

УДК 622.276.6:622.245.5:621.314

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ПОГРУЖНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СКВАЖИН

- ХВОЩАН О.В.** канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев, Украина, e-mail: khvoshchan@gmail.com;
- ЖЕКУЛ В.Г.** канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев, Украина;
- СМИРНОВ А.П.** канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев, Украина, e-mail: smirnovap1978@gmail.com

Цель работы. Оценка современного состояния, особенностей конструкции и перспектив развития электроразрядных погружных устройств для обработки скважин.

Методы исследования. Анализ принципа действия и конструктивного исполнения электроразрядных погружных устройств для обработки скважин.

Полученные результаты. Обоснована необходимость использования многоступенчатых схем преобразования энергии электроразрядных погружных устройств для обработки скважин с учетом особенностей электроразрядного воздействия, критических условий обработки призабойной зоны скважины, повышенных требований надежности ко всем блокам погружной части комплекса и удаленности объекта обработки от источника электропитания. Рассмотрены особенности конструкции и характеристик электроразрядных погружных устройств ведущих мировых компаний (Новас (Россия), Blue Spark (Канада), I-Pulse (Франция), Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины), осуществляющих их производство и обработку нефтяных скважин. Установлено, что все действующие устройства имеют блочную структуру, причем непосредственно в зону нефтяного пласта на соединительном кабеле доставляются соединенные блоки зарядного устройства, емкостного накопителя энергии, высоковольтного коммутатора, электродной системы. Установлено, что параметры электрического разряда в установках разных компаний изменяются в широких пределах (разрядное напряжение от 2,5 до 30 кВ, энергия в импульсе от 1 до 2 кДж), коммутирование энергии в разрядной цепи может быть как управляемым, так и неуправляемым, а для преобразования электрической энергии в акустическую используется как электрический взрыв проводника, так и свободный искровой разряд в скважинной жидкости или специально приготовленном водном растворе с заданными в зависимости от условий в скважине электрическими характеристиками. Определены перспективы развития электроразрядного оборудования и технологии для повышения притока нефти в скважины. Выделены коммерческо-экономический, научно-технологический и технический аспекты перспектив развития данного направления в Украине.

Научна новизна. Обоснована необходимость использования многоступенчатых схем преобразования энергии при проектировании электроразрядных погружных устройств для обработки скважин. Определены коммерческо-экономический, научно-технологический и технический аспекты перспектив развития оборудования и технологии для повышения притока нефти в скважины.

Практическая ценность. Анализ технических разработок ведущих мировых компаний в области повышения притока нефти в скважины с использованием высоковольтного электрического разряда позволил определить дальнейшие пути совершенствования отечественной технологии и оборудования, что позволит внести существенный вклад в энергонезависимость Украины.

Ключевые слова: высоковольтный электрический разряд; электроразрядные погружные устройства; нефтяная скважина; дебит; многоступенчатое преобразование энергии.

I. ВВЕДЕНИЕ

Значительным фактором, определяющим процветание экономики промышленно развитых стран мира, является стабильность рынка углеводородного сырья. Поэтому одной из основных целей, определенных государственной политикой Украины в сфере энергонезависимости, является наращивание добычи отечественных энергоносителей [1]. Несмотря на это,

максимальная добыча нефти и газа в Украине наблюдалась в середине семидесятых годов прошлого века, после чего на протяжении десятков лет снижалась. В частности, добыча нефти с газоконденсатом в Украине в 2017 году составила 2,098 млн тонн при пиковом значении 14,4 млн тонн в 1972 году. Результатом явилось закрытие большинства отечественных нефтеперерабатывающих заводов и зависимость экономики Украины от поставок нефтепродуктов из стран ближ-

него и дальнего зарубежья.

Существенного увеличения добычи нефти можно достичь введением в эксплуатацию новых скважин. Кроме того, в мировой практике до 30 % текущей добычи нефти и газа достигается благодаря восстановлению недействующих скважин, включая бурение в них наклонных и горизонтальных ответвлений [1], поскольку более половины природных запасов нефти остается не извлеченной из пласта после уменьшения ее притока в действующую скважину.

Одним из многих методов восстановления скважин, достаточно распространенным в разных странах, является электроразрядный. Специальное оборудование позволяет осуществить высоковольтный электрический разряд в жидкости, а возникающие при этом волны давления и другие факторы разрушают и выносят в ствол скважины осадки физико-химического и органического происхождения, накапливающиеся в зоне перфорации скважин, повышая при этом их производительность (дебит) [2]. Данный способ воздействия на объект позволяет повышать производительность не только нефтяных, но и водозаборных, дегазационных, приемистость нагнетательных скважин.

Несмотря на опубликованный обзор [2] сорокалетней истории создания высоковольтных погружных скважинных установок Институтом импульсных процессов и технологий (ИИПТ) Национальной академии наук (НАН) Украины (г. Николаев), многие технические вопросы, касающиеся особенностей их проектирования, остались не освещены. Кроме того, остались нераскрытыми достижения других компаний мира, применяющих электроразрядную технологию для обработки скважин, что может дать ответ о положении отечественных разработок в данном направлении в мировом масштабе.

II. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является оценка современного состояния, особенностей конструкции и перспектив развития электроразрядных погружных устройств для обработки скважин.

