора данных и анализа сварочных процессов.

Информационные системы Fronius WeldCube, Kemppi WeldEye используются только на собственном сварочном оборудовании, отсутствует оценка работы сварщика [3-5]. Информационная система ESAB WELDQAS работает с любым сварочным оборудованием, позволяет оценивать качество сварки от 1 (отлично) до 7 (удовлетворительно), формировать протокол сварки. Недостатками информационной системы WELDQAS являются: исполнение в виде компьютерной программы, что не позволяет вести удалённо в реальном времени контроль сварочных процессов, отсутствие идентификации сварщиков и оборудования, закрытый алгоритм оценки качества сварки [6].

Развитием информационных систем контроля сварочных работ является использование интеллектуальных систем активного мониторинга и контроля и качества сварки [7,8], использование сварочных комплексов на основе человеко-кибер-физических систем (HCPS) [9]. Такие системы не нашли массового применения в производстве, однако интеллектуальные алгоритмы обработки данных, обнаружения дефектов сварки имеют большие перспективы [10,11].

Анализ существующих подходов к созданию информационных систем автоматического контроля сварочных процессов показал, что оценка работы сварщиков либо отсутствует, либо имеет субъективный характер; отсутствуют подходы, обеспечивающие комплексную автоматизацию оценки работы сварщиков, позволяющие исключить влияние человеческого фактора на результаты оценки.

Разработанная концепция предполагает переход от субъективной ручной оценки работы сварщиков руководителями сварочных работ и контролерами к комплексной автоматической оценке работы сварщиков на основе анализа параметров сварочных процессов, получаемых с регистраторов с последующей обработкой полученных данных для формирования оценки результатов сварки каждого сварочного прохода.

Основное достоинство предложенной концепции заключается в реализации постоянного автоматического контроля работы сварщиков с возможностью сохранения на сервере всех параметров режима, оценки качества работы и составления паспорта для каждого сварного соединения.

Предложенная концепция обеспечивает решение научной задачи повышения эффективности контроля сварочных работ с использованием регистраторов параметров сварочных процессов и авторского алгоритма формирования оценки работы сварщика на

основе усредненных значений параметров сварочных процессов, полученных с регистраторов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РАБОТЫ СВАРЩИКОВ

Концепция создания информационных систем автоматического контроля работы сварщиков основана на развитии методов объективной экспериментальной оценки процессов дуговой сварки [12,13].

Предложено анализ сварочных процессов осуществлять в двух частотных диапазонах [14,15]:

- 1) среднечастотном (до 10 кГц), который характеризует процессы переноса капель электродного металла в сварочную ванну;
- 2) низкочастотном (до 10 Гц), который характеризует процесс формирования сварочной ванны (сварного шва).

К методам изучения процессов переноса электродного металла относят: осциллографирование параметров режима сварки и высокоскоростную съёмку, которые реализуются на специальном информационно-измерительном комплексе [16]. Контролю подвергаются следующие параметры режима сварки: сварочный ток, напряжение на дуге, скорость сварки, скорость подачи проволоки, расход защитного газа и др. Стабильность процесса переноса электродного металла предложено оценивать по коэффициенту вариации энергии дуги на стадии формирования капли расплавленного металла [17]. Стабильность процесса обеспечивают определённым сочетанием параметров режима сварки для заданного материала свариваемых деталей, сварочных материалов.

Процесс формирования сварочной ванны оказывает влияние на геометрические размеры сварного шва: глубину проплавления, ширину шва, высоту усиления. Отклонения тока от заданного или среднего значения сказываются на глубине проплавления. Отклонения сварочного напряжения вызывают пропорциональные изменения ширины шва.

Обеспечить качество сварки возможно только при обеспечении стабильности процесса сварки и формировании сварного соединения требуемых по соображениям прочности геометрических размеров. Таким образом, информационная система должна использоваться как на этапе разработки инструкции на технологический процесс сварки для оптимизации параметров режима, так и в процессе сварки для контроля за их соблюдением.

В основе предложенной концепции лежат следующие принципы:

1) комплексный подход к автоматическому формированию оценки работы сварщика на основе параметров сварочных процессов;

2) комплексная обработка данных, получаемых с датчиков, на регистраторе в сочетании с последующей обработкой данных, поступивших с регистратора, на сервере в процессе формирования оценки работы сварщика;

3) визуальное представление параметров процесса работы сварщика в виде графических зависимостей, демонстрирующих изменение параметров процесса сварки в процессе проведения работ.

