

УДК 622.276.6

**А.Н. Дроздов**, д.т.н., профессор кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина; **А.В. Каракетов**, аспирант кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, e-mail: azariy1@yandex.ru

## Методика расчета установки ударного внутрискважинного вибросейсмического воздействия на пласт

**В условиях ускоренного роста доли трудноизвлекаемых запасов нефти возникает потребность в разработке инновационных методов увеличения нефтеотдачи, отвечающих современным требованиям по энергоэффективности. Волновые технологии выгодно отличаются от других третичных методов разработки, так как позволяют учитывать естественные тенденции углеводородных жидкостей к движению под действием градиентов гравитационных и капиллярных сил, а также использовать энергетический потенциал, содержащийся в горном массиве.**

**Ключевые слова:** волновые методы увеличения нефтеотдачи, вибросейсмическое воздействие, принцип кинетостатики.

В последние годы волновые методы увеличения нефтеотдачи (далее – МУН) пластов довольно популярны вследствие простоты реализации и относительно невысоких эксплуатационных затрат. В их основе лежат способы генерации и направленной передачи энергии от источника в пласт в виде распространяющегося волнового излучения. Среди волновых МУН особое место занимает технология вибросейсмического воздействия на залежь (далее – ВСВ), позволяющая обрабатывать не только околоскважинную зону пласта, но и его отдаленные области, при этом радиус охвата воздействием превышает тысячи метров [1, 2].

Достижение максимальной эффективности ВСВ возможно при внутрискважинном расположении источника в интервале продуктивного пласта при одновременной его эксплуатации, что позволяет обеспечить минимальные потери волновой энергии и активацию как процессов, обладающих эффектом последействия, так и процессов, для которых необходимо постоянное волновое излучение [3].

В стенах РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина была разработана установка ударного внутрискважинного вибросейсмического воздействия (далее – УВСВ), позволяющая осуществлять ВСВ на пласт при одновременной эксплуатации скважины погружной установкой электроцентробежного насоса (далее – УЭЦН) [4, 5].

При проектировании УВСВ приходится решать ряд различных междисциплинарных задач, среди которых можно выделить наиболее значимую, решению которой и посвящена настоящая статья, – **разработку методики расчета УВСВ**. Рассмотрим состав и принцип работы УВСВ (рис. 1) [5]. Погружной насос 2 откачивает на поверхность продукцию из пласта 15. В начальный момент времени плунжер 6 опирается на клапан 7, так что отверстие в плунжере является полностью перекрытым. Пакер 4 разобщает область скважины под плунжером от области над плунжером, вследствие чего при работе насоса 2 создается перепад давлений под и над клапаном 7. При достижении достаточной величины перепада давления подъемный узел,

представляющий собой соединения клапана 8 и плунжера 6, поднимается вверх, увлекая за собой ударник 11, соединенный с клапаном 7 посредством штока 8.

При достижении подъемным узлом крайнего верхнего положения ударник в сборе (ударник 11 – манжета 10 – шток 8 – клапан 7) упирается манжетой 10 в центратор-ограничитель 9 подъема. Через отверстия в центраторе-ограничителе 9 поток скважинной продукции продолжает движение, создавая давление на торцевую кольцевую поверхность плунжера 6, тем самым стремясь раскрыть подъемный узел. Под действием силы инерции, возникающей вследствие резкой остановки подъема ударника, а также забойного давления происходит раскрытие соединения «плунжер 6 – клапан 7» и падение ударника в сборе на наковальню 13. Плунжер 6 падает вниз вслед за ударником в сборе. Скважинная продукция при этом поступает в отверстие в плунжере 6 и продолжает движение вверх к приему насоса 2. После нанесения удара ударником 11 по наковальне 13 плунжер 6 падает на

клапан 7, при этом отверстие в плунжере полностью перекрывается, и система возвращается в исходное состояние. Таким образом, реализуется замкнутый цикл работы УВСВ.

Повторяющиеся циклы нанесения ударов ударником 11 позволяют генерировать в продуктивном пласте 15 низкочастотные упругие волны, благотворно влияющие на процессы нефтеизвлечения.