III. ОСОБЕННОСТИ СКВАЖИНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК

Подводный электровзрыв [3] представляет собой процесс быстрого (от 1 до 100 мкс) преобразования энергии электрического поля заряженной конденсаторной батареи в механическую работу при подводном искровом разряде или подводном взрыве проводников. Технологический эффект при этом достигается за счет образования ударных волн, волн сжатия, электромагнитного излучения, кавитационных явлений, акустического поля. Как и в любом другом электроразрядном оборудовании, неотъемлемыми частями скважинных электроразрядных установок являются:

- блок емкостных накопителей (конденсаторов), способный заряжаться от источника энергии до но-

минального значения напряжения (от единиц до десятков киловольт) за времена порядка единиц секунд, а разряжаться в сотни тысяч раз быстрее, выдавая в нагрузку токи в десятки килоампер;

- электродная система, в которой осуществляется взрывное преобразование накопленной электрической энергии в акустическую, с требованиями высокого КПД преобразования, надежности контактных соединений, стойкости к воздействию механических возмущений, возникающих при электровзрыве, а также малых индуктивности и активного сопротивления протекающим импульсным токам килоамперного диапазона, как и для других блоков разрядной цепи;

- высоковольтный коммутатор (разрядник), осуществляющий надежное и стабильное подключение блока конденсаторов к электродной системе при достижении номинального напряжения его зарядки;

- зарядное устройство требуемой мощности, преобразующее электрическую энергию питающей сети либо автономного генератора с целью зарядки блока конденсаторов до номинального напряжения.

В то же время, разработка электроразрядного скважинного оборудования должна учитывать ряд особенностей:

- повышенные технические требования к работе блоков, погружаемых в зону нефтяного пласта. Так, в продуктивной зоне скважин рабочая температура может достигать 100 °С и более, гидростатическое давление – 50 МПа, а глубина залегания пласта может находиться в диапазоне от менее 3 до 7 км;

- диаметр нефтяных скважин может находиться в пределах от 75 до 400 мм, что накладывает ограничение к поперечному сечению погружных блоков электроразрядных устройств, имеющих цилиндрическую форму. Кроме того, в процессе эксплуатации в скважине располагается насос с насосно-компрессорными трубами, что также следует учитывать при проведении обработки скважин;

- скважина помимо металлической колонны труб включает в себя также цементное кольцо в заколонном (затрубном) пространстве, которое в процессе ремонтных работ не должно быть повреждено;

- при проведении электроразрядной обработки скважина должна быть заполнена жидкостью (водо-нефтяной эмульсией, водой, растворами поверхностно-активных веществ, кислот и т.д.), причем величина столба и состав жидкости в продуктивной зоне скважины может меняться;

- значительное удаление объекта обработки от места управления электроразрядным оборудованием препятствует визуальному контролю процесса обработки, а доставка погружных блоков устройства и передача энергии от источника к объекту обработки предполагает использование протяженной соединительной линии – кабеля длиной от 3 до 10 км.

Принимая во внимание рассмотренные требова-

ния и ограничения, можно сделать вывод о значительном усложнении конструкции погружных электроразрядных установок в сравнении с традиционными высоковольтными комплексами, что влечет за собой необходимость тщательной научной и конструкторской разработки каждого блока и всей установки в целом.

IV. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК

Идея использования электрического разряда для обработки нефтяных скважин появилась в США в шестидесятых - семидесятых годах двадцатого века [4, 5]. Первые отечественные разработки научных основ электроразрядной обработки призабойной зоны нефтедобывающих скважин, оборудования и технологии, базирующихся на высоковольтном разряде в жидкости, берут свое начало в Институте импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины (бывшее Проектно-конструкторское бюро (ПКБ) электрогидравлики Академии наук УССР) с конца семидесятых годов прошлого столетия [2]. В дальнейшем развитие этого направления учеными США и СССР (а позднее России, Украины, Канады, стран Европы) велось параллельными путями, причем в условиях конкуренции возникали как сотрудничество между ними, так и игнорирование достижений соперников.

На протяжении нескольких десятков лет с разной степенью технической реализации рассматривались следующие концепции исполнения устройств.

В [6] предложено использование электроразрядной установки с расположением электродной системы специальной конструкции на устье скважины. При этом скважина до устья заполняется жидкостью, а насосное оборудование не требует демонтажа и извлечения. Авторы предполагают, что изменением электрических и частотных параметров разряда возможно получить импульсную кавитацию в зоне залегающего нефтяного пласта, способствующую притоку нефти в скважину, однако экспериментального подтверждения данной гипотезы на сегодняшний день не существует.

Рассматриваемые ниже конструкции погружных электроразрядных устройств предполагают расположение части блоков непосредственно в зоне обработки скважин и требуют демонтажа стационарного оборудования, находящегося в ней. Поэтому часто электроразрядную обработку проводят в комплексе с другими операциями, сопровождающимися капитальным ремонтом скважины.

СКБ «Агроприбор» (Украина) [7] и ООО «ЗЕВС-технологии-Р» (Россия) [8] разработали электроразрядные установки для очистки водозаборных скважин (рис. 1), особенностью которых является расположение на поверхности зарядного устройства (ЗУ), емко-

стных накопителей энергии (ЕН) и высоковольтного коммутатора (ВК). Электродная система (ЭС) опускается в зону обработки скважины на специальном высоковольтном малоиндуктивном соединительном кабеле (СК). Недостатком данной конструкции является невозможность обработки продуктивных зон скважины на глубинах свыше 300 м (что исключает ее использование в условиях нефтяных скважин), поскольку коэффициент полезного действия (КПД) преобразования накопленной в ЕН электрической энергии в механическую, выделяющуюся в ЭС, снижается с увеличением активного и реактивного сопротивления, вносимого в разрядный контур кабелем СК. Следует отметить, что похожая идея была выдвинута ранее в [4], однако в качестве ЭС предлагалось использовать высоковольтный кабель со специальной разделкой.