Повышение качества сварочных работ, в соответствии с предложенной концепцией, достигается за счет объективной оценки работы каждого сварщика с возможностью последующего детального анализа результатов работы сварщика в течение заданного периода, реализации возможности формирования рейтинга сварщиков и выявления сварщиков, у которых чаще других параметры сварочных процессов выходят за пределы допустимых значений, заданных в технологических инструкциях.

Отличительными особенностями концепции являются:

1) комплексный подход к созданию информационных систем контроля работы сварщиков, отличающийся:

– автоматической регистрацией параметров сварочных процессов с использованием специальных аппаратных средств (регистраторов), обеспечивающих получение параметров сварочных процессов с частотой от 10 кГц;

– комплексной обработкой информации о параметрах сварочных процессов с использованием аппаратного и программного обеспечения, что позволяет полностью автоматизировать оценку сварочных работ, исключив участие человека и повысив достоверность оценки качества сварочных работ;

2) использование алгоритмов оценки работы сварщиков, адаптированных к условиям производства сварочных работ.

Контроль работы сварщиков предполагает оценку качества сварочных работ на основе оценки параметров сварочных процессов. В соответствии с предложенной концепцией, контроль работы сварщиков обеспечивается путем автоматического выбора и поддержания оптимальных параметров режима сварки в зависимости

от технологии, требуемых характеристик сварных соединений, основных и сварочных материалов.

Автоматический контроль работы сварщиков с использованием предложного подхода предполагает реализацию аппаратной и программной части информационной системы (рис.1). Аппаратная часть системы обеспечивает получение параметров сварочных процессов со сварочных аппаратов и передачу на сервер. Программная часть обеспечивает интеллектуальный анализ данных [17]. Автоматический контроль работы сварщиков может быть реализован на этапе сварки корневого, заполняющего и облицовочного слоя в разных пространственных положениях.

Для решения задачи автоматического контроля работы сварщиков разработаны алгоритмы обработки информации, обеспечивающие возможность реализации основных принципов и особенностей предложенной концепции. Разработанные алгоритмы реализованы в автоматизированной системе регистрации сварочных процессов [18].



Рис. 1. Структурная схема концепции создания информационных систем контроля работы сварщиков

3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РАБОТЫ СВАРЩИКОВ

Информационная система автоматического контроля сварочных работ $ISWk = \langle WP, Wemp, WT, Weq, WPS \rangle$ характеризуется множеством сварочных процессов WP , множеством сварщиков WE , множеством заданий на выполнение сварочных работ WT , множеством единиц оборудования Weq и множеством технологических инструкций WPS .

Сварочный процесс WP определяется как множество технологических операций WPO , которые необходимо выполнить для получения качественного сварного соединения.

Каждый сварщик $Wemp = \langle WPOa, WPw \rangle$ характеризуется множеством областей распространения квалификации, по которым он аттестован $WPOa$, и множеством параметров сварочных процессов, которые автоматически получаются с регистраторов WPw .

Каждое задание на выполнение сварочных работ $WT = \langle Tech_{WT}, T_{WT} \rangle$ характеризуется используемой технологией $Tech_{WT}$ и сроком выполнения T_{WT} .

Каждая единица оборудования $Weq = \langle WPO_{Weq}, PMin_{Weq}, PMax_{Weq} \rangle$ характеризуются множеством способов сварки, для выполнения которых оно может использоваться WPO_{Weq} , множеством диапазонов (максимальных $PMax_{Weq}$ и минимальных $PMin_{Weq}$ допустимых значений) каждого параметра режима сварки.

Каждая технологическая инструкция $WPS = \langle WPO_{WPS}, PMin_{WPS}, PMax_{WPS}, PMid_{WPS} \rangle$ содержит множество технологических операций, которые могут выполняться в соответствии с данной инструкцией WPO_{WPS} , и множество максимальных $PMax_{WPS}$, минимальных $PMin_{WPS}$ и средних $PMid_{WPS}$ значений параметров сварочных процессов ($PMid_{WPS} = (PMax_{WPS} + PMin_{WPS})/2$).

Целевая функция задачи создания информационной системы автоматического контроля сварочных процессов представляет собой сумму оценок сварщиков за выполнение всех работ:

$$\sum_{i=1}^W WMw_i(WPO_i, WT_i, Weq_i, WPS_i) \rightarrow \max ,$$

где i – номер оценки сварщика за выполнение задания WT_i технологической операции WPO_i на оборудовании Weq_i в соответствии с технологической инструкцией WPS_i ; W – количество оценок, полученных сварщиками за выполнение всех работ.

4. АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РАБОТЫ СВАРЩИКОВ

Автоматическая оценка работы сварщиков получается на основании значений параметров сварочных процессов, передаваемых с блока датчиков на регистратор.

Параметры сварочных процессов WP_w можно разделить на следующие категории:

- критические параметры WP_{wk} , при выходе которых за пределы допустимых значений сварочный процесс не должен запускаться;

- пороговые параметры WP_{wt} , при выходе которых за пределы допустимых значений, сварщик и руководитель сварочных работ должны получать соответствующие уведомления;

- рабочие параметры сварочных процессов WP_{ww} , которые оказывают влияние только на оценку работы сварщика.

Оценка автоматической работы сварщиков выполняется по следующему алгоритму:

Этап 1. Оценка при запуске сварочного процесса. Если критические параметры сварочного процесса, при выходе которых за пределы допустимых значений процесс не должен выполняться, оказываются выше максимального $WP_{wk_j} > P_{Omax_{WPS_{ij}}}$, где j – номер параметра сварочного процесса) или ниже минимального значения ($WP_{wk_j} < P_{Omin_{WPS_{ij}}}$), указанного в технологической инструкции, сварочный процесс не запускается и на регистраторе появляется соответствующее сообщение об ошибке.

Этап 2. Оценка работы сварщика во время сварки.

Шаг 2.1. Если контролируемый параметр сварочного процесса выходит за пределы допустимых значений ($WP_{wt_j} < P_{Omin_{WPS_{ij}}}$ или $WP_{wt_j} > P_{Omax_{WPS_{ij}}}$), указанных в соответствующей технологической инструкции, сварщику выдается звуковой сигнал. Частота звукового сигнала зависит от контролируемого параметра, выходящего за пределы допустимых значений.

Шаг 2.2. Полученные с датчиков значения параметров сварочного процесса WP_w усредняются на регистраторе.

Шаг 2.3. Усредненные значения параметров $\overline{WP_w}$ передаются на сервер.

Этап 3. Формирование оценки работы сварщика выполняется следующим образом:

Шаг 3.1. Для каждого измеримого параметра сварочного процесса $WP_{w_{ij}}$, указанного в технологической инструкции,

определяется весовой коэффициент δWP_{w_j} в диапазоне от 0 до 1. Сумма всех весовых коэффициентов должна быть равна 1. Весовые коэффициенты определяют на стадии разработки технологического процесса сварки и хранятся в базе данных.

Шаг 3.2. Оценка усредненного k -го значения каждого параметра сварочного процесса выставляется следующим образом:

$$WM_{w_{ijk}} \begin{cases} \frac{(POMax_{WPSij} - \overline{WP}_{w_{ijk}})}{(POMax_{WPSij} - POMid_{WPSij})}, & \text{если } POMid_{WPSij} < \overline{WP}_{w_{ijk}} \\ \frac{(\overline{WP}_{w_{ijk}} - POMin_{WPSij})}{(POMid_{WPSij} - POMin_{WPSij})}, & \text{если } POMid_{WPSij} \geq \overline{WP}_{w_{ijk}} \\ 0, & \text{если } POMin_{WPSij} > \overline{WP}_{w_{ijk}} \text{ или } POMax_{WPSij} < \overline{WP}_{w_{ijk}} \end{cases},$$

Оценка сварщика за каждый шов рассчитывается по формуле:

$$WM_{w_i} = \sum_{j=1}^P (\delta WP_{w_{ij}} \cdot (\frac{\sum_{k=1}^{Pv} \overline{WP}_{w_{ijk}}}{WP})),$$

где Pv – количество усредненных значений j -го параметра сварочного процесса, переданных с регистратора на сервер; P – количество параметров сварочных процессов, допустимые диапазоны значений которых указаны в технологической инструкции WPS_i .

Этап 4. Запись оценки сварщика для каждого прохода в базу данных для последующего анализа качества работы.

Предложенный алгоритм обеспечивает возможность полной автоматизации оценки работы сварщика, полностью исключая человеческий фактор и повышая объективность оценки работ.

5. ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РАБОТЫ СВАРЩИКОВ

Технология автоматического контроля сварочных работ, разработанная в соответствии с предложенной концепцией, включает следующие основные этапы:

Этап 1. Ввод с помощью Web-приложения сменных заданий руководителями сварочных работ, включающих: наименование объекта, участок/цех, изделие, маркировку сварных соединений, прошедший аттестацию технологический процесс сварки с допусками на контролируемые параметры режима, основные и сварочные материалы.

Этап 2. Радиочастотная идентификация сварщика, сварочного оборудования на регистраторе сварочных процессов. Считывание сменных заданий с сервера, соответствующих области

распространения квалификации сварщика, с использованием GSM-канала.

