

Решение системы уравнений математического описания производится потарелочным расчетом в направлении от куба колонны к дефлегматору в последовательности:

1. Задается начальное значение концентрации компонента в кубе колонны  $x_w$ , например равное составу питания  $x_f$ .
2. Рассчитывается уравнение (2) состав пара  $u_w^*$ , уходящего из куба колонны.
3. Определяется по уравнению (8) состав жидкости на первой тарелке отпарной секции колонны.
4. Определяются по уравнению (1) состав пара, уходящего тарелки.
5. Определяются по уравнениям (5) для отпарной секции колонны или (6) для укрепляющей состав жидкости на вышерасположенной тарелке.
6. Определяется состав дистиллята  $x_p$ , для чего повторяются расчеты пп.4 и 5 для всех тарелок колонны.
7. Проверяются выполнение общего компонентного баланса колонны для принятого значения  $x_w$  и рассчитанного  $x_p$ :

$$P = W \times x_w + D \times x_p - F \times x_f. \quad (11)$$

Если  $|P| > \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – заданная точность выполнения общего покомпонентного баланса, то изменяется принятое значение концентраций летучего компонента в кубе колонны  $x_w$  и расчет повторяются, начиная с п.2. Если же  $|P| < \varepsilon$ , то расчет заканчивается. Для уточнения значения  $x_w$  используется метод половинного деления.

В результате решения системы уравнения математического описания определяются составы продуктов разделения  $x_p$  и  $x_w$ , а также составы жидкости и пара для всех тарелок колонны. Если в систему уравнений математического описания включить соотношение определяющее температуру кипения жидкости как функцию состава, то можно рассчитать температуры для всех тарелок колонны.

$$T = f(x), \quad (12)$$

Математическая модель может использоваться для исследования различных режимов разделения, а также для расчета статических характеристик колонны по различным каналам, например, по каналам «количества питания – состав продуктов разделения», «состав питания – состав продуктов разделения», и т.п. При наличии зависимости температуры кипения от состава (12) при помощи рассмотренной модели можно найти положение контрольной тарелки в колонне. По температуре жидкости на контрольной тарелке регулируется режим разделения.

#### Литература

1. Берлин М.А. Переработка нефтяных и природных газов / А.М. Берлин, В.Г. Гореченков, Н.П. Волков. – М.: Химия, 1981. – 472 с.
2. Барамыгина Н.А. Моделирование процессов промышленной подготовки газов и конденсатов: 17.05.08/ Н.А. Барамыгина: Томский политехнический университет. – Т.: 2006. – 186с
3. Зятиков П.Н. Управление нефтегазовыми технологическими процессами: Методические указания к выполнению контрольных работ. –Т.: НИ ТПУ, 2014.

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ПРИТОКЕ К ТРЕЩИНЕ ГРП ДЛЯ АНИЗОТРОПНЫХ ПЛАСТОВ

С.Г. Кулышкина

*Научный руководитель профессор кафедры ТХНГ С.Н. Харламов*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г.Томск, Россия*

ГРП является одним из основных методов вовлечения в разработку месторождения нефти и газа, приуроченные к плотным низкопроницаемым карбонатным коллекторам. Такие пласты, как правило, характеризуются трещиноватостью, которая приводит к анизотропии проницаемости. В данной работе рассматривается плоское стационарное течение однородной несжимаемой жидкости в анизотропном по проницаемости пласте, содержащем вертикальную трещину гидроразрыва эллиптической формы, заполненную однородной изотропной пористой средой. Предполагается, что фильтрация в пласте и в трещине подчиняется закону Дарси. На основе решения задачи о притоке к трещине конечной проводимости в кусочно-однородно анизотропном пласте оценивается влияние анизотропии пласта на дебит скважины после гидроразрыва.