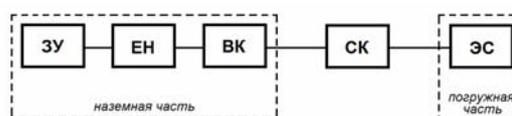


Рисунок 1. Блок-схема электроразрядной скважинной установки с расположением в ее погружной части лишь электродной системы

Значительного повышения КПД установки можно достичь, перенеся блок накопителей ЕН и коммутатор ВК в погружную часть (рис. 2), тем самым резко снизив величину индуктивности и активного сопротивления разрядного контура и увеличив амплитуду волн давления, образующихся в результате электрического разряда в электродной системе ЭС.

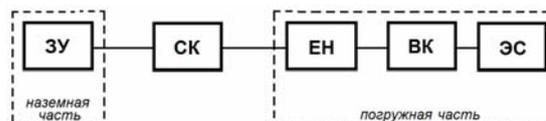


Рисунок 2. Блок-схема электроразрядной скважинной установки с соединением наземной и погружной части высоковольтным соединительным кабелем

В этом случае ЕН, ВК и ЭС должны работать в условиях повышенных скважинных температур и давлений, а также ограниченного объема, определяемого сечением скважины. Однако наибольшие сложности вызывает выбор соединительного кабеля СК, который должен быть высоковольтным (обеспечивать заряд ЕН до номинального напряжения), грузонесущим, работать при высокой температуре и гидростатическом давлении скважинной жидкости с широким диапазоном физико-химических характеристик. Кроме того, барабан с бухтой такого кабеля должен быть долговечным, иметь возможность беспрепятственно доставляться к скважине и обеспечивать возможность многократной доставки погружных блоков устройства на глубину залегающего продуктивного пласта. Разработка такого кабеля является дорогостоящей, поэтому

желательно использование наиболее близкого по предъявляемым требованиям грузонесущего кабеля с удовлетворительными электрическими и технологическими характеристиками при некотором усложнении конструкции скважинных установок.

Опыт показал, что из существующих вариантов целесообразно использовать геофизические каротажные кабели, входящие в состав геофизических станций, осуществляющих обслуживание нефтяных скважин в разных странах мира. При необходимости обеспечения напряжения зарядки ЕН от единиц до нескольких десятков киловольт современные геофизические кабели могут передавать напряжение до 1500 В, а зарядную часть установок следует выполнять с использованием многоступенчатой схемы преобразования энергии (рис. 3).

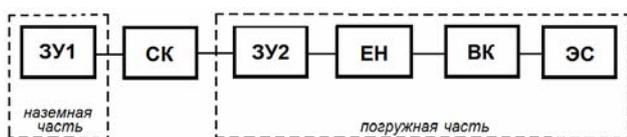


Рисунок 3. Блок-схема электроразрядной скважинной установки с многоступенчатым преобразованием энергии в зарядной цепи

В этом случае в наземном зарядном устройстве ЗУ1 электрические параметры источника входного напряжения преобразуются в выходные, не превышающие номинальные характеристики кабеля СК (напряжение, мощность). Далее электрический сигнал через СК передается в погружное зарядное устройство ЗУ2, повышающее напряжение до номинальной величины зарядки конденсаторов ЕН. На этом базовом принципе в настоящее время проектируются все известные электроразрядные устройства для обработки призабойных зон нефтяных скважин.

V. СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

За полувековой промежуток времени учеными разных стран были проведены различные теоретические исследования в области воздействия электрического разряда на продуктивную зону скважин, предложен ряд технических и технологических решений для его осуществления, изданы сотни патентов и научных статей в различных изданиях. Успешность электроразрядного метода обработки нефтяных скважин обусловила причины появления нескольких компаний, предлагающих использование своего высоковольтного оборудования для повышения их дебита. Коммерческая привлекательность метода вызвала желание большинства этих компаний максимально уменьшить объем технической информации о своих разработках, предлагая в качестве предоставляемых услуг лишь обработку скважин.

Удачный опыт совмещения научной и коммерче-

ской сфер деятельности показывает сотрудничество группы научно-исследовательских институтов Российской академии наук с инвестиционными фондами и крупными промышленными группами (например, ОАО «Газпром нефть», ОАО «Гомскнефть-ВНК» и др.), что позволило образованной лишь в 2007 году фирме Novas Energy Services (ООО «Новас Ск», Россия) [9] быстро добиться серьезных успехов, привлечь финансирование государственных (грантовая поддержка национального фонда «Сколково») и международных организаций, провести успешные обработки сотен скважин в России, Европе, США с помощью технологии и оборудования (рис. 4), защищенных международными патентами.



Рисунок 4. Внешний вид погружного устройства фирмы Novas Energy Services [9]

Особенности устройства для реализации технологии плазменно-импульсного воздействия (ПИВ), правообладателем которой является Novas Energy Services [10]:

- электродная система ЭС (см. рис. 3) замыкается металлической проволокой, намотанной на барабане в погружной части устройства. Процесс подачи проволоки в промежуток регулируется с наземного пульта управления. Запаса проволоки хватает на 2000 импульсов без поднятия погружной части устройства на поверхность земли. Ударная волна в ЭС формируется за счет взрыва замкнутой проволоки и выделения энергии, запасенной в ЕН. Контроль качества разряда осуществляется поясом Роговского, подающего импульс на наземный пульт управления. Частота разрядов – не более 2 в минуту;

- запасаемая в ЕН энергия регулируется в диапазоне (1,5 – 2) кДж, номинальное напряжение зарядки (2,5 – 6) кВ;

- разрядник ВК выполнен управляемым. Сигнал поджига ВК подается с наземного источника питания, что позволяет регулировать величину энергии, запасенной в ЕН;

- передаваемое по кабелю СК напряжение варьируется в диапазоне (80 – 300) В, в качестве СК используется многожильный каротажный кабель;

- погружная часть устройства имеет внешний диаметр около 100 мм, длину порядка 2,5 м, массу до 70 кг.

