

О.В. Хвощан, Ю.И. Курашко, В.В. Литвинов

### К ВОПРОСУ УМЕНЬШЕНИЯ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ КОМПЛЕКСОВ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, [iipt@iipt.com.ua](mailto:iipt@iipt.com.ua)*

#### Введение

Электрогидроимпульсные технологии достаточно широко используются в различных отраслях промышленности как Украины, так и других стран ближнего и дальнего зарубежья благодаря гибкости регулирования энергосиловых характеристик, концентрированному мощному воздействию на объект обработки, экологичности и достаточно высокой эффективности [1]. Одно из направлений, интенсивно развивающихся в последние годы вследствие острого дефицита энергоресурсов, – применение электрогидравлического эффекта для интенсификации притока нефти, газа, воды в скважины. Особенностью разработанных и действующих в настоящее время электроразрядных установок, базирующихся на использовании этого эффекта, является необходимость применения многоступенчатого преобразования энергии, что обусловлено, с одной стороны, удаленным расположением объекта обработки (призабойной зоны пласта) от источника питания, с другой – крайне ограниченным рабочим пространством скважины. Такие установки представляют собой электротехнический комплекс, состоящий из наземной части (источника питания), погружной части, располагающейся в зоне обработки при проведении ремонтных работ, и соединяющего их кабеля [2–5].

#### Обоснование и постановка задачи

Анализ литературных источников, патентных исследований, представленной на web-ресурсах информации показал наличие ряда разработок, касающихся создания электроразрядного погружного оборудования. Так, в нефтедобывающей отрасли широко используются разработки Института импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины (устройства «Скиф-100») [3] и Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова (г. Санкт-Петербург, Россия), передавшего права на изготовление и распространение электрогидроимпульсных установок «Приток-1М» компании NOVAS Energy Services (г. Москва, Россия) [4]. Следует также отметить некоторые сведения о присутствии на рынке нефтедобычи объединения БИНАР и общества с ограниченной ответственностью «Геокарт» (г. Саров, Россия), предлагающих скважинный электрогидравлический источник ЭГИС-5 для интенсификации добычи нефти и газа и ведения детальной сейсморазведки [5]. Сравнительные характеристики выпускающихся в настоящее время электроразрядных установок для увеличения притока нефти в скважины приведены в табл. 1 (блок-схема дана на рис. 1).

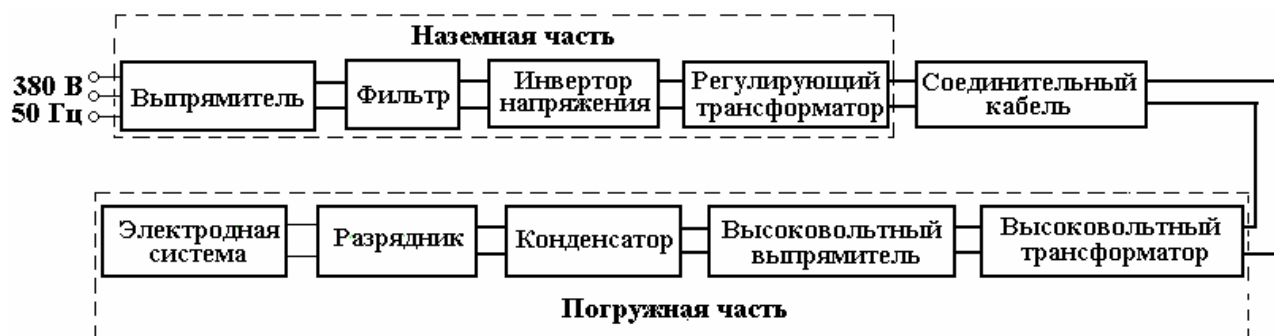


Рис. 1. Блок-схема погружной электроразрядной установки

Основным недостатком существующего в настоящее время оборудования являются высокие массогабаритные показатели погружной части комплекса (в частности, в устройстве «Скиф-100» длина составляет 6–7 м при весе порядка 170–180 кг) при низких удельных энергетических характеристиках.

