

ГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ИМПЛОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА ВЕРТИКАЛЬНЫХ, НАКЛОННЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

HYDROIMPULSIVE IMPLOSION PROCESSING OF BOTTOMHOLE FORMATION ZONE OF VERTICAL, INCLINED AND HORIZONTAL WELLS

Ю.А. Бурьян, заведующий кафедрой «Основы теории механики и автоматического управления», профессор, д. т. н., Омский государственный технический университет;

В.Н. Сорокин, профессор кафедры «Основы теории механики и автоматического управления», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Волновая механика», доцент, д. т. н., Омский государственный технический университет

U. Burian, Head of "Mechanics and Automatic Control Fundamentals" Chair, Doctor of Technical Sciences, Professor;

V. Sorokin, Professor of "Mechanics and Automatic Control Fundamentals" Chair, Chief of "Wave Mechanics" Research Laboratory, Doctor of Technical Sciences, Omsk State Technical University

В настоящее время многие месторождения находятся на поздней стадии разработки, в связи с чем возникает проблема выработки остаточных извлекаемых запасов. Низкая продуктивность скважин обусловлена многими факторами, в том числе низкими коллекторскими свойствами пласта и ухудшением фильтрационных характеристик призабойной зоны пласта (ПЗП) в процессе освоения, эксплуатации и засорением щелевых фильтров в горизонтальных стволах. Метод и оборудование, описанные в данной работе, позволяют увеличить коэффициент продуктивности скважины и ускорить выработку запасов. Его применение возможно там, где другие методы, такие как гидроразрыв пласта (ГРП) с закреплением пропантом, кислотная обработка призабойной зоны (ОПЗ) не эффективны или рискованны.

Обработка призабойной зоны пласта осуществляется при помощи имплозионного устройства. Оно воздействует на пласт путем создания импульсов высокого давления в зоне перфорации с целью повышения нефтеотдачи и приемистости скважин [1, 2].

Суть метода заключается в улучшении фильтрационной характеристики призабойной зоны пласта за счет использования энергии гидравлического удара, который приводит к образованию серии трещин для вертикальных и наклонных скважин и очистке фильтров в горизонтальных стволах.

На рисунке 1 схематично изображено имплозионное устройство многоазового действия, применяемое в настоящее время для вертикальных скважин. К цилиндру 2 при помощи переходной втулки крепится патрубок входных окон 6. Другим концом патрубок крепится к колонне НКТ 5. На штанге 3 установлен плунжер 1, который может производить возвратно-поступательные движения в вертикальном

Today there are lots of mature oilfields. That's why the task of remaining reserves recovery is of great importance. Low productivity of wells can be associated with a number of factors, including low reservoir permeability and the degradation of filtration characteristics of bottomhole formation zone (BFZ) during development, operation and blinding of slotted screens in horizontal wells. The technique and equipment described in the present paper allow to increase the productivity index of wells and facilitate the reserves recovery. The described technique can be implemented in those areas where hydraulic fracturing or bottomhole acid treatments proved to be ineffective or unsafe.

BFZ treatment is performed using the implosion device. The device affects the formation by means of high pressure pulses creation within the perforation zone. This can increase the recovery factor and intake capacity of wells [1, 2].

The technique involves improving the BFZ filtration characteristics due to the use of hydraulic impact energy. Such an impact forms a network of fractures in vertical and deviated wells, as well as cleans the slotted screens installed in horizontal wells.

Figure 1 shows the scheme of repeated implosion device that is currently used in vertical wells. The fitting pipe 6 of entrance gate is connected to cylinder 2 with the help of adapter. Another end of pipe 6 is connected to the tubing string 5. Plunger 1 installed on stem 3 can perform vertical reciprocating motion within the cylinder. Ball valve 4 is installed in the cylinder's lower part.

Implosion device has the following operation concept. The implosion device mounted on tubing string is lowered down into the perforation interval. Plunger 1 goes up under the action of stems 3. While plunger goes up, the depression in the chamber of cylinder 2 is created. The depression is created due to the operation of back-pressure valve 4 which blocks the fluid inflow into the lower part of cylinder's chamber. The pressure above the plunger is equal to the well's

направлении в цилиндре. В нижней части цилиндра установлен шариковый клапан 4.

