

**ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ
ГЛУБИННОНАСОСНЫХ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ**

Агаев В.С.

*ГНКАР, Научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа
ilkinx@mail.ru*

Статья посвящена системному анализу технологических показателей эксплуатации глубиннонасосных нефтяных скважин, оборудованных установками СШН. Анализу подвергаются дебиты скважин по нефти, воде и газу, а также коэффициент подачи насоса. Такой анализ потребует при принятии решений по регулированию работы добывающих скважин. При этом необходимо руководствоваться динамикой изменения нужных технологических показателей в течение определенного промежутка времени. В большинстве случаев с этой целью на практике ориентируются, как правило, на абсолютные значения показателей, что является ошибочным, так как при этом содержащаяся в исходных данных ценная информация о тенденциях поведения самого управляемого объекта игнорируется. Благодаря этой информации можно прогнозировать последствия тех или иных мероприятий по регулированию режимов работы скважин и соответственно назначать такие изменения режимов, которые будут способствовать приросту добычи нефти при уменьшении темпов обводнения скважин, экономии пластовой энергии за счет рационального перераспределения расхода попутного газа и увеличению коэффициента полезного действия насосных установок. Для решения этой задачи использованы специальные критерии изменения режимов работы добывающих скважин, основанные, в частности, на применении элементов теории катастроф.

В статье на базе известных из этой теории дифференциальных уравнений, соответствующих катастрофе типа «складка», моделируется динамика изменения ряда технологических показателей, таких как дебиты по нефти, газа и воде, а также коэффициент подачи насоса. Эти показатели легко поддаются измерению и учету в промышленных условиях. После их обработки принимаются более взвешенные решения, основанные на одновременном и комплексном учете тенденций изменения наиболее важных показателей с точки зрения регулирования режимов работы скважин. Описывается алгоритм расчета и приводится конкретный численный пример.

Данная расчетная схема компьютеризирована и используется для многочисленных добывающих скважин предприятий производственного объединения «Азнефть».

Ключевые слова: модель, скважина, дифференциальное уравнение, дискриминант, скважинный насос, коэффициент подачи насоса, регулирование технологического режима, теория катастроф, уравнение регрессии, технологические показатели, критерий, системный подход, корреляция, алгоритм, накопленная добыча

С использованием методов системного анализа известные средства теории катастроф создают благоприятные предпосылки для принятия решений при регулировании технологического режима работы нефтяных скважин. При этом изменения динамики добывных возможностей скважин должны подвергаться анализу

как в совокупном состоянии, так и каждое в отдельности. Только лишь анализом заданных временных рядов может быть добыта та необходимая информация, по которой принимается адекватное управленческое решение.

Для анализа динамики больших систем, куда можно отнести как всю разрабатываемую нефтяную залежь, так и каждую скважину в отдельности, эксплуатируемые со сложным оборудованием и установками, как правило, используются некоторые обыкновенные дифференциальные уравнения, соответствующие катастрофе типа «складка» [1,3]:

$$\frac{dQ_{ij}}{dt} = A_j Q_{ij}^2 + B_j Q_{ij} + C_j \quad (1)$$

Здесь Q_{ij} – накопленное значение j – ого технологического показателя ($j = 1, 2, 3$ и более), соответствующее i – ему моменту времени; A_j, B_j, C_j – постоянные параметры, характеризующие состояние j – ого показателя; t – текущее время.

В практических расчетах обычно обрабатываются данные, заданные ежемесячно, т.е. $i = 1, 2, \dots, N$. Алгоритм моделирования системы (1) состоит из ниже следующих этапов:

— вводится массив месячных значений дебитов скважины по нефти, газу и воде для i -ого момента времени, обозначаемых обобщенно в виде q_i ;

— последовательным суммированием этих дебитов обрабатывается данный массив, и рассчитываются накопленные значения показателей Q_k , относящиеся к моментам времени k :

$$Q_k = \sum_{l=1}^k q_l, \quad k=2, 3, \dots, N-1. \quad (2)$$

— Дискретные значения производных, входящих в левую часть уравнения (1) вычисляются следующим образом:

$$Q'_k = \frac{\sum_{l=1}^{k+1} q_l - \sum_{l=1}^k q_l}{2 * h}, \quad k = 2, 3, \dots, N-1. \quad (3)$$

Здесь h – шаг по времени. В расчетах принято $h = 1$ месяц.

— Формируются массивы накопленных величин и их производных по всем исследуемым показателям.