Этап 3. Запуск на регистраторе процесса контроля сварочных работ.

Этап 4. Передача данных с блока датчиков (сварочный ток, напряжение на дуге, скорость подачи проволоки, расход защитного газа, температура в зоне сварного соединения) на регистратор и пульт сварщика.

Этап 5. Формирование паспорта каждого сварного соединения и отчета о работе сварщика.

Отличительными особенностями предложенной технологии является объективная оценка качества сварочных работ; возможность постоянного контроля работы сварщиков в реальном времени; документальное подтверждение качества сварки каждого соединения.

6. АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО ПОДХОДА ПРИ СОЗДАНИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РАБОТЫ СВАРЩИКОВ

Информационная система автоматического контроля работы сварщиков состоит из аппаратной части – регистратора сварочных процессов и программного обеспечения [18,19].

Регистратор подключается к сварочному источнику ручной дуговой, полуавтоматической или автоматической дуговой сварки любого производителя и конструктивно содержит три отдельных блока: основной блок регистрации и блок датчиков сварочного тока и напряжения на дуге, которые располагаются у сварочного аппарата и блок датчиков, который располагается в месте проведения сварочных работ и предназначен для переключения сварочных слоёв, контроля межслойной температуры и оповещения звуковым сигналом сварщика о приближении к границам рекомендуемых технологической инструкцией параметров [18].

Информационная система прошла апробацию в Центре сертификации и испытаний Белорусско-Российского университета при аттестации сварщиков по требованиям СТБ EN 287-1-2009 для выполнения сварочных работ на опасных производственных объектах. Проверка соответствия параметров режима, заданным инструкцией на технологический процесс сварки с записью на сервер, осуществлялась при проведении квалификационных испытаний контрольных сварных соединений при аттестации всех сварщиков на протяжении 2021 г. Контрольные образцы подвергались визуальному контролю и механическим испытаниям в контрольно-измерительной лаборатории для подтверждения соответствия требованиям технических

нормативно-правовых актов. В результате применения предложенной концепции количество сварщиков, прошедших первичную аттестацию, увеличилось с 55% в 2020 г. до 78% в 2021г., а повторную аттестацию – до 95%.

Система автоматизированного контроля работы сварщиков и качества сварочных работ установлена и прошла приёмо-сдаточные испытания в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» при сварке магистральных трубопроводов диаметром от 89 мм до 720 мм из стали 20. Белорусско-Российским университетом разработаны инструкции на 9 технологических процессов сварки, определены пороговые значения сварочного тока, напряжения на дуге для обеспечения стабильного процесса и требуемых размеров сварного шва при сварке корневого, заполняющего облицовочного проходов. Контроль сварочных работ осуществлялся с помощью трёх регистраторов сварочных процессов. На каждый сварной стык формировался паспорт с осциллограммами параметров режима сварки и оценкой работы сварщика по каждому сварочному проходу. На рис.2 представлен фрагмент паспорта сварного стыка при ручной дуговой сварке трубы 273x8 из стали 20 с использованием сварочных электродов LB-52U. Сварочный ток в соответствии с технологической инструкцией должен находиться в диапазоне от 50 до 80 А. В таблице представлены максимальные, минимальные и средние значения контролируемых параметров, а также сформированная системой средняя оценка за сварку прохода.



Рис.2. Фрагмент паспорта сварного соединения

В результате приёмо-сдаточных испытаний всех сварных стыков выходов за границы рекомендуемых технологической

инструкцией значений не зафиксировано, что отражено в паспортах сварных стыков и подтверждено отсутствием дефектов сварных соединений при 100 % рентгенографическом контроле.

Отсутствие нарушений параметров режима сварщиками объясняется информированием регистратором сварочных процессов о требуемых технологической инструкцией значениях при сварке каждого прохода и звуковом оповещении приближения к граничным значениям в процессе сварки, что позволяет своевременно корректировать технологический процесс.

В результате применения предложенной концепции, алгоритма автоматической оценки работы сварщиков и технологии комплексного автоматического контроля при производственных испытаниях, удалось повысить среднюю оценку сварщиков с 6,2 в начале испытаний до 7,2 в конце испытаний, за счёт объективной оценки каждого сварщика и проведенного руководителем сварочных работ анализа их работы с выработкой корректирующих воздействий.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена новая концепция создания информационных систем автоматического контроля работы сварщиков, основанная на комплексном применении новых аппаратных и программных средств автоматической регистрации сварочных процессов и последующей автоматической обработки информации.