Имплозионное устройство работает следующим образом. На колонне НКТ имплозионное устройство опускается в интервал перфорации. Под действием штанг 3 плунжер 1 поднимается вверх. При движении плунжера вверх в камере цилиндра 2 создается разрежение. Это возможно благодаря работе обратного клапана 4, который перекрывает приток флюида к нижней части камеры цилиндра. Над плунжером давление равно гидростатическому давлению в скважине. Таким образом, перепад давлений над и под плунжером может достигать значения 15 МПа и более в зависимости от глубины скважины.

При дальнейшем движении плунжера вверх он выходит в расширенную часть переходной втулки, в этот момент на жидкость, находящуюся непосредственно над полостью цилиндра, действует данный перепад давления и она устремляется вниз. Перепад давления продолжает ее ускорять и в момент ее встречи с обратным клапаном она уже обладает высокой скоростью (до 100 м/с) и значительным импульсом. Пройдя имплозионную камеру, столб жидкости преодолевает усилие пружины шарикового клапана, и жидкость через выходные окна устройства устремляется в межтрубное пространство, которое сверху и снизу изолировано пакерами. Кинетическая энергия падающей жидкости переходит в энергию гидравлического удара. Давление в зоне обработки стремительно растет и достигает значения до 150 МПа за 0,05–0,01 с.

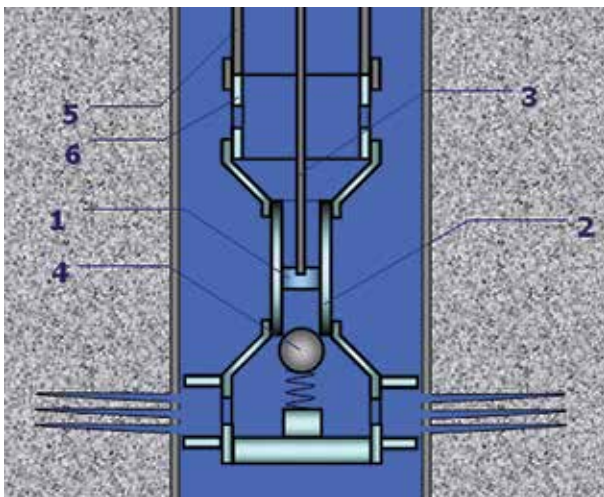


Рисунок 1 – Имплозионный генератор импульсов давления: 1 – плунжер, 2 – цилиндр, 3 – штанга, 4 – обратный клапан, 5 – колонна НКТ, 6 – входные окна
Figure 1 – Implosion pressure pulse generator: 1 – plunger, 2 – cylinder, 3 – stem, 4 – back-pressure (ball) valve, 5 – tubing string, 6 – entrance gates

Пластовая жидкость, инициируемая этим давлением, действует на породу пласта. При этом начинают раскрываться существующие, но закрытые трещины, которые берут свое начало

hydrostatic pressure. That's why the pressure differential below and above the plunger can be as high as 15 Mpa (2,175 psi) depending on the well depth.

During further upwards movement of the plunger, it enters the opening of the adapter. In this very moment, the fluid below the cylinder's chamber is affected by the mentioned pressure differential, which causes it (fluid) to sweep down. The pressure differential continues to accelerate fluid. At the moment of its contact with the back-pressure valve, the velocity of fluid can be up to 100 m/sec (328 ft/sec). When the implosion chamber is passed, the fluid column overcomes the spring force of the ball valve. This causes the fluid to flow through exit gates into the annulus that is fully isolated by packers. The kinetic energy of the fluid column transforms into the hydraulic impact energy. The pressure within the treated zone rapidly increases and reaches the value of 150 Mpa (21,755 psi) within 0.01–0.05 seconds.

Such pressure causes the formation fluid to act on the formation rock. The existing but closed fractures that origin from the casing annulus (where rock density is lower due to elusion) start to open. Pressure pulse transmitted through formation fluid propagates at a high rate of speed and acts on the walls of opening fractures like a wedge. In our opinion, the fracture won't be oriented only in vertical or horizontal plane, but will have a tree-like structure. This opinion is based on the fact that fractures propagate along the lines of least resistance, while reservoir thickness varies from a couple to dozens of meters and rock pressure differential is negligible in comparison to the pressure pulse magnitude. Consequently, a single pressure pulse creates an extensive network of fractures in the formation, which provides for fluids motion.

The leading edge of pressure pulse created by the generator is very steep and the fluids acts on the fracture walls like a rogod stamp moving at high speed. As the result of this action, the repack of formation matrix grains takes place and the fracture width is thus increased.