Методика расчета УВСВ базируется на решении трех подзадач:

1. Определение условий сцепления и подъема ударника в сборе и плунжера.
2. Расчет процесса падения ударника в сборе и плунжера в стесненных условиях в скважинной продукции.
3. Построение частотной характеристики УВСВ.

Рассмотрим решения для каждой из указанных подзадач.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ СЦЕПЛЕНИЯ И ПОДЪЕМА УДАРНИКА В СБОРЕ И ПЛУНЖЕРА

На рисунке 2 приведена схема сцепления клапана 1 и плунжера 2 в момент начала подъема ударника в сборе. Равнодействующие сил, расцепляющих и сцепляющих соединение клапана 1 и плунжера 2, определяются по следующим формулам:

$$F_{\text{расцеп}} = P_1 f_2 + F_1 + P_2 f_1, \quad (1)$$

$$F_{\text{сцеп}} = P_2 f_2 + F_2 + P_1 f_1 + F_{\text{тр}}. \quad (2)$$

Условие сцепления клапана и плунжера в фазе подъема определяется неравенством

$$F_{\text{сцеп}} > F_{\text{расцеп}} \quad \text{или} \quad (3)$$

$$P_2 f_2 + F_2 + P_1 f_1 + F_{\text{тр}} > P_1 f_2 + F_1 + P_2 f_1, \quad (4)$$

где  $F_{\text{сцеп}}$  – равнодействующая сил, сцепляющих соединение, Н;  $F_{\text{расцеп}}$  – равнодействующая сил, расцепляющих соединение, Н;  $P_1, P_2$  – абсолютные давления в областях под и над подъемным узлом, Па;  $F_1, F_2$  – веса ударника в сборе и плунжера в скважинной продукции, Н;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения в плунжерной паре, Н;  $f_1, f_2$  – площади сечения клапана и седла по периметру их контакта, м<sup>2</sup>.

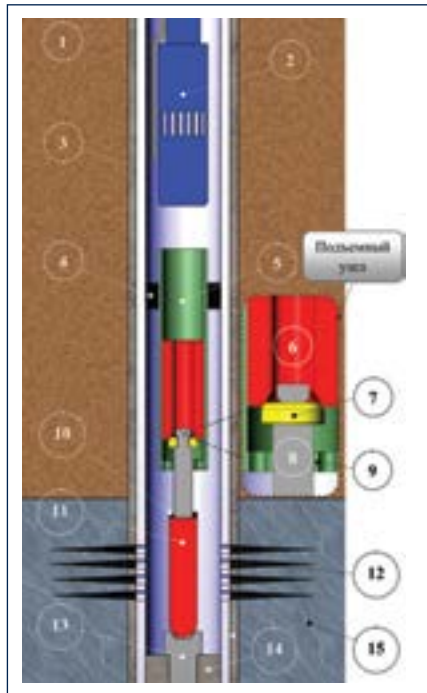


Рис. 1. Принципиальная схема УВСВ

1 – горный массив; 2 – ЭЦН; 3 – эксплуатационная колонна; 4 – пакер; 5 – корпус подъемного узла; 6 – плунжер; 7 – клапан; 8 – шток; 9 – центратор-ограничитель; 10 – манжета; 11 – ударник; 12 – перфорационные отверстия; 13 – наковальня; 14 – цементный камень; 15 – продуктивный пласт

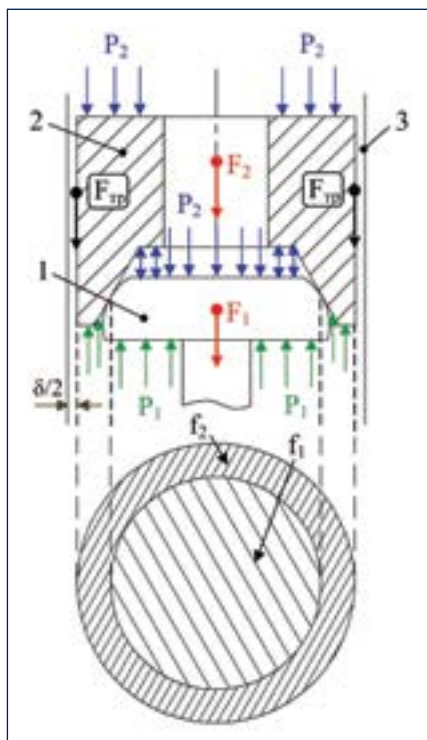


Рис. 2. Схема сцепления клапана и плунжера 1 – клапан; 2 – плунжер (седло); 3 – корпус подъемного узла

Разность давлений под клапаном и над клапаном, с одной стороны, определяется величиной потерь давления в зазоре при обтекании плунжера, а с другой стороны, этой величины должно быть достаточно для подъема сцепленной компоновки.