Исследуется плоская стационарная фильтрация однородной жидкости в анизотропном пласте, обусловленная точечным источником (стоком) интенсивности  $Q$ , расположенным в центре эллиптического включения с полуосями  $l$ ,  $w$ . Предполагается, что оси включения, моделирующего трещину, параллельны главным осям тензора проницаемости пласта. Пласт является кусочно-однородным; границы областей, различающихся по проницаемости  $k_j = \sqrt{k_{xj}/k_{yj}}$  и коэффициенту анизотропии  $\gamma_j = \sqrt{k_{xj} \cdot k_{yj}}$ , представляют собой соосные эллипсы с центром в начале координат и полуосями  $a_j$ , и  $b_j$ , причем  $a_j^2 - b_j^2 \gamma_j^2 = a_{j-1}^2 - b_{j-1}^2 \gamma_j^2 = f_j^2$ , , , индекс  $j = 1, 2, \dots, N$  соответствует номеру области (рис. 1);  $k_{Xj}$ ,  $k_{Yj}$  - главные значения тензора проницаемости. Предполагается, что пласт имеет постоянную толщину  $h$ . Включение, моделирующее трещину гидроразрыва, характеризуется  $k_f =$  проницаемостью и полуосями  $l = aN$  и  $w = bN$ , соответствующими полудлине и полуширине трещины. Если движение жидкости в пласте и в трещине подчиняется линейному закону фильтрации, то давление  $p_j$  и компоненты скорости  $v_{xj}$ ,  $v_{yj}$  в каждой области, включая трещину, которой соответствует индекс  $j=N+1$ ,

определяются уравнениями  $\chi_j^2 \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 v_j}{\partial y_j^2} = 0$ ;  $v_{xj} = \frac{k_{xj} \partial v_j}{\mu \partial x} = 0$ ;  $v_{yj} = \frac{k_{yj} \partial v_j}{\mu \partial y} = 0$

Здесь  $\mu$ - вязкость жидкости. Границы областей задаются следующим образом:  
 $X_{cj} = a_j \cos(t), Y_{cj} = b_j \sin(t), 0 \leq t \leq 2\pi, 1 \leq j \leq N$

Преобразование координат и компонент скорости  $X_j = \chi_j^{-0.5} X, Y_j = \chi_j^{0.5} Y, V_{xj} = \chi_j^{-0.5} v_{xj}, V_{yj} = \chi_j^{0.5} v_{yj}$  позволяет перейти в каждой области к эквивалентному течению в изотропной среде с проницаемостью  $k_j$  и ввести комплексный потенциал этого течения  $\Phi_j = \phi_j + i\psi_j$ , где  $\phi_j = k_j h r_j / \mu$  - потенциал,  $\psi_j$  - функция тока эквивалентного течения. Выражения для комплексного потенциала в каждой из областей имеют вид [1]:

$$\Phi_1 = \frac{G}{2\pi} \ln Z_1 + k_1 \sum_{n=1}^{\infty} G_n Z_1^{2n}, \Phi_j = \frac{G}{2\pi} \ln Z_j + k_j \sum_{n=1}^{\infty} G_n Z_j^{2n}, 2 \leq j \leq N, \Phi_{N+1} = \frac{G}{2\pi} \ln Z_{N+1} + k_{N+1} \sum_{n=0}^{\infty} G_n Z_{N+1}^{2n+1} \quad (2)$$

Здесь  $G_{jn}$  - произвольные вещественные коэффициенты;  $Z_j = X_j + iY_j$  - комплексная переменная в области  $j$ . Пусть  $Z_{cj}, Z_{ej}$  - значения переменной  $Z_j$  соответственно на внутреннем и внешнем контурах области  $j$ . Тогда уравнения контуров (2) принимают вид:

$$Z_{cj} = \frac{f_j}{z_j^{0.5} a_{cj}} e^{i\alpha} (1 + q_{cj}^2 e^{-2i\alpha}), 1 = c, e; \quad (3), \quad q_{ej} = \sqrt{\frac{e_j - b_j X_j}{e_j + b_j X_j}}; \quad q_{ej} = \sqrt{\frac{e_j - a_j - b_j - i X_j}{e_j - a_j + b_j - i X_j}} \quad (4)$$