The energy of pressure pulse created by the implosion device is consumed by the fracture, which results in the repack of formation matrix grains and fracture opening. With distance from the well increasing, the amplitude of pressure pulse decreases gradually and its leading edge becomes less steep. The fluid loses its ability to repack formation matrix grains but conserves the ability to open fractures since the fluid pressure still exceeds the minimum fracture opening pressure. When the fluid pressure becomes equal to rock pressure, the process of fractures opening stops.

In the fracture area where the repack of formation matrix grains take place due to the pressure pulse impact, the fracture healing remains incomplete. Micropores, the size of which is comparable to the size of proppant grains, remain in the formation rock. The presence of such pores increases the reservoir drainability [7].

In the framework of field tests of implosion device at Samotlorskoe oilfield (SNGDU-2) a total of four (4) treatments were performed (three (3) of them were performed in December, 2007 and one – in February

от затрубного пространства обсадной колонны, где плотность породы вследствие вымывания меньше, чем в основном массиве. Импульс давления, передаваемый через пластовую жидкость, распространяется с большой скоростью и действует на стенки раскрывающейся трещины как клин. При этом, распространяясь в направлении наименьшего сопротивления, трещина, на наш взгляд, не будет ориентирована только в вертикальной или в горизонтальной плоскости, а будет похожа на крону дерева. Это происходит еще и потому, что мощность продуктивных пластов колеблется от нескольких метров до нескольких десятков метров и перепад горного давления в верхней части относительно нижней незначителен по сравнению с величиной импульса давления, создаваемого генератором. Таким образом, одиночный импульс давления создает в массиве продуктивного пласта разветвленную сеть трещин, обеспечивающих движение флюидов.

Передний фронт импульса давления, создаваемого генератором, очень крутой, и жидкость действует на стенки трещины как жесткий штамп, движущийся с большой скоростью. В результате такого воздействия происходит переупаковка зерен скелета породы пласта, увеличивающая ширину трещины.

Энергия импульса давления, создаваемого имплозионным устройством, расходуется на раскрытие трещины и переупаковку зерен скелета породы пласта. По мере увеличения расстояния от скважины амплитуда импульса давления постепенно падает, а передний фронт становится менее крутым. Жидкость теряет свою способность к переупаковке зерен скелета породы, однако ее давление превышает горное давление, необходимое для раскрытия трещины, и раскрытие трещины еще некоторое время продолжается. Когда давление жидкости становится равным горному давлению, процесс раскрытия трещины останавливается.

В той области трещины, где под действием импульса давления жидкости происходит переупаковка зерен скелета породы пласта, происходит не полное смыкание стенок трещины, а остаются соединенные между собой мельчайшие полости, соизмеримые с порами между зернами пропанта. Наличие таких полостей увеличивает дренируемость породы коллектора [7].

В рамках исследования эффективности локального гидроразрыва пласта (ЛГРП) методом имплозионного воздействия на ПЗП, например, на Самотлорском месторождении в СНГДУ-2, были проведены 4 обработки (3 из них в декабре 2007 года и одна в феврале 2008 года) [7]. Обработки проводились на низкодебитных скважинах: с дебитом по жидкости $Q_{ж}$, не превышающим $16 \text{ м}^3/\text{сут.}$, дебит по нефти $Q_{н}$ не превышал 8 т/сут. Ниже в табл. 1 приведены результаты обработок.

Из таблицы 1 следует, что средний прирост дебита по нефти 4 т/сут.

Подъем плунжера имплозионного генератора в вертикальных скважинах осуществляется

2008) [7]. The study of local hydraulic fracturing (by means of BFZ implosion treatment) effectiveness was studied. The treatments were performed in marginal wells. Their water production Q_f was less than $16 \text{ м}^3/\text{day}$, while the oil production Q_{oil} was less than 8 tons/day . Table 1 shows the results of these treatment.

Table 1 shows the average growth of oil production by 4 tons/day .

The raising of the implosion generator's plunger in vertical wells is performed using standard techniques. However, the method of implosion generators' plunger actuation with the use of stems or wireline has a number of drawbacks, the major of which is its limitations. Stem and wireline drives can be used in vertical wells and in wells with low inclination angle (less than 15°). But these drives are not applicable in deviated wells because of the significant friction between the stem (wireline cable) and the tubing string induced during plunger raising. The friction can cause the stem (wireline cable) blowout. In horizontal wells this method cannot be used at all. One of the solutions is the use of self-oscillating hydraulic drive.