Опуская громоздкие выкладки, приведем конечные выражения, определяющие условия сцепления и подъема ударника в сборе и плунжера:

- условие сцепления:

$$\frac{2f_1 - 1}{f} > \frac{F_1 - F_2 - F_{\text{тр}}}{F_1 + F_2 + F_{\text{тр}}}, \quad (5)$$

- условие подъема:

$$Q > Q_{\text{min}} = \sqrt{\frac{F_1 + F_2 + F_{\text{тр}}}{f} \frac{4\rho(D-\delta)^2 D^2 + 8\rho(D-\delta)^4}{\rho g Q_{\text{min}}^2 L_{\text{пл}} + \pi^2 D^4 [D^2 - (D-\delta)^2]^2}}, \quad (6)$$

где  $f$  – площадь круга, имеющего диаметр, равный внешнему диаметру плунжера, м<sup>2</sup>;  $D$  – внутренний диаметр корпуса подъемного узла, м;  $\delta$  – диаметральный зазор между плунжером и корпусом подъемного узла, м;  $L_{\text{пл}}$  – длина плунжера, м;  $\rho$  – плотность скважинной продукции, кг/м<sup>3</sup>;  $i$  – гидравлический уклон в зазоре;  $Q$  – дебит скважины, м<sup>3</sup>/с.

Значение  $Q_{\text{min}}$  определяется численно, например, с помощью метода итераций, при этом определение гидравлического уклона  $i$  в зазоре в общем случае производится по известным гидродинамическим зависимостям с учетом количества фаз в потоке, его структуры и газосодержания [6].

Полученные условия позволяют установить количественную связь между геометрическими и массовыми параметрами УВСВ для различных режимов работы скважины.

### РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ПАДЕНИЯ УДАРНИКА В СБОРЕ И ПЛУНЖЕРА В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ В СКВАЖИННОЙ ПРОДУКЦИИ

Данный расчет базируется на проведении кинестатического анализа движения элементов УВСВ под действием различных сил [7]. Расчетные схемы движения ударника в сборе и плунжера приведены на рисунках 3 и 4.

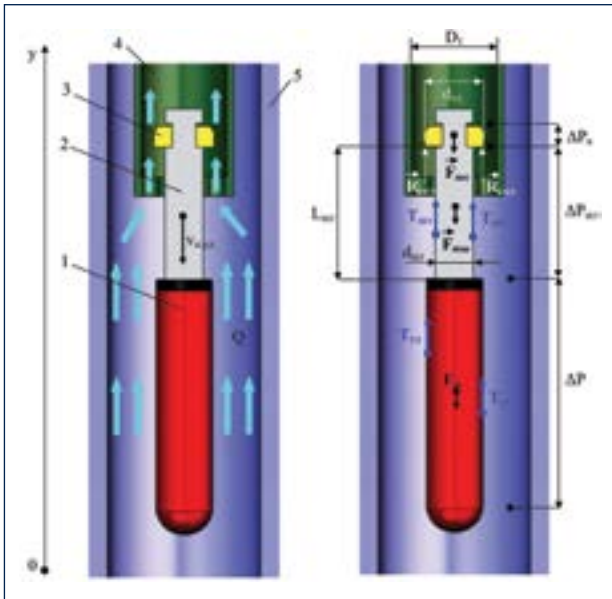


Рис. 3. Расчетная схема движения ударника в сборе  
1 – ударник; 2 – шток; 3 – клапан; 4 – корпус подъемного узла;  
5 – эксплуатационная колонна