**Цель** настоящей работы – разработка электроразрядного высоковольтного скважинного комплекса с уменьшенными массогабаритными показателями и улучшенными эксплуатационными свойствами.

Таблица 1. Сравнительные характеристики электроразрядных установок

Характеристики установки	“Приток-1М”	“Скиф-100”	ЭГИС-5
Питание	Сеть переменного тока, напряжение 220 В, частота 50 Гц		
Потребляемая мощность, кВт/ч (не более)	1,0	2,0	Нет сведений
Запасаемая энергия, кДж	1,0	1,0	От 1,0 до 5,0
Зарядное напряжение, кВ	от 2,5 до 3	30	35
Частота напряжения, передаваемого по кабелю, Гц	400	1000	Нет сведений
Частота разрядных импульсов, имп/мин	2	12	От 6 до 10
Габаритные размеры погружной части, мм:			
– диаметр,	102	102	102
– длина в сборе	2740	6000	От 2700 до 7500
Рабочая температура, К (не более)	358	373	373
Гидростатическое давление, МПа (не более)	30	50	50

### Методика и результаты исследований

Электроразрядный погружной комплекс состоит из трех основных частей: наземной (источника питания); погружной, опускаемой непосредственно в зону обработки; грузонесущего геофизического кабеля, соединяющего наземную часть комплекса с погружной. Специфика создаваемого устройства состоит в необходимости размещения погружаемого в скважину оборудования в крайне ограниченном объеме, определяемом диаметром скважины. Так, диаметр цилиндрического корпуса погружной части комплекса составляет величину порядка 0,1 м, что требует тщательного подхода к выбору конструкции, проектированию и расчету высоковольтных блоков установки.

С учетом низкого (1 кВ) значения рабочего напряжения геофизического кабеля целесообразно использовать зарядную схему с многоступенчатым преобразованием энергии при передаче по кабелю в погружную часть напряжения повышенной частоты, сочетающую высокую эффективность передачи энергии в емкостный накопитель при удовлетворительных габаритных размерах погружной части комплекса [6].

Принципиальная схема наземной части комплекса (силовой части источника питания) представлена на рис. 2. Источник работает от сети промышленного напряжения (380 В, 50 Гц). Выпрямитель, выполненный на диодах VD1-VD6, преобразует сетевое напряжение в постоянное 510 В, а инвертор напряжения на транзисторах VT1-VT4 формирует ток и напряжение повышенной частоты. Выходной трансформатор TV1 регулирует величину напряжения, передаваемого в погружную часть комплекса через соединительный трехжильный геофизический кабель длиной до 5 км.

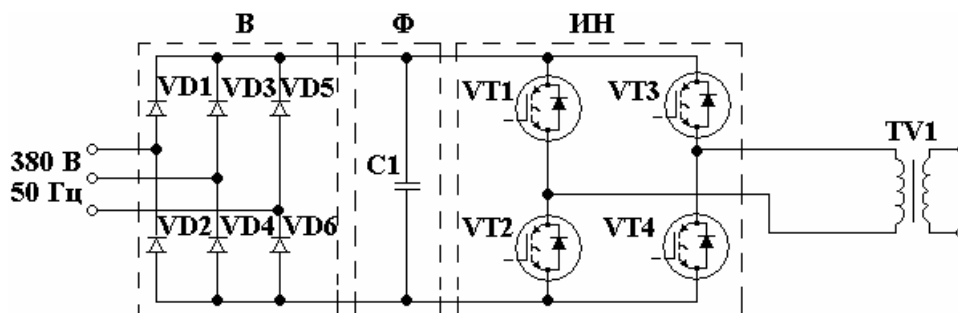


Рис. 2. Принципиальная схема силовой части источника питания комплекса

Погружная часть зарядного контура – зарядный блок – содержит высоковольтный трансформатор и выпрямитель, выполненный по несимметричной схеме удвоения (рис. 3).