The advantage of this approach is the fact that self-induced oscillations occur in the absence of external periodic action. In order for the self-induced oscillations to develop there is a need in an energy source and a mechanism thanks to which the energy of this source will transform into oscillatory energy. Moreover, the system should be nonharmonic. So, the device doesn't require the surface control system. It just needs the supply of pressurized process fluid and a switch mounted near (or inside) the hydraulic cylinder that will autonomously distribute the fluid flows. Figure 2 shows the conceptual model of such device.

The process fluid pressure generated by the pump at the wellhead is transmitted via the tubing string into the hydraulic cylinder 4 with the help of the selector piston 5 and hollow rod 2. The upwards movement of piston 5 causes the movement of plunger 7 of implosion chamber. Ball valve 12 is closed at this moment. The depression in the implosion chamber increases.

After the plunger passes the zone where inlet windows 6 are situated, the well fluid enters the implosion chamber at high rate of speed and moves through it while generating the hydraulic impact on the perforation interval 11. When the selector piston 5 is actuated, the movement of stem 14 and plunger 7 is repeated.

In order to adjust the self-oscillating hydraulic drive, we developed and manufactured the testing facility shown in Figure 3.

In the "Wave Mechanics" Research Laboratory of Omsk State Technical University a series of implosion generators of various sizes with self-oscillating hydraulic drive was developed. They have the following specifications (Table 2):

The procedure for enhanced oil recover operations with the application of implosion device includes the following steps:

1. Install the implosion generator assembly and lower it down into the well with the help of the tubing string. The generator should be positioned 1.7 ft .

стандартными механизмами. Однако способ обеспечения движения плунжера имплозионного генератора с использованием штанг или стального каната имеет ряд недостатков, главным из которых является ограниченность его применения. Штанговый и канатный привод может использоваться в вертикальных скважинах и в скважинах, имеющих небольшой наклон (до 15°). Он неприменим в наклонных скважинах из-за значительных сил трения между колонной штанг (канатом) и НКТ, возникающих при подъеме плунжера, которые могут привести к их разрыву, а в горизонтальных скважинах подобный привод вообще применяться не может. Одним из способов решения этой проблемы является использование автоколебательного гидравлического привода для обеспечения движения плунжера имплозионного генератора.

Достоинством такого привода является то, что автоколебания возникают в системах при отсутствии внешнего периодического воздействия. Для возникновения автоколебаний в системе необходимо наличие источника энергии и механизма, благодаря которому энергия этого источника превращается в колебательную энергию. Система к тому же должна обладать нелинейностью. Таким образом, устройство не нуждается в системе управления с устья скважины, к нему необходимо подвести рабочую жидкость под давлением и в непосредственной близости от гидроцилиндра (или в нем самом) установить переключатель, который самостоятельно распределяет эти потоки. Принципиальная схема такого устройства показана на рис. 2.

Давление рабочей жидкости с устья скважины по насосно-компрессорным трубам (НКТ) подается в полости гидроцилиндра 4 через поршень-переключатель 5 по полому штоку 2. При движении поршня 5 из нижнего положения вместе с ним перемещается плунжер 7 имплозионной камеры. Клапан 12 при этом закрыт. В имплозионной камере создается разрежение.

После перемещения плунжера выше зоны окон 6 скважинная жидкость под действием давления с высокой скоростью поступает в имплозионную камеру и движется по ней, создавая гидроудар в зоне перфорации 11. При срабатывании переключателя в поршне 5 движение штока 14 и, соответственно, плунжера 13 периодически повторяется.

Для отладки автоколебательного гидравлического привода был спроектирован и изготовлен испытательный стенд, принципиальная схема которого приведена на рис. 3.

В НИЛ «Волновая механика» Омского государственного технического университета разработана «линейка» типоразмеров имплозионных генераторов с автоколебательным гидроприводом, имеющая следующие технические характеристики (табл. 2).