— Обработкой этих массивов по методу наименьших квадратов оцениваются постоянные коэффициенты A , B , C , соответствующие всем рассматриваемым показателям:

$$\begin{cases} A \sum_{k=2}^{N-1} Q_k^4 + B \sum_{k=2}^{N-1} Q_k^3 + C \sum_{k=2}^{N-1} Q_k^2 = \sum_{k=2}^{N-1} Q_k^1 Q_k^2 \\ A \sum_{k=2}^{N-1} Q_k^3 + B \sum_{k=2}^{N-1} Q_k^2 + C \sum_{k=2}^{N-1} Q_k = \sum_{k=2}^{N-1} Q_k^1 Q_k \\ A \sum_{k=2}^{N-1} Q_k^2 + B \sum_{k=2}^{N-1} Q_k + C(N-2) = \sum_{k=2}^{N-1} Q_k^1 \end{cases} \quad (4)$$

— По оценкам этих коэффициентов рассчитываются значения дискриминантных функций по всем показателям в отдельности:

$$\Delta = B^2 - 4A \cdot C. \quad (5)$$

— По знакам Δ определяется характер возможных изменений соответствующих показателей [1-3]:

1. если $\Delta < 0$, то возможен неограниченный рост показателя;
2. если $\Delta > 0$, то наблюдается ограниченный рост показателя;
3. если $\Delta = 0$, то ситуация остается неопределенным и потребуются прибегать к дополнительному анализу данного показателя с использованием других критериев. В качестве таких внешних дополнений могут быть водо-, газонефтяной факторы и др. технологические показатели.

Для реализации данной расчетной схемы использованы данные, относящиеся к периоду эксплуатации скважины № 3672 нефтедобывающего предприятия «Бибийбатнефть» ПО «Азнефть» с 01.01.2008 г. по 01.03.2009 г. В данной скважине, эксплуатируемой штанговой глубиннонасосной установкой, было запланировано проведение мероприятий по регулированию режима ее работы. Поэтому, для определения подходящего момента времени по реализации этих мероприятий использован вышеуказанный алгоритм.

В обработку промыслового материала наряду с данными по добыче нефти, газа и воды также была включена информация по динамике изменения коэффициента подачи насоса в рамках отмеченного выше периода эксплуатации. Это обстоятельство вызвано практической необходимостью улучшения режима работы не только добывных возможностей самой скважины, но и также спущенного в нее скважинного штангового насоса (СШН). Возможность подключения к описанной

расчетной схеме дополнительных показателей с целью последующего их анализа говорит о пригодности данного алгоритма при принятии решений для более широких постановок задач регулирования.

Динамика изменения добычи нефти из скважины за 14 месяцев ее эксплуатации приведена в табл. 1. По данным этой таблицы для всех временных шагов рассчитываются величины, включенные в графы $\sum q_n$, $(\sum q_n)'$ и $(\sum q_n)^2$ табл. 2.

Таблица 1

Показатель	Месяцы													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Добыча нефти q_n , т	61,0	61,0	63,0	43,0	43,0	45,0	37,0	5,00	8,00	12,0	3,00	9,50	15,0	8,00

Таблица 2

Показатели	Шаги по времени												
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
$\sum q_n$	121,8	184,8	228,0	271,8	316,8	354,3	359,3	367,3	379,8	382,8	392,3	407,3	
$(\sum q_n)'$	61,95	53,25	43,50	44,25	41,25	21,25	6,50	10,25	7,75	6,25	12,25	11,50	
$(\sum q_n)^2$ 10^4	1,483	3,415	5,212	7,387	10,03	12,55	12,91	13,49	14,43	14,65	15,39	16,59	

На основе этих промежуточных результатов решается система линейных относительно коэффициентов A , B , C уравнений (4) и находится нижеследующие регрессионное уравнение:

$$(\sum q_n)' = -4,311 \cdot 10^{-4} (\sum q_n)^2 + 2,508 \cdot 10^{-2} (\sum q_n) + 64,61; R^2 = 0,898 \quad (6)$$

где коэффициенты $A = -4,311 \cdot 10^{-4}$, $B = 2,508 \cdot 10^{-2}$, $C = 64,61$, а R – коэффициент множественной корреляции.

Дискриминантная функция при этом принимает значение $\Delta = B^2 - 4A \cdot C = 0,112 > 0$, что говорит о вероятном появлении на данной скважине состояния с ограниченным ростом по добыче нефти.

Данные по отбору воды и газа из этой скважины приведены соответственно в табл. 3 и табл. 4.

Таблица 3

Показатель	Месяцы													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Добыча воды q_w , $10m^3$	23	23	24	49	49	51	42	17	16	25	6,0	8,5	10	7,2

Таблица 4

Показатель	Месяцы													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Добыча газа q_g , $10^2 m^3$	8,99	8,99	9,30	8,99	8,99	9,30	7,75	3,10	4,96	7,75	1,86	5,89	4,65	4,96

Входящие в систему (4) величины, зависящие от значений накопленной добычи воды и газа и соответствующих производных, отражены в табл. 5-6.