Проведенные исследования [7, 8] позволили определить оптимальные схему и параметры зарядной цепи погружного электроразрядного устройства. Определение оптимальных параметров производилось с использованием программы расчета переходных процессов PSpice (погрешность 0,1 %). Соединительной линией был выбран достаточно часто встречающийся в эксплуатации геофизический кабель КГЗ-60-90 ГОСТ 6020-82 [9] с параметрами:  $R_{ж}=28,5$  Ом/км,  $L_0=3,1 \cdot 10^{-3}$  Ф/км,  $C_0=0,102 \cdot 10^{-6}$  Ф/км. Кабель представлен в виде цепной схемы замещения, состоящей из десяти Т-образных звеньев (погрешность представления не превышает 0,1%).

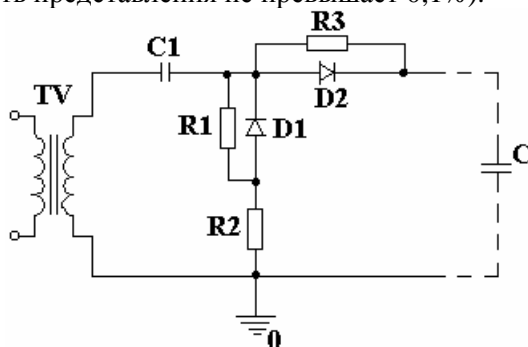


Рис. 3. Принципиальная схема зарядного блока

Согласно [7] наивысшие значения КПД передачи энергии в накопитель достигаются при применении в качестве выпрямителя диодного моста, однако необходимость снижения коэффициента трансформации высоковольтного трансформатора погружной части устройств для уменьшения его габаритов приводит к желательному использованию схем удвоения напряжения, что на 10–50% снижает эффективность передачи в зависимости от частоты передачи энергии.

Для выбранной схемы теоретически были рассчитаны режимы в зарядной цепи (содержащей линию с распределенными параметрами), оптимизированные по передаваемой мощности и промежуточной частоте преобразования энергии [8]. Были найдены основные параметры элементов, определяющие оптимальный режим работы зарядного устройства высоковольтной погружной установки и позволяющие уменьшить массогабаритные показатели погружной части комплекса:

- промежуточная частота передаваемого напряжения (рис. 4), при которой отношение пиковой мощности, потребляемой комплексом, к средней мощности минимально – 3 кГц (увеличение частоты в 3 раза сравнительно с аналогом – устройством «Скиф-100» – наряду с применением современных сердечников из нанокристаллического железа в качестве магнитопровода высоковольтного трансформатора позволило уменьшить его габариты более чем в 3 раза);
- коэффициент трансформации высоковольтного трансформатора – 36;
- емкость схемы удвоения – конденсатор КВИ-3 (470 пФ, 20 кВ);
- выходное напряжение регулирующего трансформатора – (350–750) В.

Рассчитанные параметры зарядной цепи погружного скважинного устройства позволяют производить заряд накопительной емкости  $2,4 \cdot 10^{-6}$  Ф до напряжения  $3 \cdot 10^4$  В за 5 с (запасаемая накопителем энергия – 1 кДж, мощность заряда – 200 Вт).

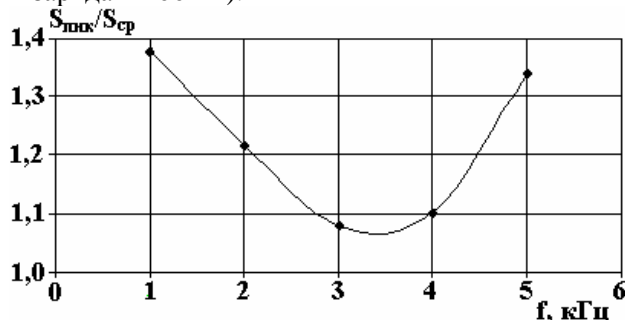


Рис. 4. Зависимость отношения пиковой мощности, потребляемой комплексом, к средней мощности от промежуточной частоты

Важным вопросом является определение температурного режима работы погружной части комплекса в целом и зарядного блока в частности. Теоретический анализ тепловых режимов работы

зарядного блока проводился с помощью программы для расчета различного рода физических полей Femlab 3.1, позволяющей, в частности, моделировать переходные характеристики и стационарную тепловую картину одно-, дву- и трехмерных конфигураций методом конечных элементов с достаточно высокой точностью.