Следующей организацией, применяющей ряд электроразрядных технологий в промышленности (в частности, для повышения притока нефти в скважины) является основанная в 2007 г. французская компания I-Pulse [11]. Специалистами компании выпущен ряд международных патентов (например, [12]), защищающих конструкцию электроразрядного устройства для обработки скважин и его блоков, а входящая в

состав I-Pulse канадская фирма Blue Spark [13], основанная в 2011 г., осуществляет услуги по обработке нефтяных скважин с применением технологии Wireline Applied Stimulation Pulse (WASP), декларируя ее успешность на более чем 300 проектах в Канаде, США, странах Африки, Европы. На сайтах компаний представлены демонстрации лабораторных (рис. 5) и промысловых испытаний, однако конструкция скважинного устройства, его параметры являются, по всей видимости, коммерческой тайной компаний. Практически во всех патентах на метод и устройство для повышения притока нефти в скважины, принадлежащих Blue Spark (например, [14]), по данным вопросам идет ссылка на работы [15, 16], что позволяет сделать некоторые предположения об особенностях разработанного устройства.



Рисунок 5. Внешний вид погружного устройства фирмы Blue Spark [13]

В [15] декларируются следующие особенности конструкции электроразрядного скважинного устройства:

- технологический эффект достигается за счет пробоя межэлектродного незамкнутого промежутка в жидкости, заполняющей ЭС открытого типа с фокусировкой волн давления, обладающей способностью вращения вокруг своей оси в процессе обработки, и выделения в образовавшемся плазменном канале энергии, запасенной в ЕН и передаваемой в погружную часть от наземного источника по СК;

- в случае расположения ЗУ в наземной части устройства [15], зарядка ЕН осуществляется постоянным напряжением через СК неизвестной марки с количеством жил не менее трех (рис. 2), а при размещении ЗУ в погружной части устройства СК подключа-

ют к источнику переменного напряжения 110/220 или 240 В;

- номинальное напряжение зарядки основной батареи ЕН – 3 кВ, емкость – 100 мкФ, в качестве управляемого разрядника ВК, подключающего основную батарею ВН к ЭС, предлагается игнитрон [15]. Пробой межэлектродного промежутка ЭС обеспечивается подключением к нему дополнительной батареи конденсаторов емкостью 4 мкФ с номинальным напряжением зарядки около 30 кВ, возможность осуществления синхронизации разряда двух батарей в микросекундном диапазоне времени не рассматривается. При необходимости величина напряжения зарядки обеих батарей может изменяться, однако способ осуществления такого изменения в промышленных условиях, когда высоковольтная часть оборудования находится в ограниченных условиях скважины на большой глубине, не предлагается.

В [16] более подробно раскрываются процессы, которые могут сопровождать созданный устройством [15] электрический взрыв, вызывающий так называемую авторами электрогидравлическую акустическую вибрацию. Для увеличения зоны воздействия с 1000 до 5000 футов (с 300 до 1500 м) авторы предлагают использовать многоэлектродную систему, каждая пара электродов которой присоединена к своему разрядному контуру в одной или разных скважинах. Для активации продуктивных зон пласта предлагается варьировать частотные характеристики вибрации (которые определены геофизическими исследованиями) путем изменения индуктивности разрядных контуров. ЭС может комплектоваться резиновым рукавом для ограничения попадания жидкости, заполняющей скважину, от воды, прокачиваемой через электродную систему для удаления образующихся в результате разряда газов. Кроме того, электроды ЭС предлагается покрывать специальными сплавами, а для иницирования разряда замыкать межэлектродный промежуток покрытой графитом нитью, намотанной на барабан, либо специально впрыскиваемым газом.

На поверхности в специальной грузовой машине располагают источник питания и устройство контроля установки [16], в скважину на глубину нахождения продуктивной зоны на СК опускают цилиндрический зонд, состоящий из блока гироскопа для контроля зоны проведения обработки, блока преобразования и кондиционирования, блока ЕН, разрядного блока с возможностью вращения вокруг оси.

Согласно опубликованным рекламным материалам, последней разработкой Blue Spark является устройство WASP®212 с внешним диаметром цилиндрического корпуса около 54 мм, работающее при температуре до 130 °С, другие параметры не приводятся.

Единственной организацией, предлагающей услуги по разработке, изготовлению, поставке электроразрядных погружных установок сторонним отечественным и иностранным заказчикам, является ИИПТ

НАН України [2, 17]. Наличие серьезного бюджетного и внебюджетного финансирования в период с восьмидесятых годов прошлого столетия до начала нашего века позволило завершить ряд научно-исследовательских работ, посвященных как исследованию физических процессов, сопровождающих электрический разряд в условиях скважин, так и созданию высокотехнологичного оборудования для их обработки. Результаты работ изложены в ряде отчетов, десятках патентов и научных статей, защищены в диссертациях, воплощены в электроразрядном оборудовании, приобретенном разными заказчиками и эксплуатировавшемся на сотнях скважин во многих странах мира (Украина, Россия, Китай, США, Казахстан и др.).

