

Д.А. Говорков, Д.А. Власов

## ТЕХНОЛОГИЯ ВИЗУАЛЬНО-ГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГИДРОДИНАМИКИ СКВАЖИННОЙ СИСТЕМЫ

*Представлен один из вариантов построения системы визуально-графического анализа гидродинамики скважины с погружным насосом, ориентированной на использование в технологиях автоматизированного контроля эксплуатации скважин.*

***Скважинные системы, погружной насос, разгазирование, интерфейс оператора, наблюдатель.***

Используемые в современной практике системы анализа и расчета характеристик скважин с погружным электронасосом могут быть разделены на две основные группы в зависимости от объекта описания:

- модели и методы описания гидродинамики притоков для призабойных или прискважинных зон [1] — используются для расчета обратных задач по оценке фильтрационно-емкостных параметров призабойных зон скважин (коэффициент продуктивности, пьезопроводность, среднепластовое давление на контуре питания).
- модели численного анализа гидравлики подъемников [2] — для решения задач проектирования и обслуживания СС (подбор и комплектация погружных систем, расчет глубины подвески, анализ чувствительности режимных параметров системы к вариациям пластовых условий и т.п.).

Создание технологии анализа и управления скважинной системой в реальных условиях эксплуатации (в реальном времени) предполагает совместный учет одновременно действующих факторов пласта, скважины и насоса, что возможно только при корректном модельном описании всех основных динамических процессов системы. В этом смысле непосредственное объединение моделей двух вышеуказанных групп неэффективно. Более продуктивно использование физической модели, описывающей в динамике единую структуру типа «пласт-скважина-насос». Однако это подразумевает переход от пространственно-распределенного описания к осредненным (агрегированным) величинам. Кроме того, необходимо иметь в виду, что некоторые объекты системы обладают нелинейными характеристиками. Предлагаемая в данной работе технология анализа гидродинамики СС базируется на оригинальной физической модели [3], учитывающей перечисленные особенности следующим образом:

- пространственные состояния системы представляются в виде конечномерных аппроксимаций;
- нелинейные связи и законы аппроксимируются кусочно-линейными зависимостями;
- корректно производится построение адекватной конечномерной системы алгебраических и дифференциальных уравнений во временной области.

Принятие данных допущений позволяет выделить пространственные сектора скважины и пласта, характеризующиеся параметрами и переменными, отражающими основные свойства и процессы в этих секторах:

- 1) пласт и призабойная зона (ПЗ) пласта;
- 2) затрубное пространство (ЗТ) скважины от уровня подвески насоса до забоя;

3) участки ЗТ и насосно-компрессорной трубы (НКТ) от уровня подвески насоса до устья.

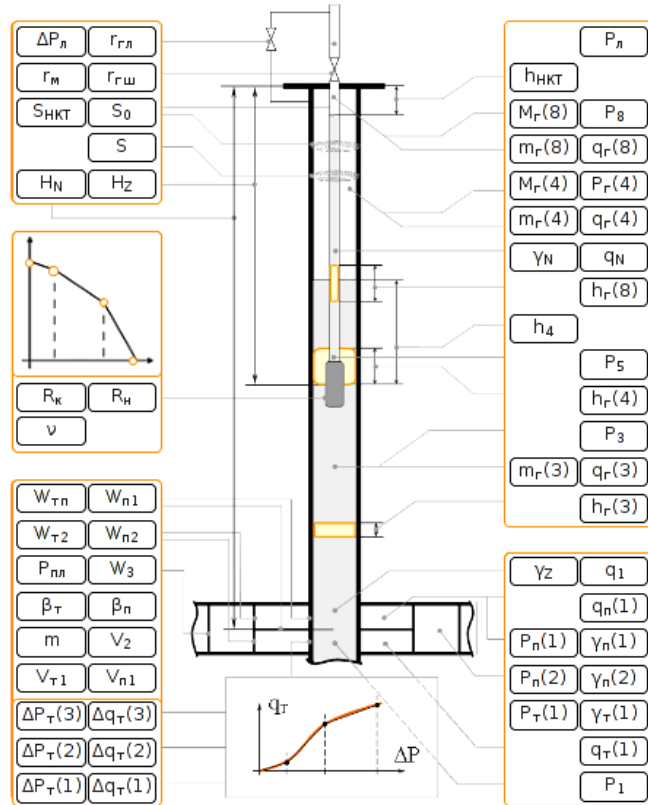


Рис. 1. Структурная схема скважины с погружным насосом

Помимо пространственного деления, группировку основных параметров удобно проводить по структурно-функциональному признаку (рис. 1):