Температурные поля были рассчитаны отдельно для каждого элемента зарядного блока: трансформатора и выпрямителя [10, 11]. Предварительно рассчитывались потери в элементах зарядного блока и выбиралась их конструкция (составлялись трехмерные модели). Наименьшей рабочей температурой обладает материал магнитопровода трансформатора ( $120^{\circ}\text{C}$ ). На рис. 5 изображено температурное поле трансформатора, откуда следует, что перегрев магнитопровода по отношению к температуре внешней среды при работе комплекса не превышает  $10^{\circ}\text{C}$ .

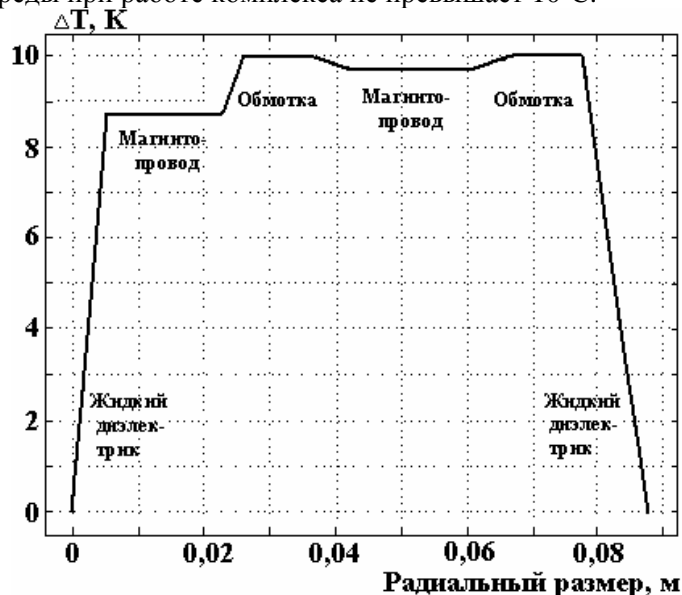


Рис. 5. Температурное поле высоковольтного трансформатора

Было проведено экспериментальное измерение температуры в макете зарядного блока термодатчиками, размещенными на поверхности его элементов. На основании проведенных исследований был сделан вывод о возможности определения температурных полей в погружных установках с использованием программы Femlab при учете лишь механизма теплопроводности в блоках с малым объемом теплоизолирующей жидкости (трансформаторного масла, полиметилсилоксановой жидкости). При малых размерах тепловыделяющих элементов и значительном объеме теплоизолирующей жидкости следует учитывать конвективный теплообмен. С учетом сложных температурных условий функционирования погружной части зарядной цепи была выбрана элементная база зарядного блока с рабочей температурой от  $393\text{ K}$  и выше. При этом погружная часть комплекса стабильно функционирует при температуре окружающей среды до  $373\text{ K}$ .

Выполненные расчеты легли в основу создания нового малогабаритного электроразрядного погружного комплекса «Скиф-100М». Источник питания (наземная часть) комплекса и блоки его погружной части, размещенные в цилиндрическом стальном корпусе диаметром  $0,102\text{ м}$ , изображены на рис. 6.

В табл. 2 представлены габаритные размеры отдельных модулей и удельная энергия (отношение запасаемой энергии к объему погружной части) разработанного электроразрядного погружного комплекса «Скиф-100М» и устройства «Скиф-100».



Рис. 6. Источник питания (наземная часть) и блоки погружной части электроразрядного погружного комплекса «Скиф-100М»

Таблица 2

Модуль	«Скиф-100»			«Скиф-100М»		
	Количество, шт.	Длина, м	Удельная энергия, Дж/м <sup>3</sup>	Количество, шт.	Длина, м	Удельная энергия, Дж/м <sup>3</sup>
Зарядный блок	1	1,25		1	0,65	
Конденсатор	3	1,15		1	1,65	
Разрядник	1	0,7		1	0,7	
Электродная система	1	0,35		1	0,35	
Муфта	4	0,06		2	0,06	
Всего		6,0	2·10 <sup>4</sup>		3,5	3,43·10 <sup>4</sup>

Разработанный и испытанный в лабораторных условиях зарядный блок имеет практически в 2 раза меньшие массогабаритные показатели сравнительно с предыдущей разработкой (устройством «Скиф-100»).

