

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИБРОВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТ

*А.А. Rogozin*

Аспирант ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия, [aa\\_rogozin@mail.ru](mailto:aa_rogozin@mail.ru)

**Аннотация:** В настоящее время большинство месторождений, основных нефтедобывающих регионов Российской Федерации для улучшения работы скважин применяют различные технологии обработки призабойной зоны. В действительности, многие технологии применяемые в промышленности не отвечают всем требованиям по экономической и технической части.

Эффективность разработки нефтяных месторождений во многом определяется состояние прискважинной зоны пласта (ПЗП) и методов её оценки. Во время разработки продуктивных пластов, ПЗП наиболее подвержена различным физико-химическим и термодинамическим воздействиям. В связи с этим стоит проблема с оценкой достоверности фильтрационных потоков и эффективности применения различных методов воздействия на ПЗП. В условиях скоротечности разработки залежей, стоит необходимость проведения моделирования процессов приближенных к пластовым условиям.

В связи с первичной разработкой наиболее высокопроницаемых пластов возникает необходимость вовлечения в разработку нефтенасыщенных интервалов пластов с ухудшенными фильтрационно-емкостными свойствами, эксплуатация которых осложняется низкой проницаемостью, неоднородностью коллекторских свойств и резким ростом обводненности продукции.

Для решения данных задач дополнительно к проведенным лабораторным исследованиям стоит необходимость в проведении математического моделирования процесса виброволнового воздействия применительно к условиям проходящим в скважине.

**Ключевые слова:** скважина; моделирование; керновый материал; фильтрация; прискважинная зона пласта; кислотный состав; волновое воздействие; расчет; формула; лабораторные исследования.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF VIBRO- WAVE ACTION ON THE FORMATION

*Alexander A. Rogozin<sup>1)</sup>*

1) Postgraduate of Federal State Budgetary Institution of Higher Education “Kuban State Technological University”, city of Krasnodar, Russia, [aa\\_rogozin@mail.ru](mailto:aa_rogozin@mail.ru)

**Abstract:** Currently, most of the fields, the main oil-producing regions of the Russian Federation, use various technologies for processing the bottom-hole zone to improve the operation of wells. In fact, many technologies used in industry do not meet all the requirements for the economic and technical part.

The efficiency of oil field development is largely determined by the state of the near-well formation zone (PZP) and the methods of its assessment. During the development of productive formations, the PZP is most susceptible to various physico-chemical and thermodynamic influences. In connection with this, there is a problem with assessing the reliability of filtration flows and the effectiveness of using various methods of influencing the PPP. In the conditions of the transience of the development of deposits, there is a need to conduct modeling of processes close to reservoir conditions.

In connection with the primary development of the most highly permeable formations, there is a need to involve in the development of oil-saturated intervals of formations with degraded filtration and capacitance properties, the operation of which is complicated by low permeability, heterogeneity of reservoir properties and a sharp increase in the water content of products.

To solve these problems, in addition to the laboratory studies carried out, there is a need to conduct mathematical modeling of the process of vibro-wave action applied to the conditions passing in the well.

**Key words:** well; modeling; core samples (core material); filtration; wellbore formation zone; acid composition; wave action; calculation; formula; laboratory tests.

Цель способа повышения нефтеотдачи в высокообводненных продуктивных пластах заключается в проведении изоляционных работ высокопроницаемых и высоко обводненных пропластков. При проведении изоляционных работ в водонасыщенную часть пласта производят закачку водоизолирующего быстро схватывающего тампонирующего состава с последующей обработкой низкопроницаемых пластов кислотным составом для интенсификации притока нефти.

В процессе его разработки ряд скважин работает гораздо ниже своих потенциальных возможностей, и часть скважин бездействует по причине низкой продуктивности.

Для повышения нефтеотдачи пластов, в соответствии с проектами на доработку, недропользователем составляются планы геолого-технических мероприятий – основные из которых для данной группы месторождений – это ремонтно-изоляционные работы с восстановлением дебита жидкости, а именно применение разглинизирующих агентов, воздействие на пласт гидродинамическим пульсатором давления.

Для повышения нефтеотдачи пластов, эффективности обработок призабойных зон скважин и снижения затрат времени на спуско-подъемные операции, предлагается способ комбинированного воздействия на пластовую систему растворами химических веществ в комплексе с гидроимпульсной технологией [3].