Изначально остановившись на концепции многоступенчатого преобразования электрической энергии (рис. 3), исследователями ИИПТ были разработаны, испытаны и предложены научно обоснованные конструкции отдельных блоков и всего электроразрядного погружного комплекса в целом.

Результатом комплекса теоретических и экспериментальных исследований высоковольтного разряда в жидкости при повышенных температуре и гидростатическом давлении стала разработка электродных систем закрытого типа с обоснованием параметров заполняющей их жидкости [18]. Анализ электростатических полей, температурных и электродинамических режимов работы [19] дал возможность гарантировать стабильную и надежную работу высоковольтного неуправляемого разрядника, заполненного газообразным азотом. Многолетний опыт конструкторской деятельности с глубоким пониманием физических процессов, сопровождающих заряд и разряд диэлектрических систем, позволил разработать ряд высоковольтных конденсаторов для погружных установок [20]. Согласование параметров наземного и погружного зарядных устройств с характеристиками соединительного кабеля, исследование электрических процессов в зарядных цепях, содержащих протяженную кабельную линию, и тепловых процессов в отдельных элементах позволили снизить массогабаритные показатели электроразрядных погружных комплексов [21].

Первая обработка нефтяных скважин установкой «Скиф-3» произошла в 1983 году в Татарстане (СССР). Современные электроразрядные погружные комплексы типа «Скиф», разработанные в ИИПТ НАН Украины, способны обрабатывать продуктивную зону нефтяных скважин с внутренним диаметром более 124 мм, заполненную любой рабочей жидкостью с температурой в зоне обработки до 100 °С при гидростатическом давлении до 40 МПа. Конструктивно установки состоят из наземной и погружной части. Наземная часть массой не более 20 кг может располагаться в стандартной геофизической станции, подключается к питающей сети либо генератору, которые обеспечивают стандартное для разных стран мира

переменное напряжение от 220 до 480 В частотой 50 или 60 Гц и мощность до 4 кВА. В состав наземной части помимо силового блока преобразования энергии входят системы управления, контроля, индикации текущих параметров. Соединение наземной и погружной частей комплекса может осуществляться одножильным или многожильным стандартным геофизическим кабелем, по которому в зависимости от конструкции комплекса и параметров кабеля может передаваться постоянное или переменное (с частотой 3 кГц) регулируемое напряжение от 300 до 800 В.

Погружная часть имеет блочную цилиндрическую структуру с внешним диаметром корпуса 102 мм, длиной до 4,6 м и массой до 130 кг в сборе. Блок ЕН энергоемкостью 1 кДж заряжается до 30 кВ. В зависимости от конструкции комплекса и параметров скважины, устройство может осуществлять обработку призабойных зон с частотой от 12 до 60 импульсов в минуту.

Внешний вид блоков современного устройства «Скиф-100М» приведен на рис. 6.



Рисунок 6. Электроразрядное погружное устройство «Скиф-100М»

VI. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРИТОКА НЕФТИ В СКВАЖИНЫ

Как показал анализ, успешность использования высоковольтного электрического разряда в нефтяной промышленности многих стран мира не подвергается сомнению. Однако, несмотря на высокую текущую потребность Украины в углеводородных энергоносителях и наличие разработанного отечественного электроразрядного оборудования для повышения добычи нефти из остановленных на ремонт или эксплуатируемых скважин, в настоящее время это направление незаслуженно забыто в нашей стране. Периодическая покупка установок частными фирмами (в основном, зарубежными) не позволяет проводить серьезные исследования, направленные на усовершенствование как технологии, так и оборудования. Поэтому перспективы дальнейшего развития данного направления в Украине состоят из нескольких аспектов.

Коммерческо-экономический аспект. Успешность компаний Новас и I-Pulse (Blue Spark) связана с сотрудничеством научно-технических подразделений

и заинтересованных фирм, осуществляющих добычу нефти и обслуживание нефтяных скважин, с привлечением финансирования, достаточного для осуществления серьезных научных проектов, и реальной поддержкой государства. Поэтому необходимым фактором конечного успеха является активная реклама разработчика оборудования своих проектов и успехов в данной сфере, обсуждение условий взаимовыгодного сотрудничества с отечественными и зарубежными компаниями, владеющими и обслуживающими скважины, подготовка необходимых бизнес-планов с привлечением грантового и других видов бюджетного и внебюджетного финансирования, а также не декларируемое, а реальное содействие соответствующих отечественных государственных структур развитию перспективных научных разработок и науки в целом.

Научно-технологический аспект. Несмотря на успешные в мировой практике проекты, существует ряд слабо изученных вопросов, связанных с дальнейшим развитием технологии добычи неизвлеченной нефти из остановленных на ремонт или снизивших свой дебит скважин. Выполнение совместных теоретических и экспериментальных научно-исследовательских работ с ведущими учеными профильных организаций НАН Украины может вывести отечественную науку на лидирующие мировые позиции в рамках этой технологии. Теоретические исследования взаимного влияния параметров импульсного нагружения, возникающего при электрическом взрыве в жидкости, электрических характеристик погружных установок и самого разряда, комплексной обработки с другими методами, резонансных свойств пористых пород, содержащих нефть, на структуру пласта и реологические параметры нефти, лабораторные испытания на стендах и промышленные на скважинах дадут возможность разработать технологический регламент обработки любой нефтяной скважины.