а) конструкционные параметры, включающие глубины забоя —  $H_z$  и подвески насоса —  $H_N$ , площади сечения ЗТ —  $S$  и площадь НКТ —  $S_{НКТ}$ ;

б) модель насоса задается в виде кусочно-линейной аппроксимации напорной характеристики ( $\langle h_N(l), q_N(l) \rangle$ ), где  $h_N(l)$  — напор,  $q_N(l)$  — дебит,  $l$  — номер точки аппроксимации), кроме того, учитываются нережимные свойства работы насоса, в частности — возможное стравливание жидкости из НКТ за счет негерметичности обратного клапана (гидросопротивления прямому —  $r_H$  и обратному —  $r_K$  движению жидкости);

в) параметры забоя и призабойной зоны (ПЗ) пласта. Для моделирования свойств ГРП призабойная зона скважины разбивается на два участка, один из которых воспроизводит свойства фильтрации, характерной для трещиноватых коллекторов (ярко выраженная нелинейная диаграмма притока). Соответственно для каждого из участков ПЗ задаются свои коэффициенты гидропроводности  $w$ . (в том числе в виде кусочно-постоянных параметров для нелинейного притока — точки аппроксимации: депрессия —  $\Delta p_T(l)$ , приток —

$q_T(l)$ ), коэффициенты упругоэластичности участков —  $\beta_*$ , равно как и их объемы —  $V_*$ . К общепластовым условиям относят коэффициент пористости —  $m$  и среднепластовое давление —  $p_{пл}$ .

г) кроме того, задается ряд параметров, характеризующих проявление газового фактора: давление насыщения —  $p_{НС}$ , собственно газовый фактор —  $G_0$ , обводненность —  $\beta$ , объемный коэффициент нефти —  $b_H$ , удельные веса нефти, воды и газа. Также настраиваются параметры, характеризующие эффект «газлифта» и динамику газовых проявлений в подъемнике.

Разбиение параметров на группы производится по их принадлежности к выделенным секторам пласта и скважины (рис. 1):

1) давление в ПЗ —  $p(2,t)$  (для зоны с трещиноватостью коллектора —  $p_T(2,t)$ ), изменение удельного веса флюида в различных зонах пласта —  $\gamma_{П}(t)$ ,  $\gamma_T(t)$ , зональные перетоки жидкости —  $q_1(t)$ ,  $q_*(1,t)$ ;

2) давление в забое —  $p(1,t)$  и на приеме насоса —  $p(3,t)$ , удельный вес жидкости в забое —  $\gamma_Z(t)$ ;

3) давление газа в ЗТ и давление перед выпускным штуцером в НКТ —  $p(4,t)$ ,  $p(8,t)$ , динамические уровни в ЗТ и НКТ —  $h(4,t)$ ,  $h_{НКТ}(t)$ , процесс откачки жидкости насосом —  $q(t)$ , удельный вес жидкости в НКТ —  $\gamma_N(t)$ .

Дополнительно выделяются зоны подъемника, характеризующиеся переменными динамического разгазирования, описывающими процессы разгазирования и связанный с ними эффект «газлифта», выраженного в изменении плотности газожидкостной смеси (ГЖС) при истечении газа через жидкость:

1) ЗТ от уровня давления насыщения до насоса ( $i = 3$ );

2) барбадаж в ЗТ ( $i = 4$ );

3) НКТ уровня давления насыщения до устья ( $i = 8$ ).

Переменные имеют обозначения: весовые и объемные расходы газа —  $m_T(i,t)$ ,  $q_T(i,t)$ , эквивалентные объемы (высоты) газовых «пустот» —  $h_T(i,t)$ .

Синхронное моделирование динамических состояний системы позволяет воспроизводить взаимодействие основных процессов, относящихся к различным по свойствам (и методам описания) группам моделей: подъемника и пласта. Так, гидравлическая модель подъемника, описывающая динамику изменения объемов жидкости в ЗТ и НКТ, динамику разгазирования в различных секторах скважины (через массовые расходы газа), согласуется с процессами перераспределения давления и изменением свойств флюида в пласте. При таком подходе становится возможным в любой момент времени рассчитывать различные характеристики системы «пласт-скважина-насос»:

- диаграмму распределения давления в ЗТ и НКТ (от забоя до устья);

- объемное содержание газа в выделенных секторах (объемные расходы —  $q_T(i,t)$ );

- явление разгазирования и связанные с ним эффекты «газлифта» (в частности — уменьшение удельного веса ГЖС в выделенных секторах), учитываемые путем введения эквивалентного динамического объема пустот (высоты газовых пустот —  $h_T(i,t)$ ).