На колонне насосно-компрессорных труб в скважину спускается компоновка из ротационного гидравлического вибратора [1] – источника упругих волновых полей и струйного насоса – для обработки прискважинной зоны продуктивного пласта на депрессии и выноса коагулирующих пласт частиц, а так же продуктов реакции. Фото компоновки для хвостовика эксплуатационной колонны скважины  $\varnothing 114$  представлено на рисунке 1.



Рисунок 1 – Скважинная компоновка ротационного гидравлического вибратора

С целью приведения процессов проходящих между ротационным гидравлическим вибратором, спущенным на колонне НКТ и стенками скважины, рассмотрим физико-математический процесс движение жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами, причем центральный цилиндр совершает вращательное движение. Вращение происходит с угловой скоростью  $\Omega_1$ , радиусы цилиндров  $R_1$  и  $R_2$ ,  $R_2 > R_1$ . Берем цилиндрические координаты  $r, z, \varphi$  с осью  $z$  по оси цилиндров, где скорости и давление имеют следующие зависимости:

$$v_z = v_r = 0, \quad v_\varphi = v(r), \quad p = p(r).$$

Масса жидкости в объеме внутреннего цилиндра  $R_1$  равна  $\int \rho dV$ ,  $\rho$  – плотность жидкости,  $V$  – объем. Интегрирование проводим по этому объему.

Через элемент поверхности  $dS$ , ограничивающей данный объем, в единицу времени протекает  $\rho v dS$  жидкости. Где  $\mathbf{v}$  – вектор скорости. Жидкость вытекает из объема, поэтому  $\rho v dS$  положительно. Полное количество жидкости, вытекающей из объема  $V_1$  в единицу времени равно  $\oint \rho v dS$ . Интегрирование ведется по поверхности через которую жидкость покидает цилиндр  $R_1$ . Количество жидкости, которое вытекает из объема  $V_1$  в еди-

ницу времени можно записать как  $-\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV$ . В силу закона сохранения вещества запишем равенство:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV = - \oint \rho v dS. \quad \text{Используем } \oint \rho v dS = \int \operatorname{div} \rho v dV. \text{ По-}$$

лучаем уравнение неразрывного течения жидкости в виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} v + v \operatorname{grad} \rho = 0.$$

Уравнение движения элемента объема жидкости запишем в виде:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \operatorname{grad} p.$$

Из этого уравнения вычисляется давление жидкости, которое действует на стенки цилиндра  $R_2$  при истечении из цилиндра  $R_1$ .

В цилиндрических координатах это будут два уравнения:

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{v^2}{r},$$

$$\frac{d^2 v}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv}{dr} - \frac{v}{r^2} = 0.$$

Скорость жидкости на внутренней и внешней цилиндрических поверхностях должна быть равна скорости соответствующих цилиндров.

$V = R_1 \Omega_1$ , при  $r = R_1$  и  $V = R_2 \Omega_2$ , при  $r = R_2$ . Для нашего случая  $\Omega_2 = 0$ . Таким образом, скорость жидкости вытекающей из цилиндра  $R_1$  будет выглядеть:

$$V = ar + \frac{b}{r},$$

$$V = \frac{\Omega_2 R_2^2 - \Omega_1 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} r + \frac{(\Omega_1 - \Omega_2) R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{r}.$$

Цилиндр  $R_2$  неподвижен, жидкость, увлеченная вращением цилиндра  $R_1$ , вращается вдоль внутренней стенки цилиндра  $R_2$ . При этом она испытывает пристеночное сопротивление со стороны цилиндра. За счет трения жидкости о стенки неподвижного цилиндра, возникают вихревые течения. Зная скорость течения жидкости между стенками цилиндров, можно вычислить давление этой жидкости на стенки этих цилиндров. Для нашего случая считаем жидкость несжимаемой, то есть плотность равна константе в течении всего времени движения. Таким образом, при движении жидкости не происходит заметных растяжений или сжатий жидкости. Для этого случая уравнения Бернулли могут быть записаны в виде:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{const}$$

Из этого уравнения видно, что наибольшее значение давления достигается в критических точках, где скорость обращается в нуль. Если скорость натекающей на поверхность цилиндра жидкости равна  $V$ , а  $P_0$  – давление жидкости на поверхности цилиндра  $R_1$ , то давление в критической точке равно:

$$P_{\max} = P_0 + \frac{\rho v^2}{2}$$

С помощью полученной формулы можно вычислить силу давления текущей жидкости на стенки цилиндра.