Технический аспект. Электроразрядные погружные установки, созданные и используемые компаниями в настоящее время, имеют как преимущества, так и недостатки. Поэтому важно, используя мировой опыт, продолжать их усовершенствование. Перспективными выглядят следующие направления модернизации:

- разработка новой конструкции погружной части с уменьшенным внешним диаметром корпуса, устройством определения положения интервала перфорации любого типа скважины (вертикальной, горизонтальной, наклонной) и способа доставки технологического узла комплекса к объекту обработки;

- предложение новых блоков высоковольтного коммутатора и электродной системы с иницированием электрического пробоя для повышения надежности и эффективности обработки скважины;

- разработка новых импульсных конденсаторов с обоснованными электрическими характеристиками на базе современных диэлектрических материалов;

- внедрение систем мониторинга и контроля зарядных и разрядных процессов с возможностью гибкого регулирования технологических параметров процесса обработки;

- поиск путей снижения потребляемой погружным комплексом мощности за счет внедрения систем компенсации ее реактивной составляющей и обоснованного уменьшения времени обработки скважины при усовершенствовании как технологического регламента обработки, так и зарядного устройства комплекса.

VII. ВЫВОДЫ

1. Электроразрядный способ обработки нефтяных скважин является эффективным в использовании и экономически выгодным, что доказано коммерческой успешностью компаний, которые его используют в нефтедобывающей промышленности многих стран мира. Обработку скважин электроразрядным методом собственным оборудованием проводят компания Новас (Россия) и подразделение Blue Spark (Канада) компании I-Pulse (Франция). Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины разрабатывает и продает электроразрядные погружные установки конечным фирмам-заказчикам.

2. Учитывая особенности электроразрядного воздействия и критические условия обработки призабойной зоны скважины, ко всем блокам погружной части комплекса предъявляются повышенные требования надежности, а удаленность объекта обработки от источника электропитания вызывает необходимость использования многоступенчатых схем преобразования энергии при проектировании таких комплексов.

3. Опираясь на научно-технические достижения ведущих мировых компаний в области разработки электроразрядного погружного оборудования, определены дальнейшие пути усовершенствования высоковольтных комплексов для обработки нефтяных скважин, что позволит расширить сферу их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Крижанівський, Є.І. Про наукове забезпечення видобутку вуглеводневої сировини / Є.І. Крижанівський, Д.О. Єгер // Вісн. НАН України. – 2019. – № 6. – С. 48–56.
- [2] Жекул, В.Г. Погружные электроразрядные установки для интенсификации добычи полезных ископаемых / В.Г. Жекул, В.В. Литвинов, Ю.И. Мельхер [и др.] // Нафтогазова енергетика. – 2017. – № 1. – С. 23–31.
- [3] Гульй, Г.А. Научные основы разрядноимпульсных технологий / Г.А. Гульй. – К. : Наук. думка, 1990. – 208 с. – ISBN 5-12-001640-5.
- [4] Pat. No 3180418 USA. Casing Descaling Method and Apparatus / N.A. MacLeod. Patented Apr. 27, 1965.

- [5] Pat. No 4074758 USA. E21B 43/25. Extraction Method and Apparatus / H.W. Scott; Assignee Oil Recovery Corporation. Patented Feb. 21, 1978.
- [6] Малюшевский, П.П. К вопросу о механизме электроразрядной интенсификации притока флюидов в скважины / П.П. Малюшевский, А.П. Малюшевская // Электронная обработка материалов. – 2014. – № 50 (6), С. 66–73.
- [7] Рядов, В.П. Исследование технологических процессов в добыче газа, основанных на электрогидравлическом эффекте / В.П. Рядов, А.П. Агишев, А.Г. Муха, Г.Г. Горovenko // Электрический разряд в жидкости и его применение в технологии машиностроения и металлообработке : [Тезисы докладов I Всесоюзной научно-технической конференции], (Николаев, сентябрь 1976 г.). – К. : Наук. думка. – 1976. – ч. 2. – С. 32.
- [8] ZEVS-tekhnologii-R [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zevs-r.ru>.
- [9] Novas Energy Services [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://novas-energy.ru>.
- [10] Pat. No 2014/018868 A2 WO. H05H 1/24, E21B 43/00. Plasma Source for Generating Nonlinear, Wide-band, Periodic, Directed Elastic Oscillations and a System and Method for Stimulating Wells, Deposits and Boreholes Using the Plasma Source / P.G. Ageev, A.A. Molchanov; Applicant Novas Energy Group Limited. Patented 30.01.2014.
- [11] I-Pulse. Oil-well production optimization [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ipulse-group.com/Oil_Well_Optimization.
- [12] Pat. No 10309206 B2 USA. E21B 28/00, E21B 43/26, E21B 36/04, E21B 43/00, E21B 43/24, E21B 17/00. Well Stimulation Tool Comprising an Articulated Link / M. Delchambre, L. Feriol, G. Onquiart; Assignee ENE29 S.AR.L. Patented Jun. 4, 2019.
- [13] Blue Spark [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bluesparkenergy.com>.
- [14] Pat. No 2016/0348475A1 USA. E21B 41/00, E21B 36/04. Method for Sealing an Opening of a Wellbore Equipment / T. Parker, S. Carroll; Applicant Blue Spark Energy Inc. Patented Dec. 1, 2016.
- [15] Pat. No 4345650 USA. E21B 43/25. Process and Apparatus for Electrohydraulic Recovery of Crude Oil / R.H. Wesley. Patented Aug. 24, 1982.
- [16] Pat. No 6227293 B1 USA. E21B 43/25, E21B 28/00. Process and Apparatus for Coupled Electromagnetic and Acoustic Stimulation of Crude Oil Reservoirs Using Pulsed Power Electrohydraulic and Electromagnetic Discharge / A.R. Huffman, R.H. Wesley; Assignee Conoco Inc. Patented May 8, 2001.
- [17] Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine. Immersion Electrodischarge Device "SKIF-100M". [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ipt.com.ua/dep43_e_4.html.
- [18] Жекул, В.Г. Электроразрядные погружные установки со стабилизированными рабочими параметрами / В.Г. Жекул, И.С. Швец, С.Г. Поклонов // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 2. – С. 89–91.
- [19] Жекул, В.Г. Исследования стабильности работы высоковольтных газонаполненных неуправляемых разрядников электроразрядных погружных установок / В.Г. Жекул, Ю.И. Мельхер, С.Г. Поклонов [и др.] // Вісник НТУ"ХП". Зб. наук. праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2014. – № 21 (1064). – С. 23–31.
- [20] Гребенников, И. Ю. Оценка достигнутого уровня и перспективы создания высоковольтных импульсных конденсаторов погружных электроразрядных комплексов / И.Ю. Гребенников, В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин [и др.] // Электротехника. – 2007. – № 8. – С. 48–51.
- [21] Хвошчан, О. В. Создание высоковольтных погружных систем для повышения дебита скважин / О.В. Хвошчан. – LAP Lambert Academic Publishing, 2018. – 224 с. – ISBN 978-6-139-82519-6.