Апробация предложенного подхода проведена при создании автоматизированной системы регистрации сварочных процессов для аттестации сварщиков в Центре сертификации и испытаний Белорусско-Российского университета. В результате применения предложенной концепции количество сварщиков, прошедших аттестацию увеличилось с 55% до 78%.

Применение предложенной концепции при реализации системы автоматизированного контроля работы сварщиков и качества сварочных работ в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» позволила повысить среднюю оценку сварщиков с 6,2 до 7,2 при обеспечении качества сварных соединений магистральных трубопроводов.

Литература

1. Lu Y. Industry 4.0: A Survey On Technologies, Applications And Open Research Issues. J Ind Inf Integr 2017; 6:1–10.
2. Reisgen U., Mann S., Middeldorf K., Sharma R. et al. Connected, Digitalized Welding Production – Industrie 4.0 In Gas Metal Arc Welding. Weld World 2019; 63:1121–31.
3. Fronius: официальный сайт // WELDCUBE [Электронный ресурс]. 2022. – URL: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/innovative-solutions/weldcube> (дата обращения: 18.02.2022).
4. Posch G., Bruckner J., Ennsbrunner H. Industry 4.0 in welding. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach 2018;62.

5. КЕМППИ: официальный сайт. Программное обеспечение для управления сварочным производством [Электронный ресурс]. 2022. – URL: <https://www.kemppi.com/ru/offering/category/programmnoe-obespecenie-2/programmnoe-obespecenie-dla-upravlenia-svarocnym-proizvodstvom-2/> (дата обращения: 18.02.2022).
6. ESAB: официальный сайт компании // WELDQAS [Электронный ресурс]. 2022. – URL: <https://www.esab.ru/ru/products/esab-digital-solutions-eds/quality-assurance/weldqas.cfm> (дата обращения: 18.02.2022).
7. Wang B., Hu S., Sun L., Freiheit T. Intelligent Welding System Technologies: State-Of-The-Art Review And Perspectives // *Journal of Manufacturing Systems*. July 2020. Vol. 56, pp. 373-391.
8. Ji Zh., Peigen L., Zhou Y., Wang B. et al. Toward New-Generation Intelligent Manufacturing // *Engineering*. 2018. 4:11-20.
9. Ji Zh., Zhou Y., Wang B., Jiyuan Z. Human-Cyber-Physical Systems (HCPSs) In The Context Of New-Generation Intelligent Manufacturing // *Engineering*. 2019. 4:624-636.
10. Chen C., Lv N., Chen S. Data-Driven Welding Expert System Structure Based On Internet Of Things // *Transactions on intelligent welding manufacturing*. Springer. 2018. Pp. 45-60.
11. Sassi P., Tripicchio P., Avizzano C. A Smart Monitoring System For Automatic Welding Defect Detection // *IEEE Trans. Ind. Electron*. 2019. 66:9641-50.
12. Потаповский А.Г., Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: Монография. Юргинский технологический институт. – Томск: 2012. 208 с.
13. Милютин В.С. Испытания сварочных свойств оборудования для дуговой сварки. – Екатеринбург. 2019. 466 с.
14. Гладков Э.А., Юшин А.А., Перковский Р.А. и др. Оценка сварочных свойств оборудования с инверторными источниками питания по энергетическим характеристикам // *Сварка и диагностика*. 2011. №1. С.31-35.
15. Bolotov S.V. Investigation of the Criteria for Evaluating Electrode Metal Transfer in Short Circuit Gas-Shielded Arc Welding [Electronic resource] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021. - №1118. - P.0120003. - URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1118/1/0120003/pdf>.
16. Болотов С.В., Хомченко А.В., Шульга А.В., Болотова Е.Л. Информационно-измерительный комплекс для исследования процессов плавления и переноса электродного металла при дуговой сварке // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2020. №6(91). С.4-11.
17. Bolotov S., Zakharchenkov K., Makarov E., Furmanov V. Intelligent Welding Control System // *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. 2965, pp. 260-267.
18. Болотов С.В. Регистратор параметров сварочных процессов РСП-БРУ-01 // Сб. тр. XVI междунар. науч.-техн. конф. «Современные проблемы машиностроения». – Томск: ТПУ, 2021. С.197-198.
19. Болотов С.В., Захарченков К.В., Макаров Е.В., Фурманов В.А. Технология повышения эффективности контроля сварочных процессов в интеллектуальной системе weldingcontrol //: Сб. тр. XI междунар. науч.-техн. конф. «Энергетика, информатика, инновации – 2021». В 2 т. Т 2. 2021. С. 227-230.