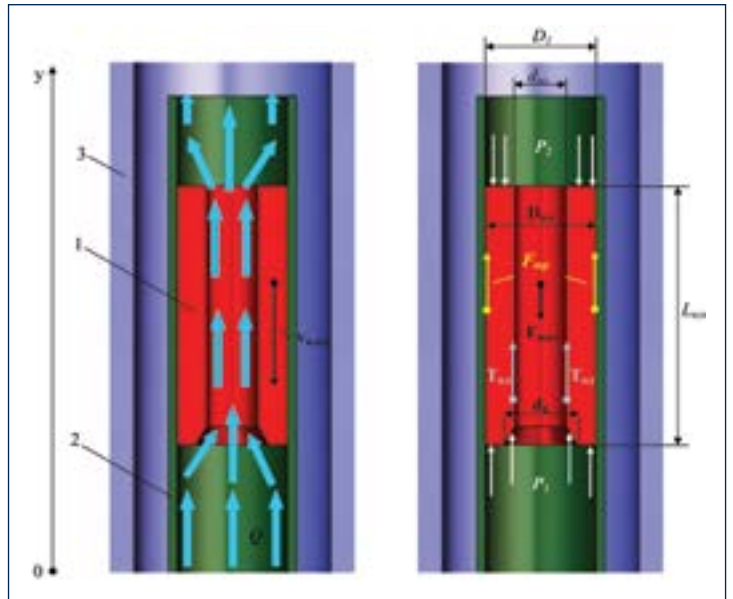


Рис. 4. Расчетная схема движения плунжера  
1 – плунжер; 2 – корпус подъемного узла; 3 – эксплуатационная колонна

В результате кинестатического анализа были получены следующие дифференциальные уравнения (ДУ) движения и начальные условия:

- для ударника в сборе:

$$M_{уд} \frac{dv_{п.уд}}{dt} = F_{т.уд} - T_{уд} - T_{шт} -$$

$$M_{уд} \frac{d^2y_{уд}}{dt^2} = F_{т.уд} - T_{уд} - T_{шт} - R_{скл} - \Delta P_{уд} S_{уд} + \Delta P_{шт} S_{шт} - \Delta P_{пл} S_{пл} \quad (7)$$

$$-\Delta P_{уд} S_{уд} - \Delta P_{шт} S_{шт} - R_{скл} \quad (8)$$

$$v_{п.уд}(0) = 0, \quad (9)$$

$$y_{уд}(0) = H_x,$$

$$y'_{уд}(0) = 0;$$

- для плунжера:

$$m_{пл} \frac{dv_{п.пл}}{dt} = F_{т.пл} - \Delta P_{пл} S_{пл} - T_{пл} - F_{тр} \quad (11)$$

$$m_{пл} \frac{d^2y_{п.пл}}{dt^2} = F_{т.пл} - \Delta P_{пл} S_{пл} - T_{пл} - F_{тр} \quad (12)$$

$$v_{п.пл}(0) = 0, \quad (13)$$

$$y_{п.пл}(0) = H_x,$$

$$y'_{п.пл}(0) = 0, \quad (14)$$

где  $M_{уд}$  в сборе и  $m_{пл}$  – массы ударника в сборе и плунжера, кг;  $F_{т.уд}$  в сборе и  $F_{т.пл}$  – веса ударника в сборе и плунжера в скважинной продукции, Н;  $T_{уд}$ ,  $T_{шт}$  и  $T_{пл}$  – касательные силы вязкого трения, действующие на ударник, шток и плунжер соответственно, Н;  $\Delta P_{уд}$ ,  $\Delta P_{шт}$  и  $\Delta P_{пл}$  – перепады гидродинамического давления, срабатываемые на ударнике, штоке и плунжере соответственно, Па;  $S_{уд}$  и  $S_{шт}$  – миделевы площади сечения ударника и штока, м<sup>2</sup>;  $S_{пл}$  – площадь поперечного сечения плунжера по телу, м<sup>2</sup>;  $R_{скл}$  – сила лобового сопротивления, действующая на клапан, Н;  $F_{тр}$  – сила трения в плунжерной паре, Н;  $v_{п.уд}$  и  $v_{п.пл}$  – скорости движения ударника в сборе и плунжера, м/с;  $y_{уд}$  и  $y_{п.пл}$  – текущие координаты центра масс ударника в сборе и плунжера, м;  $H_x$  – длина рабочего хода ударника в сборе, м.

Аналитические выражения для определения сил, входящих в (7), (8), (11) и (12), являются достаточно громоздкими и в связи этим не приводятся в рамках настоящей статьи.