Исследуем устойчивость движения жидкости в пространстве между двумя цилиндрами, один из которых неподвижен. Согласно выше приведенным вычислениям угловая скорость  $\dot{\phi}$  частиц, движущейся жидкости равна:

$$\dot{\phi} = \frac{\Omega_2 R_2^2 - \Omega_1 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{(\Omega_1 - \Omega_2) R_2^2 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{r^2}.$$

Момент импульса элемента жидкости, двигающегося по окружности радиуса  $r = \text{const}$ , равен  $\mu(r) = m r^2 \dot{\phi}$ , а действующая на него центробежная сила равна  $\mu^2 / m r^3$ . Эта сила уравнивается радиальным градиентом давления, возникающим во вращающейся жидкости. Условие устойчивости такого движения будет выглядеть так:

$$(\Omega_2 R_2^2 - \Omega_1 R_1^2) \dot{\phi} > 0.$$

Из этого уравнения видно, что если вращается только внутренний цилиндр  $\Omega_1 \neq 0$ , а внешний покоится  $\Omega_2 = 0$ , то движение жидкости неустойчиво. Это условие выполняется лишь при достаточно малой вязкости, то есть достаточно больших числах Рейнольдса.

Во вращающейся жидкости внешним воздействием (давление нагнетания жидкости) можно получать произвольно малые возмущения. Воспользуемся уравнением:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + 2[\boldsymbol{\Omega} \mathbf{V}] = -\frac{1}{\rho} \nabla P^l.$$

$P$  - переменная часть давления в волне при  $\rho = \text{const}$ .

Запишем это уравнение в компонентах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} - 2\Omega v_y &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^l}{\partial x}; \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + 2\Omega v_x &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^l}{\partial y}; \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^l}{\partial z}. \end{aligned}$$

Эти формулы продифференцируем по  $x, y, z$  и сложим их с учетом  $\text{div} \mathbf{V} = 0$ , получим:

$$\frac{1}{\rho} \Delta P^l = 2\Omega \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right).$$

Продифференцируем это уравнение по  $t$ :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Delta P^l}{\partial t} = 4\Omega^2 \frac{\partial v_z}{\partial z}.$$

Дифференцируем по  $t$  еще раз:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \Delta P^l + 4\Omega^2 \frac{\partial^2 P^l}{\partial z^2} = 0.$$

Для периодических возмущений с частотой  $\omega$  это уравнение принимает вид:

$$\frac{\partial^2 P^l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P^l}{\partial y^2} + \left( 1 - \frac{4\Omega^2}{\omega^2} \right) \frac{\partial^2 P^l}{\partial z^2} = 0.$$

При  $\omega < 2\Omega$  коэффициент перед последним членом отрицателен. Возмущения из точечного источника распространяются вдоль образующих конуса с осью вдоль  $\Omega$ , с углом раствора  $2\theta$ , где  $\sin\theta = \frac{\omega}{2\Omega}$ .

При  $\omega > 2\Omega$  влияние точечного источника возмущений простирается по всему объему жидкости и убывает при удалении от источника по степенному закону.

На основании проведенных расчетов получена закономерность учитывающая частоту периодических возмущений с определенной скоростью, что позволит рассчитать процесс, проходящий между двумя цилиндрами (ротационным гидравлическим вибратором и стенками скважин).

#### **Список использованных источников:**

1 Омелянюк М.В., Пахлян И.А. Ротационный гидравлический вибратор // RU 2542015 С1, 2015.

2 Рогозин А.А., Омелянюк М.В., Пахлян И.А., Каменюка А.И., Бадалян К.С., Палехин Д.О.. База данных «Техника и технология для селективных кислотных обработок»// Свидетельство о регистрации базы данных №2018620364. Дата регистрации 10.01.2018 г

3 Омелянюк М.В., Пахлян И.А., Рогозин А.А., Обоснование комбинированной технологии повышения дебита скважин для условий майкопских отложений. Статья в научно-техническом журнале Нефтеное хозяйство №9 2019 г.

4 Чурков А.В., Рогозин А.А., Яценко В.М., Игнатьева Т.С. Экспресс-оценка глинистости по результатам ЯМР-релаксометрии. Статья в научно-техническом журнале Нефтяное хозяйство №9 2020 г.

5. Дыбленко В.П., Камалов Р.Н., Шариффулин Р.Я., Туфанов И.А. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением вибро-волнового воздействия, 2000 .