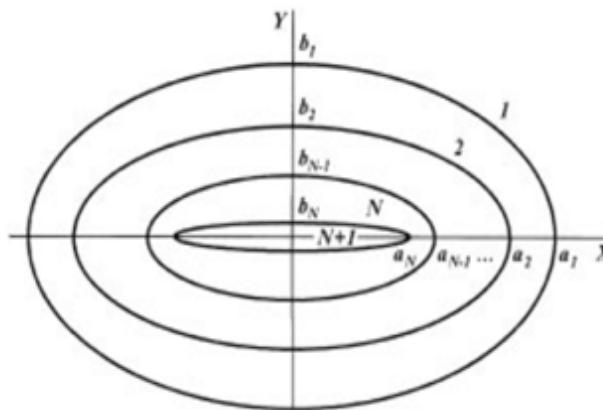


Рис. 1. Схема кусочно-однородного анизотропного пласта

На линиях раздела областей давление и нормальная компонента скорости  $vn$  должны быть непрерывны. Пусть  $s$  и  $S_j$  - соответственно длина дуги линии раздела в плоскости  $(x,y)$  и ее образа при преобразовании координат  $(X_j, Y_j)$ .

Учитывая, что  $vn(x,y) = V_{nj}(X_j, Y_j) ds_j / ds = \partial \Psi_j(X_j, Y_j) / \partial s$ , получим условия сопряжения решений (3) на границах (4)

$$\frac{1}{k_j} \operatorname{Re} \Phi_j(Z_{cj}) = \frac{1}{k_{j+1}} \operatorname{Re} \Phi_{j+1}(Z_{cj+1}), \operatorname{Im} \Phi_j(Z_{cj}) = \Phi_{j+1}(Z_{cj+1}), 1 \leq j \leq N$$

Согласно данной модели, авторами [1] была получена формула эффективного радиуса скважины с трещиной ГРП в однородном - анизотропном пласте:

$$\ln r_c = \ln \frac{h}{2\pi k_1 a_{c1}} - (1 + \lambda_2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{c1}^{2n} b_{c1}^{2n}}{n [1 + q_{c1}^{4n}]} \quad (5)$$

А также формула притока к одиночной трещиной трещине конечной проводимости от удаленного контура в кусочно-однородном анизотропном пласте:

$$Q = Q_0 \frac{\ln R_c / r_w}{\ln R_c / r_c}, Q_0 = \frac{2\pi k_1 h (P_c - P_w)}{\mu \ln R_c / r_w} \quad (6)$$

Где  $R_c$  - радиус контура питания скважины,  $r_w$  - радиус скважины,  $r_e$  - эффективный радиус скважины с трещиной гидроразрыва,  $Q_0$  - дебит скважины без трейны гидроразрыва в однородном изотропном пласте с проницаемостью  $k_1$ ,  $h$  - эффективный радиус пласта. В однородном анизотропном пласте с эллиптическим

$$Q = Q_0 \frac{\ln R_c / r_w}{\ln \left[ \frac{r_w k_1^2}{r_w k_1^2 + r_w k_j^2} \right]} \quad (7)$$

контуром дебит скважины вычисляется по формуле:

Для оценки влияния анизотропии на эффективность гидроразрыва пласта рассчитаем безразмерный дебит  $Q/Q_0$  в однородном анизотропном пласте в зависимости от от полудлины дрещины  $a_1$  и коэффициента анизотропии  $\lambda_1$ . Расчеты проведены по формулам (5), (6), (7). Данные для расчетов взяты для скважины №973 Самотлорского метосрождения, для которой радиус контура питания равен  $R_c=500$  м, радиус скважины  $r_w=0.108$  м, половина раскрытия трещины  $0,002$  м., а коэффициент анизотропии трещины равен  $\lambda_2=1$ .