Интегрирование полученных ДУ выполняется численно, например, методом Рунге-Кутты 4-го порядка, ввиду неявной зависимости их правой части от скорости движения ударника в сборе

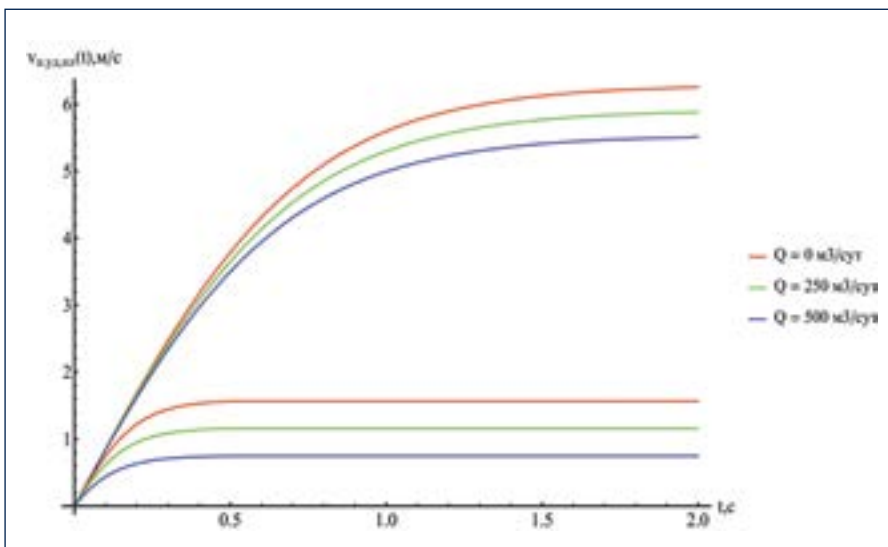


Рис. 5. Кинематические характеристики типа v(t)

ре и плунжера. В результате получаем кинематические характеристики в виде зависимостей скорости падения  $v_{п.уд.пл}(t)$  и координаты центра масс  $y_{уд.пл}(t)$  ударника в сборе и плунжера от времени  $t$ . Данные зависимости позволяют построить частотную характеристику УВСВ. В качестве иллюстрации на рисунках 7 и 8 представлены кинематические характеристики опытного образца УВСВ.

**ПОСТРОЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УВСВ**

Частотная характеристика УВСВ представляет собой графическую зависимость частоты ударов, наносимых ударником по наковальне в процессе работы УВСВ, от дебита скважины.

В соответствии с рассмотренным циклом работы УВСВ частота ударов определяется следующим выражением:

$$n = \frac{60}{t_r + t_{п}^{nn}} \quad (15)$$

где  $n$  – частота ударов, уд./мин.;  $t_r$  – время подъема ударника в сборе до В.М.Т.;  $t_{п}^{nn}$  – время падения плунжера, с.

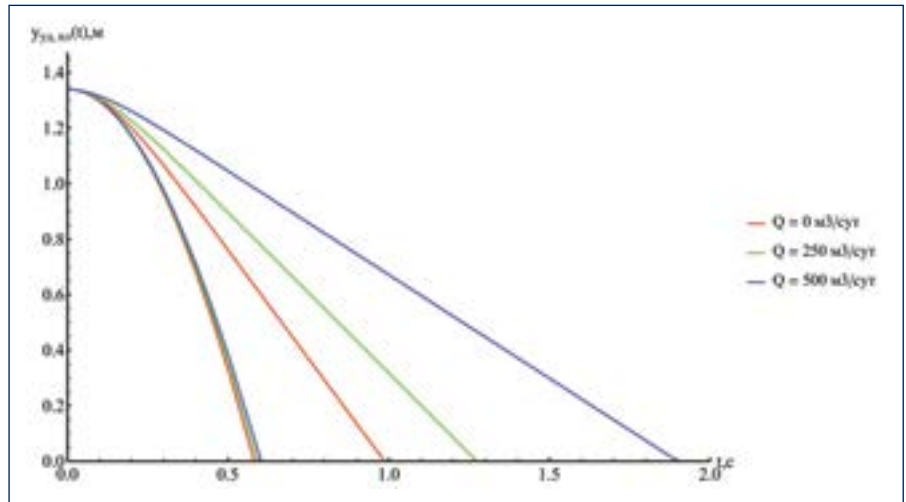


Рис. 6. Кинематические характеристики типа  $y(t)$

Время падения плунжера определяется для различных значений дебита  $Q$  скважины по кинематической характеристике типа  $y_{пл}(t)$  из уравнения  $y_{пл}(t_{п}^{nn})=0$ .