Стаття надійшла до редакції 03.10.2019

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ ЗАГЛИБНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОБРОБКИ СВЕРДЛОВИН

ХВОЩАН О.В.

канд. техн. наук, старший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв, Україна, e-mail: khvoshchan@gmail.com;

ЖЕКУЛ В.Г.

канд. техн. наук, старший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв, Україна;

СМІРНОВ О.П.

канд. техн. наук, старший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв, Україна, e-mail: smirnovap1978@gmail.com

Мета роботи. Оцінка сучасного стану, особливостей конструкції і перспектив розвитку электророзрядних заглиблених пристроїв для обробки свердловин.

Методи дослідження. Аналіз принципу дії і конструктивного виконання электророзрядних заглиблених при-

строїв для обробки свердловин.

Отримані результати. Обґрунтовано необхідність використання багатоступневих схем перетворення енергії електророзрядних заглибних пристроїв для обробки свердловин з урахуванням особливостей електророзрядного впливу, критичних умов обробки привибійної зони свердловини, підвищених вимог надійності до всіх блоків заглибної частини комплексу і віддаленості об'єкта обробки від джерела електроживлення. Розглянуто особливості конструкції і характеристик електророзрядних заглибних пристроїв провідних світових компаній (Новас (Росія), Blue Spark (Канада), I-Pulse (Франція), Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України), які здійснюють їх виробництво і обробку нафтових свердловин. Встановлено, що всі діючі пристрої мають блочну структуру, причому безпосередньо в зону нафтового пласта на сполучному кабелі доставляють з'єднані блоки зарядного пристрою, ємнісного накопичувача енергії, високовольтного комутатора, електродної системи. Встановлено, що параметри електричного розряду в установках різних компаній змінюються в широких межах (розрядна напруга від 2,5 до 30 кВ, енергія в імпульсі від 1 до 2 кДж), комутація енергії в розрядному колі може бути як керованою, так і некерованою, а для перетворення електричної енергії в акустичну використовують як електричний вибух провідника, так і вільний іскровий розряд у рідині свердловини або спеціально приготованому водному розчині з заданими в залежності від умов в свердловині електричними характеристиками. Визначено перспективи розвитку електророзрядного обладнання і технології для підвищення припливу нафти в свердловини. Виділено комерційно-економічний, науково-технологічний і технічний аспекти перспектив розвитку цього напрямку в Україні.

Наукова новизна. Обґрунтовано необхідність використання багатоступневих схем перетворення енергії при проектуванні електророзрядних заглибних пристроїв для обробки свердловин. Визначено комерційно-економічний, науково-технологічний і технічний аспекти перспектив розвитку обладнання та технології для підвищення припливу нафти в свердловини.

Практична цінність. Аналіз технічних розробок провідних світових компаній в області підвищення припливу нафти в свердловини з використанням високовольтного електричного розряду дозволив визначити подальші шляхи вдосконалення вітчизняної технології та обладнання, що дозволить зробити істотний внесок в енергонезалежність України.

Ключові слова: високовольтний електричний розряд; електророзрядні заглибні пристрої; нафтова свердловина; дебіт; багатоступеневе перетворення енергії.

CURRENT STATE AND PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT OF DESIGN OF ELECTRIC DISCHARGE SUBMERSIBLE DEVICES FOR TREATMENT OF WELLS

KHVOSHCHAN O.V. Ph.D. in technical sciences, senior researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: khvoshchan@gmail.com;

ZHEKUL V.G. Ph.D in technical sciences, senior researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolayiv, Ukraine;

SMIRNOV A.P. Ph.D in technical sciences, senior researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: smirnovap1978@gmail.com

Purpose. Assessment of the current state, design features and development prospects of electric-discharge submersible devices for well treatment.

Methodology. Analysis of the principle of operation and design of electric-discharge submersible devices for well treatment.