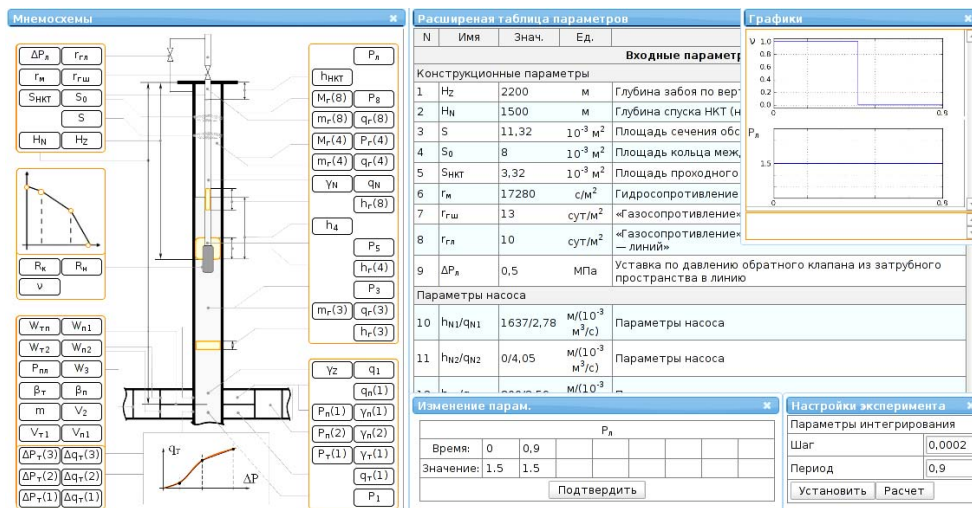
Представленные параметры и переменные единой динамической модели «пласт-скважина-насос» образуют полный набор данных, описывающий модельный аспект рассматриваемой технологии анализа гидродинамики СС.

Собственно анализ включает два основных этапа: имитационное моделирование и решение обратной задачи оценки. Остановившись пока на первом, заметим, что наибольшую ценность в плане оценки различных гидродинамических характеристик скважины и пласта представляют данные о переходных процессах как реакции на изменение управляющих воздействий. Полный вектор управления, поддерживаемый данной моделью, выглядит следующим образом:

- 1) пуско-остановочный режим —  $u(t)$ ;
- 2) относительная частота вращения вала насоса —  $v_{\omega}(t)$ ;
- 3) гидросопротивление устьевого штуцера (по жидкости —  $r_{ш}(t)$ , по газу —  $r_{ГШ}(t)$ );
- 4) гидросопротивление перехода «ЗТ — линия» для газовой фазы —  $r_{ГЛ}(t)$ ;
- 5) давление в линии —  $p_{л}(t)$  и уставка по сбросу давления из ЗТ —  $\Delta p_{л}(t)$ .

Таким образом, еще одной особенностью представленной модели является возможность воспроизводить динамические реакции на изменение по времени управляющих воздействий, заданных в любой форме.

На первом этапе реализации заявленной технологии анализа был создан программно-графический интерфейс имитационного моделирования гидродинамических состояний скважинной системы (рис. 2).



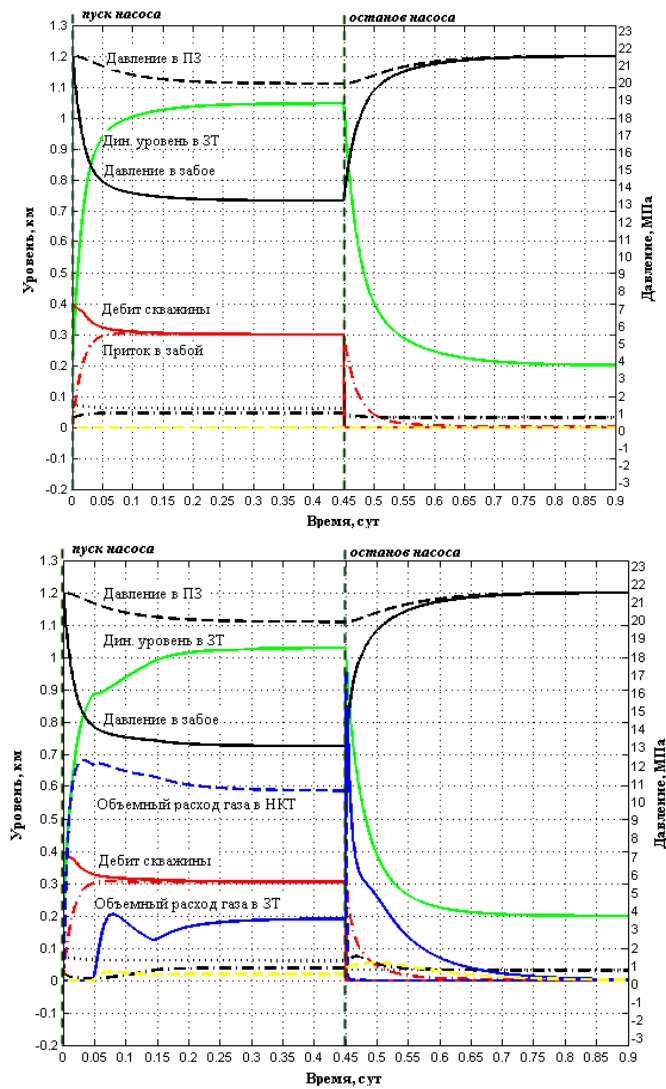
**Рис. 2.** Экран интерфейса имитационного моделирования гидродинамических состояний скважинной системы