Время подъема ударника в сборе до В.М.Т. определяется для различных значений дебита скважины  $Q$  по формуле:

$$t_r = \frac{H_x}{v} = \frac{H_x \pi D_1^2}{4(Q - Q_{min})} = f(Q), \quad (16)$$

где  $v$  – скорость подъема подъемного узла УВСВ, м/с;  $D_1$  – внутренний диаметр корпуса подъемного узла УВСВ, м.

Построение частотной характеристики начинается с произвольного определения величины интервала построения  $\Delta Q$  и шага  $\Delta_0$  по дебиту скважины. Далее

14-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА  
**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ  
И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА  
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**



Получите  
электронный билет!  
[www.ndt-russia.ru](http://www.ndt-russia.ru)



**17-19  
ФЕВРАЛЯ 2015  
МОСКВА**

**ТЕПЕРЬ  
В КРОКУС ЭКСПО!**

Организаторы:



primexpo



ITE GROUP INC

Тел. +7 (812) 380 6002/00  
[ndt@primexpo.ru](mailto:ndt@primexpo.ru)

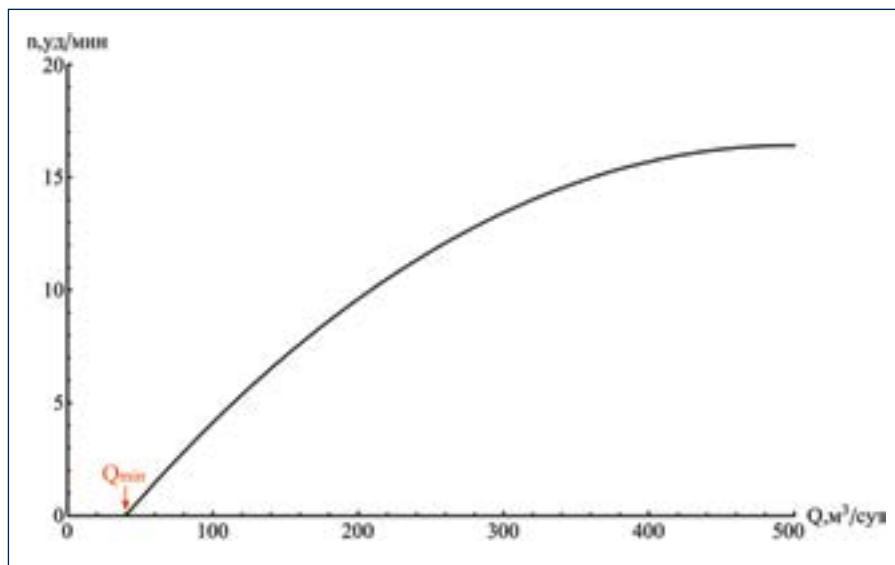


Рис. 7. Частотная характеристика опытного образца УВСВ

определяется количество расчетных точек по формуле:

$$N = \frac{\Delta Q}{\Delta Q} + 1. \quad (17)$$

После определения количества расчетных точек для них рассчитываются времена  $t_{\downarrow}^{nn}$ ,  $t_{\uparrow}$  и частота ударов  $n$  по формуле (15).

В качестве иллюстрации на рисунке 9 представлена частотная характеристика опытного образца УВСВ.

Рассмотренная методика расчета УВСВ позволяет получить все необходимые количественные взаимосвязи между параметрами УВСВ и тем самым открывает путь к ее непосредственному проектированию под конкретные условия эксплуатации.