Findings. The necessity of using the multi-stage energy conversion schemes for the electric-discharge submersible devices for well treatment is justified, taking into account the features of electric-discharge effects, critical conditions for processing the bottom-hole zone of the well, increased reliability requirements for all units of the submersible part of the complex and the remoteness of the processing object from the power source. The design features and characteristics of the electric-discharge submersible devices of leading world companies (Novas (Russia), Blue Spark (Canada), I-Pulse (France), the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine engaged in its production and processing of oil wells are considered. It has been established that all operating devices have a block structure, herewith the connected blocks of a charge system, a capacitive energy storage device, a high-voltage switch, and an electrode system are delivered directly to the zone of the oil reservoir on the connecting cable. It was found that the parameters of the electric discharge in the installations of different companies vary within wide limits (discharge voltage from 2.5 to 30 kV, pulse energy from 1 to 2 kJ), energy switching in the discharge circuit can be either controlled or uncontrolled, and to convert electric energy into acoustic energy, an electric explosion of a conductor is used, as well as a free spark discharge in a borehole fluid or a specially prepared aqueous solution with electrical characteristics specified depending on the conditions in the borehole. The prospects for the development of electric discharge equipment and technology to increase the inflow of oil into the wells are determined. The

commercial-economic, scientific-technological and technical aspects of the prospects for the development of this trend in Ukraine are highlighted.

Originality. The necessity of using the multi-stage energy conversion schemes for the design of the electric-discharge submersible devices for well treatment is justified. The commercial-economic, scientific-technological and technical aspects of the prospects for the development of equipment and technology to increase the inflow of oil into the wells are determined.

Practical value. The analysis of the technical developments of leading world companies in the field of increasing oil inflow into wells using a high-voltage electric discharge made it possible to identify further ways to improve domestic technology and equipment, which will make a significant contribution to Ukraine's energy independence.

Keywords: high voltage electrical discharge; electro-discharge submersible devices; oil well; inflow rate; multistage energy conversion

REFERENCES

- [1] Kryzhanivskiy Ye. I., Yeher D. O. (2019) On the Scientific Support of Hydrocarbon Raw Materials Extraction. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, No 6, pp. 48–56.
- [2] Zhekul V. H., Lytvynov V. V., Melkher Yu. I., Smirnov O. P., Taftai E. I., Khvoshchan O. V. and Shvets I. S. (2017) Submersible Electric Discharge Devices for the Intensification of Mining Operations. *Oil and gas power engineering*, No 1, pp. 23–31.
- [3] Gulyy G. A. (1990) Scientific foundations of discharge-pulse technologies. Kyiv, Naukova dumka, 208 p.
- [4] MacLeod N. A. (1965) Casing Descaling Method and Apparatus. Pat. USA No 3180418.
- [5] Scott H. W. (1978) Extraction Method and Apparatus. Pat. USA. No 4074758.
- [6] Malyushevskiy P. P., Malyushevskaya A. P. (2014) To the question of the mechanism of electric-discharge intensification of fluid inflow into wells. *Elektronnaya obrabotka materialov*, Vol. 50, Iss. 6, pp. 66–73.
- [7] Ryadov V. P., Agishev A. P., Mukha A. G., Goroventko G. G. (1976) Study of technological processes in gas production based on electrohydraulic effect. Abstracts of the I All-Union Scientific and Technical Conference (September 1976). Part 2. Elektricheskiy razryad v zhidkosti i yego primeneniye v tekhnologii mashinostroyeniya i metalloobrabotke, p. 32.
- [8] ZEVS-tehnologii-R [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.zevs-r.ru>.
- [9] Novas Energy Services [Electronic resource]. – Access mode: <http://novas-energy.ru>.
- [10] Ageev P. G., Molchanov A. A. (2014) Plasma Source for Generating Nonlinear, Wide-band, Periodic, Directed Elastic Oscillations and a System and Method for Stimulating Wells, Deposits and Boreholes Using the Plasma Source. Pat. WO No 2014/018868 A2.
- [11] I-Pulse. Oil-well production optimization [Electronic resource]. – Access mode: https://www.ipulse-group.com/Oil_Well_Optimization.
- [12] Delchambre M., Feriol L., Onquiert G. (2019) Well Stimulation Tool Comprising an Articulated Link. Pat. USA No 10309206 B2.
- [13] Blue Spark [Electronic resource]. – Access mode: <https://bluesparkenergy.com>.
- [14] Parker T., Carroll S. (2016) Method for Sealing an Opening of a Wellbore Equipment. Pat. USA No 2016/0348475A1.
- [15] Wesley R. H. (1982) Process and Apparatus for Electrohydraulic Recovery of Crude Oil. Pat. USA No 4345650.
- [16] Huffman A. R., Wesley R. H. (2001) Process and Apparatus for Coupled Electromagnetic and Acoustic Stimulation of Crude Oil Reservoirs Using Pulsed Power Electrohydraulic and Electromagnetic Discharge. Pat. USA No 6227293 B1.
- [17] Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine. Immersion Electrodischarge Device "SKIF-100M" [Electronic resource]. – Access mode: http://www.iipt.com.ua/dep43_e_4.html.
- [18] Zhekul V. G., Shvets I. S., Poklonov S. G. (2006) Discharge submersibles installations with stabilization of operating parameters. *Oil Industry*, No 2, pp. 89–91.
- [19] Zhekul V. G., Melkher Yu. I., Poklonov S. G., Smirnov A. P., Shvets I. S. (2014) Research of the stability of high-voltage gas-filled uncontrolled dischargers of electric-discharge submersible devices. *Visnyk NTU KhPI. Tekhnika ta elektrofizyka vysokoykh napruh*, No 21, pp. 23–31.
- [20] Grebennikov I. Ju, Gunko V. I., Dmitrishin A. Ja., Onischenko L. I., Shvets I. S. (2007) Assessment of the achieved level and prospects for the creation of high-voltage impulse capacitors for downhole electric discharge complexes. *Electrical engineering*, No. 8, pp. 48–51.
- [21] Khvoshchan O. V. (2018) Creation of high-voltage submersible systems to increase well production. LAP Lambert Academic Publishing, 224 p.