Комплекс содержит цилиндрический конденсатор с пленочным диэлектриком [12], неуправляемый разрядник, электродную систему «острие-плоскость» открытого либо закрытого типа [13].

Механическое и электрическое соединение грузонесущего кабеля и погружной части установки осуществляется посредством соединительной головки, а конденсатора с зарядным блоком и разрядником – при помощи муфт.

Таким образом, в результате проведенных исследований был разработан новый электроразрядный погружной комплекс с уменьшенной в 1,7 раза длиной погружной части сравнительно с аналогом предыдущего поколения и массой ~ 90 кг, что позволило повысить удельные энергетические характеристики комплекса и соответственно улучшить его эксплуатационные свойства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий / Г.А. Гулый. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
2. Пат. 4345650 США, МКИ Е 21 В 43/25. Способ и устройство для электрогидравлической добычи нефти / Ричард Уэсли (США). - №139438; заявл. 11.04.80; опубл. 24.08.82.
3. А.с. 1694874 СССР, МКИ<sup>3</sup> Е 21 В 43/25. Устройство для воздействия на призабойную зону скважины / С.И. Заславский, Ю.И. Курашко, А.Н. Руденко (СССР). № 4721989; заявлено 20.07.89; опубл. 30.11.91. Бюл. № 44. 3 с.
4. Сайт компании НОВАС [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://novas-energy.ru>.
5. Сайт компании БИНАР [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.binar.ru>.
6. Пат. №33365 Украина, МПК (2006) Е 21 В 43/25, Н 03 К 3/53 (2008.01). Генератор імпульсних струмів заглибного свердловинного пристрою / Ю. Курашко, О. Хвоцан, В. Литвинов (Україна) № u 2007 14484; заявлено 21.12.2007; опубл. 25.06.2008. Бюл. №12. 3 с.
7. Курашко Ю.И. Анализ схем зарядных цепей генераторов импульсных токов установок погружного типа / Ю.И. Курашко, О.В. Хвоцан, И.С. Швец // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Тематичний випуск “Електроенергетика і перетворююча техніка”. 2006. №17. С. 127–137.
8. Щерба А.А. Оптимизация режимов в зарядных цепях высоковольтных электроразрядных погружных систем для электроимпульсной обработки нефтяных скважин / А.А. Щерба, О.В. Хвоцан, Ю.И. Курашко, И.С. Швец, Н.Н. Климанский // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. 2006. Ч. 5. С. 98–101.
9. ГОСТ 6020-82. Кабели грузонесущие геофизические. М.: Изд-во стандартов, 1985. 5 с.
10. Хвоцан О.В. Особенности анализа температурного режима работы погружных скважинных устройств / О.В. Хвоцан, Ю.И. Курашко, В.В. Литвинов // Материалы XIII Международной научной школы-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». Николаев, 2007. С. 148–149.
11. Хвоцан О.В. Оптимизация габаритных размеров высоковольтного трансформатора погружных электроразрядных устройств повышенной мощности / О.В. Хвоцан, Ю.И. Курашко, В.В. Литвинов,

Ю.И. Мельхер // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Тематичний випуск “Техніка і електрофізика високих напруг”. 2007. № 34. С. 112–118.

12. Гребенников И.Ю. О повышении удельных энергетических характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов / И.Ю. Гребенников, В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, И.С. Швец // Электронная обработка материалов. Кишинев: Штиинца, 2004. № 5. С. 70–73.

13. Жекул В.Г. Электроразрядные погружные установки со стабилизированными рабочими параметрами / В.Г. Жекул, С.Г. Поклонов, И.С. Швец // Нефтяное хозяйство. 2006. № 2. С. 89–91.

*Поступила 07.04.09*

### **Summary**

A new electro-bit submersible complex for treatment of oil-wells with diminished in 1,7 times sizes comparative with an operating industrial prototype («Skif-100») is developed.

---