#### Литература:

1. Лопухов Г.П. О механизме вибросейсмического воздействия на нефтяной пласт, представленный иерархической блочной средой // Труды ВНИИ. – 1990. – С. 63–89.
2. Симкин Э.М. Физические основы сейсмических и вибросейсмических методов повышения нефтеотдачи // Нефтяное хозяйство. – 1999. – № 7. – С. 22–29.
3. Дроздов А.Н., Мохов М.А., Вербицкий В.С. Технология и техника вибросейсмического воздействия на пласт при одновременной добыче нефти из возбуждающей скважины // Бурение и нефть. – 2003. – № 10. – С. 24–25.
4. Патент РФ № 2164286. Установка для вибросейсмического воздействия на залежь / Авт. изобрет. Дроздов А.Н., Симкин Э.М., Мохов М.А., Ямлиханов Р.Г. – М. кл. E 21 B 28/00, 43/25, заявл. 22.06.1999, опубл. 20.03.2001, Б.И. № 8.
5. Патент РФ № 2515623. Установка для вибросейсмического воздействия на залежь / Авт. изобрет. Дроздов А.Н., Каракетов А.В. – М. кл. E 21 B 28/00, 43/25, заявл. 27.12.2012, опубл. 20.05.2014, Б.И. № 14.
6. Марон В.И. Гидравлика двухфазных потоков в трубопроводах: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012. – 256 с.
7. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1986. – 416 с.

UDC 622.276.6

**A.N. Drozdov**, Doctor of Sciences (Engineering), professor of the Oilfield Development and Exploitation Department of Gubkin Russian State University of Oil and Gas; **A.V. Karaketov**, PhD candidate of the Oilfield Development and Exploitation Department of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, e-mail: azariy1@yandex.ru

### Methods for calculating the shock downhole vibroseismic formation stimulation

*With the accelerated growth in the share of difficult-to-recover oil reserves there is a need for development of innovative methods for increasing the oil recovery that can satisfy the current energy efficiency requirements. Wave techniques stand out among other tertiary development methods as they allow considering the natural tendency of hydrocarbon fluids towards movement by gravitational and capillary force gradients, as well as using the power potential of the rock mass.*

**Keywords:** Wave methods of enhanced oil recovery, vibroseismic stimulation, kinetostatics analysis principle

#### References:

1. Lopukhov G.P. O mekhanizme vibroseismicheskogo vozdeistviya na neftyanoi plast, predstavlenyi ierarkhicheskoi blochnoi sredoi (On mechanism of vibroseismic formation stimulation represented as a block hierarchical medium) // Works of VNIИ. – 1990. – P. 63–89.
2. Simkin E.M. Fizicheskie osnovy seismicheskikh i vibroseismicheskikh metodov povysheniya nefteotdachi (Physical bases of seismic and vibroseismic enhanced oil recovery methods) // Oil Industry. – 1999. – No. 7. – P. 22–29.
3. Drozdov A.N., Mokhov M.A., Verbitskiy V.S. Tekhnologiya i tekhnika vibroseismicheskogo vozdeistviya na plast priodnovremennoi dobyche nefiti iz vzbuzhdayutshei skvazhiny (Technology and techniques of vibroseismic formation stimulation with simultaneous oil production from a simulated well) // Drilling and Oil. – 2003. – No. 10. – P. 24–25.
4. RF patent No. 2164286. Ustanovka dlya vibroseismicheskogo vozdeistviya na zalezhi' (Vibroseismic reservoir stimulation plant) / Author's invention. A.N. Drozdov, E.M. Simkin, M.A. Mokhov, R.G. Yamlikhanov. – M. cl. E 21 B 28/00, 43/25, applied on 22.06.1999, published on 20.03.2001, B.I. No. 8.
5. RF patent No. 2515623. Ustanovka dlya vibroseismicheskogo vozdeistviya na zalezhi' (Vibroseismic reservoir stimulation plant) / Author's invention. A.N. Drozdov, A.V. Karaketov. – M. cl. E 21 B 28/00, 43/25, applied on 27.12.2012, published on 20.05.2014, B.I. No. 14.
6. Maron V.I. Gidravlika dvukhfaznykh potokov v truboprovodakh (Hydraulics of two-phase flows in pipelines): Instruction aid. – SPb.: Lan' Publishing House, 2012. – 256 p.
7. Targ S.M. Kratkiy kurs teoreticheskoi mekhaniki (Short course in theoretical mechanics): Textbook for technical colleges. – Moscow: Higher School, 1986. – 416 p.