Таблица 1 – Режимы скважин до и после гидроимпульсной обработки пласта
Table 1 – Well behavior before and after the implosion treatment of formation

Скв. Well	Куст PAD	Режим до ОПЗ Before BFZ treatment			Режим после ОПЗ After BFZ treatment			Прирост $Q_{гп}$, т/сут growth $Q_{гп}$, t/day	Прирост $Q_{жп}$, м³/сут growth $Q_{жп}$, m³/day
		$Q_{гп}$, т/сут $Q_{гп}$, t/day	$Q_{жп}$, м³/сут $Q_{жп}$, m³/day	%	$Q_{гп}$, т/сут $Q_{гп}$, t/day	$Q_{жп}$, м³/сут $Q_{жп}$, m³/day	%		
33398	1766Б	1,7	3,3	38	3,0	5,5	44	1,3	2,2
13775	2172	7,7	16	43	13,1	23,5	34	5,4	7,5
37500	1740	4,5	5,9	10	9,0	11,8	10	4,5	5,9
10719	1009	0,0	0	0	5,0	6	1	5,0	6,0
Средние значения Average values		3,5	6,3	23	7,5	11,7	22,3	4,0	5,4

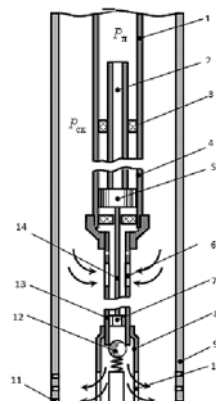


Рисунок 2 – Принципиальная схема имплозионного генератора с автоколебательным гидроприводом: $P_{п}$ – давление в НКТ, подающееся насосом с устья; $P_{ск}$ – скважинное давление; 1 – НКТ; 2 – полый шток; 3 – сальник; 4 – корпус гидроцилиндра; 5 – поршень-переключатель; 6 – окна для входа жидкости; 7 – плунжер; 8 – корпус имплозионного генератора; 9 – обсадная труба; 10 – окна для выхода жидкости; 11 – перфорация; 12 – клапан; 13 – имплозионная камера; 14 – шток

Figure 2 – The conceptual model of implosion generator with self-oscillating hydraulic drive: $P_{п}$ is pressure in the tubing string generated by the pump installed on the well-head; P_{w} is the borehole pressure; 1 – the tubing string; 2 – the hollow rod; 3 – the packing box; 4 – the hydraulic cylinder body; 5 – the selector piston; 6 – the fluid inlet windows; 7 – the plunger; 8 – the body of implosion generator; 9 – the casing string; 10 – the fluid outlet windows; 11 – perforation interval; 12 – the ball valve; 13 – the implosion chamber; 14 – the stem

higher than the upper perforation interval.

2. Install the X-mas tree and set up all connections.
3. Connect the pumping unit to the tubing string.
4. Increase the pressure in the tubing string (10 min of pumping is enough).

Таблица 2 – «Линейка» типоразмеров имплозионных генераторов с автоколебательным гидроприводом

Table 2 – The specifications of implosion generators with self-oscillating hydraulic drive

Параметры Parameters	ВИГ 89/8 IG 89/8		ВИГ 89/3,5 IG 89/3,5		ВИГ 73/8 IG 73/8		ВИГ 73/3,5 IG 73/3,5		ВИГ 60/8 IG 60/8		ВИГ 60/3,5 IG 60/3,5	
	Диаметр проходного сечения, мм Drift diameter, mm	89	89	73	73	60	60	89	89	73	73	60
Длина сборки, м Assembly length, m	8	3,5	8	3,5	8	3,5	8	3,5	8	3,5	8	3,5
Диаметр цилиндра гидропривода, мм Hydraulic drive's cylinder diameter, mm	57	57	57	57	45	45	57	57	45	45	57	57
Диаметр имплозионной камеры, мм Implosion chamber diameter, mm	45	45	45	45	32	32	45	45	32	32	45	45
Длина имплозионной камеры, м Implosion chamber length, m	9,5	8,5	3,5	1,5	3,5	1,5	9,5	8,5	3,5	1,5	3,5	1,5
Максимальное давление жидкости в НКТ, МПа Max. pressure of fluid in the tubing string, MPa	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Максимальная температура среды, С Max. ambient temperature, C	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Присоединительная резьба, мм Connecting thread, mm	73	73	73	73	60	60	73	73	60	60	73	73
Нагрузка на НКТ из-за подъема плунжера имплозионного устройства, не более Н Load on the tubing string induced by the implosion device plunger raising, not more than, N	3,5 · 10 ⁴	3,5 · 10 ⁴	3,5 · 10 ⁴	3,5 · 10 ⁴	2 · 10 ⁴	2 · 10 ⁴	3,5 · 10 ⁴	3,5 · 10 ⁴	2 · 10 ⁴	2 · 10 ⁴	3,5 · 10 ⁴	3,5 · 10 ⁴
Масса сборки, не более, кг Assembly weight, not more than, kg	90	40	85	40	54	30	90	40	85	40	54	30
Глубина скважины, км Well depth, km	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Проведение работ по повышению нефтеотдачи с применением данного устройства целесообразно проводить совместно с ПРС или КРС в следующей последовательности:

1. Установить и спустить на колонне НКТ сборку имплозионного генератора с гидроприводом до продуктивного пласта, установив его на расстоянии 0,5 м от верхнего уровня перфорации.
2. Установить на устье фонтанную арматуру и провести обвязку.
3. Соединить НКТ с насосным агрегатом.
4. Подать давление в НКТ в течение 10 мин.
5. Определить появление гидравлических ударов в скважине по резким падениям давления на устье или звуковому эффекту.
6. Опускать колонну НКТ на 1 м, повторяя пп. 4, 5 до прохождения всей толщи пласта.
7. Поднять колонну НКТ, отсоединить сборку имплозионного генератора.
8. Освоить и пустить скважину в эксплуатацию.
В качестве рабочей жидкости может использоваться вода, нефть или дизельное топливо.

Таким образом, проведенные в данной работе исследования показали, что предложенный принцип и конструктивное решение автоколебательного гидравлического привода для скважинных имплозионных устройств может с успехом использоваться в практике повышения нефтеотдачи для вертикальных, наклонных и горизонтальных скважин. ☉

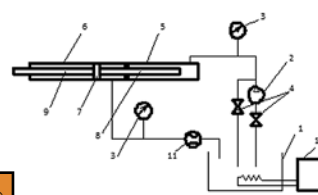


Рисунок 3 – Испытательный стенд: 1 – бак; 2 – гидронасос; 3 – манометры; 4 – задвижки; 5 – труба – имитатор НКТ; 6 – цилиндр; 7 – поршень с переключателем подачи воды в полости цилиндра; 8 – шток полый; 9 – шток; 10 – устройство нагрева и поддержания температуры воды; 11 – расходомер

6 – цилиндр; 7 – поршень с переключателем подачи воды в полости цилиндра; 8 – шток полый; 9 – шток; 10 – устройство нагрева и поддержания температуры воды; 11 – расходомер

Figure 3 – Testing facility: 1 – container; 2 – hydraulic pump; 3 – pressure gages; 4 – sliding valves; 5 – the tube that simulates the tubing string; 6 – cylinder; 7 – the selector piston; 8 – hollow rod; 9 – rod; 10 – the device that heats the water and maintains its temperature; 11 – flow meter

5. Identify the presence of hydraulic impacts in the well by sudden drops of wellhead pressure or by sound effects.
6. Lower down the tubing string (1 meter is ok) and repeat items 4 and 5 till the whole reservoir bulk is passed.
7. Pull the tubing string out of hole and disconnect the implosion generator assembly.
8. Bring the well into production.

Both water, oil and diesel can be used as process fluid.

The study presented in this paper shows that the suggested technique and the design concept of self-oscillating hydraulic drive for downhole implosion generators can be successfully used for enhanced oil recovery operations in vertical, deviated and horizontal wells. ☉

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А.А. Ударные воздействия на призабойную зону скважин. – М.: Недра, 1990. – 136 с.
2. Патент RU 2320866. – С. 2.
3. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. – М.: Наука, 1983. – Т.2. – 640 с.
4. Бурьян Ю.А., Сорокин В.Н., Капелюховский А.А., Бекшенев А.С. Виброударный автоколебательный генератор//Омский научный вестник № 3(70). – Омск, 2008. – С. 75–78.
5. Бакшта Т.М. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971. – 771 с.
6. Бурьян Ю.А., Сорокин В.Н. Повышение нефтеотдачи методом локального гидроразрыва пласта с использованием имплозионного генератора с автоколебательным гидроприводом. – М.: Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2010. – № 2. – С. 45–47.
7. Бурьян Ю.А., Сорокин В.Н., Лескин Ф.Ю. Локальный гидроразрыв пласта методом имплозионного воздействия. – М.: Нефть и газ. – 2009. – № 3(75). – С. 53–58.