В данном интерфейсе реализуются все возможности моделирования переходных процессов в скважине, при этом учитывается действие так называемых осложняющих факторов эксплуатации:

- 1) стравливание жидкости из НКТ из-за негерметичности обратного клапана насоса на режиме останова, процесс заполнения НКТ при пуске;
- 2) влияние разгазирования, эффект «газлифта»;
- 3) моделирование нелинейного притока для зоны с трещиноватостью коллектора.

В качестве примера работы интерфейса на конечном этапе моделирования приводим графики переходных процессов режимов пуска и останова для

скважины, не осложненной проявлением эффекта разгазирования и с учетом этого эффекта в динамике (рис. 3). Как видно, выделение газа в затрубном пространстве с ростом притока в забой возрастает, увеличение объема газа в ЗТ приводит к «разбуханию» столба жидкости, что хорошо прослеживается по графику динамического уровня. Кроме того, при останове скважины, в условиях все еще существенного притока из забоя, происходит увеличение объемного расхода газа в ЗТ с последующим его падением согласно динамике притока. Это приводит к искажению динамики восстановления уровня ГЖС в забое, что может быть неверно интерпретировано при анализе скважины по КВУ.



**Рис. 3.** Графики переходных процессов в скважине с учетом динамики разгазирования

В заключение отметим, что возможности рассмотренной технологии анализа гидродинамики скважиной системы с погружным насосом не исчерпыва-

ются только имитационным моделированием и последующим анализом графиков переходных режимов. В качестве основных направлений применения данной технологии можно выделить:

1) синхронное моделирование процессов в реальном режиме эксплуатации — по данным прямых измерений воспроизводятся недоступные для измерения глубинные параметры — приток в забой, давления в ПЗ и забое и т.д. (так называемая технология наблюдателя в реальном времени [4]);

2) новые методики решения обратных задач ГДИС, в частности — методы параметрической идентификации с использованием данных измерений переходных процессов на устье (без вмешательства в нормальный режим эксплуатации, фиксируются любые переходные режимы, обусловленные произвольными по форме изменениями управляющих воздействий, алгоритм идентификации функционирует в реальном времени, используется накопление данных) [5].

3) диагностика и прогноз изменений различных характеристик системы: дрейф параметров насоса, забивка НКТ и приемной сетки насоса, изменение продуктивности пласта (по гидропроводности и пластовому давлению) и т.д. [6].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бузинов С.Н., Умрихин И.Д. Исследование нефтяных и газовых скважин и пластов. М.: Недра, 1984. 269 с.
2. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти / Под ред. Ш.К. Гиматудинова. М.: Недра, 1983. 455 с.
3. Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Фомин В.В. Модель и динамика переходных режимов нефтяных скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2008. № 6.
4. Luenberger D.G. An Introduction to Observers. IEEE Trans. On AC, 12, 1971.
5. Соловьев И.Г., Говорков Д.А. Идентификация гидродинамических параметров скважины, оборудованной погружным насосом с наблюдателем процесса разгазирования нефти в подъемнике: (Основы методики I) // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2009. № 3. С. 28–33.
6. Фомин В.В. Вопросы обустройства и управления электронасосной скважиной с нестационарной продуктивностью // Материалы Междунар. акад. конф. «Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири». Тюмень, 2009.

*D.A. Govorkov, D.A. Vlasov*

### *TECHNOLOGY OF VISUAL-AND-GRAPHIC HYDRODYNAMICS ANALYSIS OF A WELL SYSTEM*

*Subject to presentation being one of the variants to construct a system of visual-and-graphic analysis of hydrodynamics for a well with a submersible pump, oriented at using in technologies of automatic control of well operation.*

***Well systems, submersible pump, degassing, operator's interface, observer.***