Таблица 5

Показатели	Шаги по времени											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\sum q_w$	458,2	695,2	1188	1681	2191	2616	2791	2951	3201	3261	3347	3452
$(\sum q_w)'$	233,0	365,0	493,0	501,5	467,5	300,0	167,5	205,0	155,0	72,75	95,25	88,50
$(\sum q_w)^2$ 10^4	21,00	48,33	141,2	282,6	480,1	684,4	779,0	870,9	1025	1063	1120	1191

Таблица 6

Показатели	Шаги по времени											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\sum q_z$	1798	2728	3627	4526	5456	6231	6541	7037	7812	7998	8587	9052
$(\sum q_z)'$	914,5	914,5	899,0	914,5	852,5	542,5	403,0	635,5	480,5	387,5	527,0	480,5
$(\sum q_z)^2$ 10^4	323,2	744,2	1316	2048	2976	3882	4278	4952	6103	6397	7374	8194

Полученные в соответствии с (1) регрессионные уравнения для темпов изменения добычи воды и газа и соответствующие им оценки параметров A , B , C , а также вычисленные по ним значения дискриминантов приводятся ниже:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\sum q_e)' = -1,337 \cdot 10^{-4} (\sum q_e)^2 + 4,337 \cdot 10^{-1} (\sum q_e) + 1,147 \cdot 10^2 \\ R^2 = 0,889; A = -1,337 \cdot 10^{-4}; B = 4,337 \cdot 10^{-1}; C = 1,147 \cdot 10^2 \\ \Delta = 0,249 > 0; \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (\sum q_z)' = -1,193 \cdot 10^{-6} (\sum q_z)^2 + 6,705 \cdot 10^{-2} (\sum q_z) + 1,11 \cdot 10^3; \\ R^2 = 0,748; A = -1,193 \cdot 10^{-6}; B = 6,705 \cdot 10^{-2}; C = 1,11 \cdot 10^3 \\ \Delta = 0,0098 > 0; \end{array} \right.$$

Динамика изменения коэффициента подачи насоса, спущенного в скважину, приведена в табл. 7. По этим данным для последующей обработки их в соответствии с системой уравнений (4) необходимо произвести определенные вычисления и заполнить табл. 8.

Таблица 7

Показатель	Месяцы													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Кэфф. подачи насоса $K_{нас}$	0,80	0,80	0,80	0,82	0,82	0,82	0,82	0,80	0,46	0,46	0,46	0,40	0,64	0,40

Таблица 8

Показатель	Шаги по времени											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\sum k_{нас}$	1,60	2,40	3,22	4,04	4,86	5,68	6,48	6,94	7,40	7,86	8,26	8,90
$(\sum k_{нас})'$	0,80	0,81	0,82	0,82	0,82	0,81	0,63	0,46	0,46	0,43	0,52	0,52
$(\sum k_{нас})^2$	2,56	5,76	10,37	16,32	23,62	32,26	41,99	48,16	54,76	61,78	68,23	79,21

Обработкой этих таблиц получен регрессионный аналог уравнения (1) относительно коэффициента подачи насоса:

$$(\sum k_{нас})' = -7,93 \cdot 10^{-3} (\sum k_{нас})^2 + 2,429 \cdot 10^{-2} (\sum k_{нас}) + 8,155 \cdot 10^{-1}, \quad (8)$$

где $A = -7,93 \cdot 10^{-3}$, $B = 2,429 \cdot 10^{-2}$, $C = 8,155 \cdot 10^{-1}$, $R^2 = 0,763$.

Рассчитанная по известным коэффициентам A , B , C величина дискриминанта $\Delta = 0,0264 > 0$, что говорит о вероятном появлении состояния с ограниченным ростом относительно коэффициента подачи насоса.

Таким образом, при регулировании режима работы рассмотренной скважины форсированный отбор жидкости из нее не создает благоприятные условия для увеличения добычи нефти. Поэтому, принятие такого решения при регулировании, очевидно, не приведет к желаемому результату. При этом, несмотря на ожидаемое появление состояния ограниченного роста по добыче газа и воды, увеличение величины коэффициента подачи СШН так же становится маловероятным. Следовательно, данная расчетная схема позволяет принимать более взвешенное решение за счет одновременного и комплексного учета тенденций изменения наиболее важных технологических показателей с точки зрения регулирования режимов работы добывающих скважин. При регулярной обработке (в масштабе реального времени) поступающей промысловой информации предложенный алгоритм позволяет также определить благоприятные моменты времени для проведения того или иного мероприятия по регулированию.

Литература

1. Мирзаджанзаде А.Х., Шахвердиев А.Х. Динамические процессы в нефтегазодобыче: Системный анализ, диагноз, прогноз. – М.: Наука, 1997. – 254 с.
2. Мирзаджанзаде А.Х. Принятие решений в газодобыче. – М.: ЦП НТО НГП, 1987. – 46с.
3. Постон Тим, Стюарт Иэн. Теория катастроф и ее приложения. –М.: Мир, 1980. –607 с.