№3 (2) 2014
Технологии добычи и использования углеводородов

УДК 622.276.66+536.24+519.67-7

Гидроудар в канале гидроразрыва для увеличения эффективного радиуса скважины

С.В.Сухинин, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

АННОТАЦИЯ

Градиентная катастрофа волны давления используется в ударно-волновых технологиях различного назначения. Например, для организации фазовых переходов внутри различных материалов.

Хорошо известно, что для волны давления в чистой воде градиентная катастрофа (ударная волна) не возникает потому, что скорость звука в воде большая. Однако гидроупругие волны в каналах с водой и упругими стенками распространяются достаточно медленно, скорость гидроупругих волн на порядок меньше скорости звука в воде. Это позволяет создавать градиентные катастрофы в длинных и узких каналах с упругими стенками. Необходимо отметить, что градиентные катастрофы гидроупругих волн могут быть с повышением и понижением давления за фронтом волны.

В рамках теории длинных волн проведены исследования распространения гидроупругих волн в неоднородных каналах с упругими стенками. Определены критерии градиентных катастроф в однородных и неоднородных каналах. Результаты работы могут быть использованы при проектировании трубопроводных систем и для повышения эффективности гидроразрыва пластов при помощи управляемых градиентных катастроф. Полученные результаты подтверждаются натурными экспериментальными исследованиями. Результаты работы защищены патентом № 2447278

Ключевые слова: *гидроразрыв, волновые технологии, гидроудар, гидроупругие волны, градиентная катастрофа, линейные и нелинейные волны в неоднородных каналах, гидроупругие волны в неоднородных каналах, эффективный радиус скважины.*

Краткая историческая справка, место настоящей работы. Первые и основополагающие исследования распространения гидроупругих волн в трубопроводных системах были проведены Н.Е. Жуковским в конце XIX века, изложение результатов этих работ содержится в [1]. Количество публикаций по этой тематике постоянно увеличивается. Теория распространения волн в трубопроводных системах содержится в [2]. Изложение использования гидроупругих трубных волн в геофизических исследованиях скважин содержится в [3]. Целью настоящей работы является качественное исследование нелинейных явлений, возникающих при распространении гидроупругих волн в неоднородных каналах. Нелинейные явления связаны, как правило, с укручением волн и образованием сильных разрывов, начало которых можно описать при помощи градиентных катастроф. В настоящей работе исследования влияния нелинейности и возникновения градиентных катастроф в каналах с упругими стенками проводится при помощи методов теории распространения слабых разрывов [4]. Аналогичные исследования автору неизвестны. Результаты этих исследований защищены патентом [5].

Обозначения. Пусть канал заполнен жидкостью с плотностью $\rho = \rho(p)$, давлением $\rho = p(x,t)$ и скоростью $u = u(x,t)$. Здесь и далее x – осевая координата канала, t – время, $A(p,x)$ – площадь сечения канала в точке x. Считается, что $\rho(p)$ и $A(p,x)$ являются известными функциями от давления и осевой координаты.

Гипотезы и пределы применимости. Если длина волны значительно больше поперечных размеров канала, то поперечными к оси канала перемещениями можно пренебречь. Волны, которые удовлетворяют этим условиям, называются продольными или гидравлическими.

Законы сохранения массы и импульса в рамках описанных гипотез имеют вид

$$\begin{cases}(A\rho)_t + (A\rho u)_x = 0 \\ u_t + uu_x = p_x/\rho = 0.\end{cases}$$

Здесь и далее величины и считаются неизвестными функциями.

Математическая модель. Распространение возмущений в каналах с упругими стенками описывается при помощи системы уравнений, которая получена прямым вычислением из законов сохранения массы и импульса

$$\begin{pmatrix} p \\ u \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} u & \rho c^2 \\ 1/\rho & u \end{pmatrix}\begin{pmatrix} p \\ u \end{pmatrix}_x + \begin{pmatrix} u\rho c^2 \ A_x/A \\ 0 \end{pmatrix} = 0. \qquad (1)$$

Прямой проверкой можно установить, что (1) является квазилинейной гиперболической системой уравнений с характеристическими направлениями $u + c$ и $u - c$. Здесь и далее $c = \sqrt{A/(A\rho)_p}$ – местная скорость распространения гидроупругих волн в канале. Прямой проверкой можно установить, что скорость гидроупругих волн меньше скорости звука в жидкости $c = c(p,x) < c_{ж} = \sqrt{\partial p/\partial \rho}$, энтропия постоянна в жидкости и в материале канала.

Система уравнений (1) описывает распространение длинных волн в трубах и каналах с упругими стенками. В том числе в каналах гидроразрыва пластов, которые широко используются для повышения эффективных радиусов скважин, предназначенных для добычи нефти или газа, а также для дегазации угольных пластов. Широкое применение технологии гидроразрыва обуславливает актуальность настоящей работы.

Терминология. Исторически сложилось так, что гидроупругие волны в каналах с упругими стенками называются гидроударом. Это связано с основополагающей работой Н.Е. Жуковского «О гидравлическом ударе в водопроводных трубах», 1949 [1]. В настоящей работе эта терминология использована только в названии.

Характеристики. Уравнения характеристик системы (1) имеют вид $\frac{dx}{dt} = u \pm c$. Далее считается, что $A = a(x)b(p)$.

Следовательно, $c = c(p)$ и характеристики покоя являются прямыми линиями. Уравнение характеристики покоя, выходящей из начала координат имеет вид $x = c_0 t$, $c_0 = c(p_0)$ – скорость распространения гидроупругих волн по состоянию покоя, p_0 – давление покоя. Для прогнозирования градиентной катастрофы в неоднородном канале с упругими стенками удобно использовать метод распространения слабых разрывов [3, 4].