Таблица 1

Результаты расчетов отношения  $Q/Q_0$

$-\lambda$	$a_1$	$x_1=0,1$	$x_1=0,5$	$x_1=1$	$x_1=5$
1	10	2,444	1,982	1,833	1,560
	28	3,482	2,614	2,361	1,927
	50	4,576	3,186	2,817	2,221
	100	7,331	4,315	3,666	2,716
0,999	10	2,419	1,945	1,787	1,482
	28	3,456	2,582	2,323	1,870
	50	4,549	3,157	2,785	2,175
	100	7,294	4,286	3,636	2,680
0,995	10	2,405	1,923	1,760	1,431
	28	3,451	2,575	2,315	1,858
	50	4,546	3,153	2,780	2,169
	100	7,292	4,284	3,634	2,677

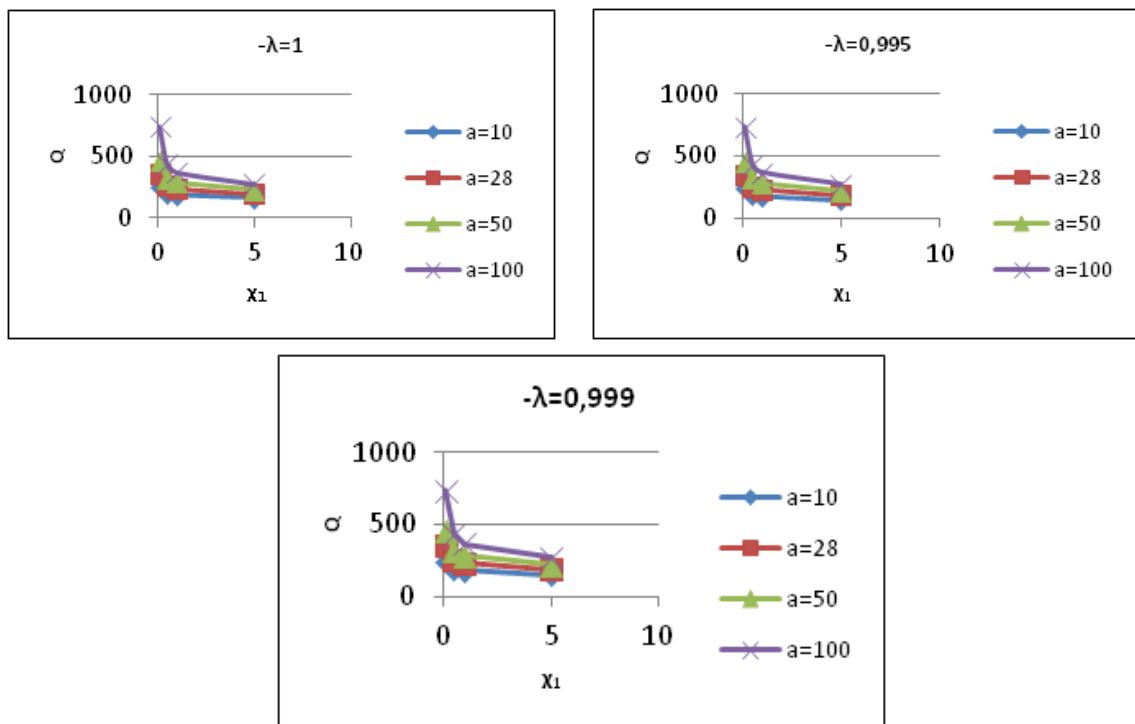


Рис.2. Графики зависимостей дебита после ГРП от коэффициента анизотропии для различных значений полудлины трещины

Данные результаты показывают, что гидроразрыв в анизотропном пласте приводит к максимальному увеличению дебита (то есть максимальному значению безразмерного дебита при меньших значениях  $x_1$ ). Такие случаи возможны, например, если трещина ГРП перпендикулярно системе естественных трещин пласта. Также необходимо отметить, что значения дебита выше при  $\lambda = -1$ , что соответствует идеальной трещине.

В реальных условиях и современных методах проведения гидроразрыва направления образованной трещины и естественных трещин совпадают (то есть  $\lambda > 1$ ), а также присутствует различия между проницаемостью пласта и трещины. В анизотропных пластах при  $\lambda > 1$  эффективность гидроразрыва ниже, чем в изотропных. А также увеличение дебита при росте трещины в анизотропных пластах тем медленнее, чем больше коэффициент анизотропии. При сильной различии проницаемости пласта и трещины, влияние коэффициента анизотропии возрастает. При  $\lambda = -1$  эффективный радиус скважины, пересеченной трещиной, определяется как  $a_1 x_1^{-0.5} / 2$  [1].

Достоверность полученных расчетов подтверждает сравнение с фактическим дебитом на данной скважине. При интерпретации ГДИС скважины №973 с средним фактическим дебитом 100 т/сут была выявлена трещина длиной 28 м. Для трещины конечной проводимости рассчитанный по данной методике дебит получился равен 108 т/сут.

**Выводы:**

1. На основе найденного аналитического решения задачи о притоке жидкости к трещине в анизотропном пласте показано, что если ось естественных трещин совпадает с осью образованной после ГРП, то анизотропия пласта негативно сказывается на эффективности гидроразрыва.
2. Данное негативное влияние при росте трещины тем сильнее, чем больше коэффициент анизотропии.
3. При учете коэффициента анизотропии, полученное значение дебита близко к фактическому на скважине.

**Литература**

1. Р.Д. Каневская. Математическое моделирование разработки месторождений нефти и газа с применением гидравлического разрыва пласта М.: Недр-Бизнесцентр, 1999. - 212 с.: ил. - ISBN 5-8365-0009-6.
2. Economides, Michael J. Unified fracture design : bridging the gap between theory and practice / Michael Economides, Ronald Oligney, Peter Valky/Orsa Press
3. Economides, Michael J. Petroleum production system/ Michael Economides, A. Daniel Hill, Christine Ehlig-Economides/1994 Printece-Hall PTR
4. Гидравлический разрыв пласта [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://oilloot.ru/77-geologiya-geofizika-razrabotka-neftyanykh-i-gazovykh-mestorozhdenij/94-gidravlicheskiy-razryv-plasta-grp> (дата обращения 05.12.15)
5. И.М. Абдурахманов, М.Г. Алишаев, Плоская стационарная фильтрация в пласте, разделенном прямолинейной трещиной. Изв.АН СССР. Механика жидкости и газа.-1973
6. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидродинамика,- М.: Недр, 1993.-416 с.
7. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде.-Москва.Ижевск:НИЦ»Регулярная хаотическая динамика»,2004.-608с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОВ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ  
НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

**В.М. Логиновских, Д.А. Черенцов**

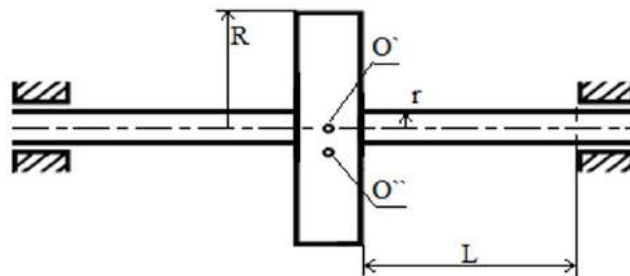
*Научный руководитель: доцент Воронин К.С.*

*ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Россия*

Метод виброзащиты насосных агрегатов (НА) с помощью отстройки от резонансных частот, предполагает наличие значений свободных частот НА и частот возмущающей силы. В [1] свободные крутильные колебания цилиндрического вала с закрепленными на нем  $n$  дисками определены, пренебрегая массой вала по сравнению с массой диска.

Ниже представлена методика для определения свободных частот крутильных колебаний НА, полученная с помощью уравнения Лагранжа второго рода.

Схематично система изображена на рис. 1



**Рис. 1. Система - вал и жестко закрепленный диск**

За обобщенную координату принимается угол закручивания вала -  $\varphi$ .

Уравнение Лагранжа второго рода для свободных крутильных колебаний НА имеет следующий вид:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = \frac{\partial T}{\partial \varphi} \quad (1)$$

где  $t$  - время, с;  
 $T$  - кинетическая энерг  
 $\Pi$  - потенциальная энергия.

Выражение для кинетической энергии системы - вал и жестко закрепленный диск будет складываться из кинетической энергии вращения вала и диска:

$$T = \frac{(M(R^2 + r^2) + m r^2)}{4} \dot{\varphi}^2 \quad (2)$$

где  $M$  - масса диска, кг;