Распространение слабого разрыва вдоль характеристики покоя. Пусть вдоль характеристики покоя $x = c_0 t + \xi$ распространяется слабый разрыв с интенсивностью $\sigma = \sigma(t)$. Функция $\sigma(t)$ является решением уравнения графа Риккати

$$\frac{d}{dt}\sigma + \sigma\frac{c_0}{2}\frac{A_x}{A} + \sigma^2\left[1 + \frac{1}{2}\left(\rho c^2\right)_p + \frac{1}{2}\rho_0^2 c_0^2\left(\frac{1}{\rho}\right)_p\right] = 0 \qquad (2)$$

с некоторыми начальными условиями $\sigma(0) = \sigma_0$.

В (2) использовано соотношение $\begin{pmatrix} [p_x] \\ [u_x] \end{pmatrix} = \sigma \begin{pmatrix} \rho_0 c_0 \\ 1 \end{pmatrix}$, которое связывает продолженную систему (1) и уравнение (2).

В общем случае решение (2) можно исследовать численно. Целесообразно изучить частные случаи задачи Коши для (2).

Упругие свойства системы определяются сжимаемостью жидкости и упругостью стенок канала. Геометрические свойства определяются соотношением A_x / A. Каналы можно классифицировать: однородный канал $A_x / A = 0$; клиновидный канал $A_x / A = 1/x$; конус $A_x / A = 2/x$; экспоненциальный канал $A_x / A = const$.

Однородный канал, жидкость несжимаема. В этом случае (2) примет вид $\frac{d}{dt}\sigma + \sigma^2 q = 0$, в котором $q = \left[1 + \frac{1}{2}\left(\rho c^2\right)_p\right] > 0$. Решение задачи Коши имеет вид $\sigma = \frac{\sigma_0}{qt\,\sigma_0 + 1}$. Так как по физическому содержанию задачи $0 < q$, то градиентная катастрофа может наступить, если $\sigma_0 < 0$.

Клиновидный канал, жидкость несжимаема. В этом случае (1) имеет вид: $\frac{d}{dt}\sigma + \sigma \frac{1}{2(t + \xi / c_0)} + \sigma^2 q = 0$. (3)

Решением этого уравнения является функция

$$\sigma(t) = -\frac{\sigma_0\, c_0 \sqrt{\xi}}{-2\, q\, \sigma_0 \sqrt{\xi}\, t\, c_0 - 2\, q\, \sigma_0\, \xi^{(3/2)} - \sqrt{t\, c_0 + \xi}\; c_0 + 2 \sqrt{t\, c_0 + \xi}\; q\, \xi\, \sigma_0}.$$

Градиентная катастрофа произойдет в момент времени $t^* = \frac{c_0 - 4q\xi\sigma_0}{4q^2\sigma_0^2\xi}$ если $\sigma_0 < 0$ в точке с координатой $x^* = c_0 t^* + \xi$.

Конический канал. В этом случае уравнение (1) примет вид

$$\frac{d}{dt}\sigma + \sigma \frac{1}{(t + \xi / c_0)} + \sigma^2 q = 0. \qquad (4)$$

Общее решение этого уравнения описывается следующим выражением
$\sigma(t) = \sigma_0 \xi c_0 / (q\, ln(tc_0 + \xi)\, \xi \sigma_0 t c_0 + q\, ln(tc_0 + \xi)\, \xi^2 \sigma_0 + tc_0^{\,2} + c_0 \xi - \xi \sigma_0 q\, ln(\xi)\, tc_0 - \xi^2 \sigma_0 q\, ln(\xi))$
Градиентная катастрофа произойдет на характеристике $x = c_0 t + \xi\sigma$ в момент времени $t^* = \xi\left\{\exp\left[-c_0 / (q\xi\sigma_0)\right] - 1\right\} / c_0$, если $\sigma_0 < 0$.

Эффекты нелинейности и направление волны относительно сужения (расширения) клиновидного и конического каналов. В уравнениях (3, 4) считается, что каналы расширяются при росте осевой координаты . Это означает, что градиентные катастрофы описаны в (3–4) для волн, входящих в расширяющиеся каналы. Если каналы сужаются, то в (3 и 4) изменяется знак коэффициента при σ в первой степени. С точки зрения механики нелинейные явления усиливаются при распространении волн в сужающихся каналах, поэтому в настоящей работе они опущены. В уравнении графа Риккати (2) нелинейность системы уравнений (1) учитывается в коэффициенте, при σ^2.

Возможные обобщения, выводы. В настоящей работе приведены критерии образования градиентных катастроф в расширяющихся каналах для случая, когда жидкость несжимаема. Можно заметить, что учет сжимаемости жидкости в канале несколько усложняет уравнение Риккати, но не меняет его существенно.

Методы прогнозирования градиентных катастроф в каналах с упругими стенками, основанные на теории распространения слабых разрывов, показали высокую эффективность.

Так как скорости потока жидкости в каналах и трубах значительно меньше скоростей звука и скоростей гидроупругих волн, то предложенные подходы могут быть использованы в каналах и трубах с потоком.

Так как фильтрация является медленным процессом по сравнению с распространением упругих волн, то все вышеизложенные методы и подходы могут быть использованы для исследования нелинейных гидроупругих волн в каналах гидроразрыва. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М. –Л.: Гостехиздат, 1949. – 104 с.
2. Лайтхилл Д. Волны в жидкостях. – М.: Мир, 1981. – 598 с.
3. White J.E.. Underground sound. Elsivier. – 1983. – 261 p.
4. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложения в газовой динамике. – М. Наука, 1978. – 668 с.
5. Сухинин С.В., Рымаренко К.В. Способ гидроразрыва пласта//Патент № 2447278, 25.12.2012.