

Д. А. Говорков

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ СКВАЖИН И ПЛАСТОВ

*Рассматриваются основные методы гидродинамических исследований скважин, технология их проведения и анализа результатов. Отмечены достоинства и недостатки методов, пути их развития. Предложен способ анализа гидродинамических состояний скважин с использованием метода наименьших квадратов (МНК) в качестве алгоритма идентификации модели «пласт — призабойная зона — скважина» с оценкой переходных процессов в скважине на основе устьевых измерений в режиме нормальной эксплуатации.*

К гидродинамическим исследованиям принято относить весь комплекс мероприятий, направленных на измерение ряда параметров скважины (давление, температура, расход, время и др.) на установившихся и не установившихся режимах ее работы. Основные цели гидродинамических исследований:

- определение параметров призабойной зоны скважины и пласта;
- определение свойств насыщающих залежь флюидов;
- определение параметров фильтрации флюидов и основных характеристик скважин, в том числе коэффициенты проницаемости и пьезопроводности;
- контроль запаса выработки углеводородов.

Различают два основных метода гидродинамических исследований скважин — на стационарных и на не установившихся режимах работы.

### Исследование скважин на стационарных режимах работы

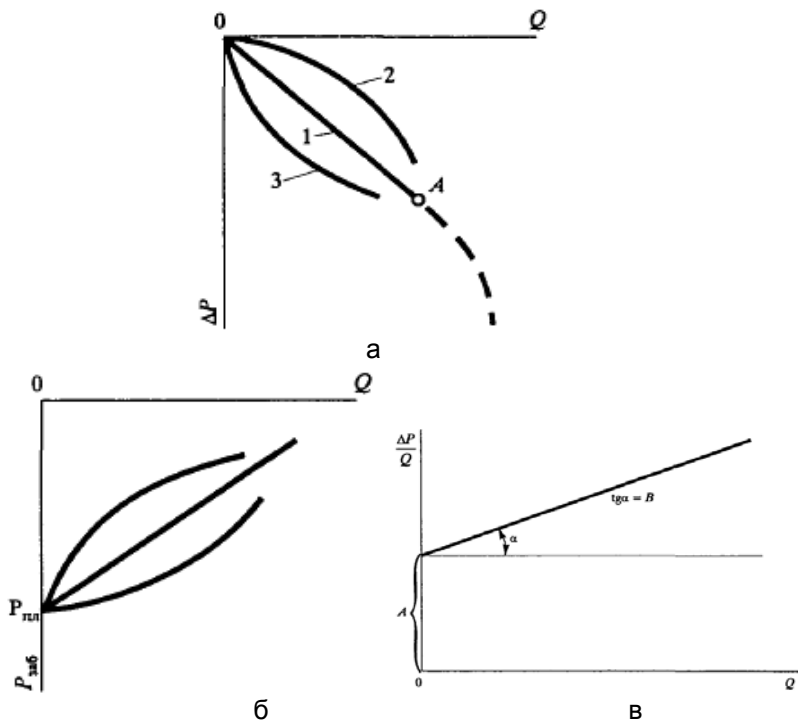
Технология исследования по данному методу предполагает спуск глубинного манометра и замер забойного давления в различных по характеристикам, но обязательно установившихся режимах работы. Основной целью исследования на установившихся отборах является построение индикаторной диаграммы (индикаторной линии) скважины. Индикаторной диаграммой скважины называется графическая зависимость установившегося дебита от депрессии (забойного давления),  $Q = f(\Delta P)$  — при известном пластовом давлении (рис. 1а),  $Q = f(P_{\text{заб}})$  — при неизвестном пластовом давлении (определяется путем экстраполяции индикаторной линии до значения  $q = 0$ ) (рис. 1б).

Прямолинейная индикаторная диаграмма (рис. 1а, линия 1) получается при режиме фильтрации, описываемом законом Дарси:

$$Q = \frac{2\pi kh}{\mu \ln \frac{R_k}{r_c}} \cdot (P_{\text{пл}} - P_{\text{заб}}). \quad (1)$$

На практике чаще всего получают диаграммы с искривлением в сторону оси депрессий (режим истощения) или в сторону оси дебитов (действие различных участков залежи с различной проницаемостью [6]; действие не установившихся режимов фильтрации), обобщенное уравнение притока имеет вид:

$$Q = k \cdot (P_{\text{пл}} - P_{\text{заб}})^n.$$



**Рис. 1.** Типичные индикаторные диаграммы скважин:  
 а — в координатах  $Q = f(\Delta P)$ ; б — в координатах  $Q = f(P_{\text{заб}})$ ;  
 в — в координатах «  $\frac{\Delta P}{Q} - Q$  »

Для анализа сложных индикаторных кривых используют интерпретацию кривой зависимостью вида:  $\frac{\Delta P}{\Delta l} = \frac{\mu}{k} \cdot v + b \cdot v^2$ , где  $v = \frac{Q}{F}$  — скорость фильтрации;  $b$  — коэффициент, характеризующий пористую среду и флюид. Итоговое выражение для расчета по сложным индикаторным прямым имеет вид:

$$\frac{\Delta P}{Q} = A + B \cdot Q, \quad (2)$$

где  $A = \frac{\mu}{k} \cdot \frac{\Delta l}{F}$ ,  $B = \frac{b \cdot \Delta l}{F^2}$ . Изменение формы индикаторной линии объясняется наличием дополнительных факторов влияния на режим фильтрации:

образованием области с двухфазной фильтрацией, изменением проницаемости, изменением скорости движения жидкости в пласте, различным по времени вступлением в режим фильтрации разных прослоев или пропластков залежи [3].

При исследовании скважин методом установившихся отборов за  $R_k$  обычно принимают радиус зоны дренирования данной скважины, равный половине

среднего расстояния до ближайшей скважины. В этом случае давление на границе рассматриваемого контура питания будет ниже, чем  $P_{шт}$ , что также вносит неточность в расчеты коэффициента проницаемости [4].

Существенным недостатком метода исследования скважин по индикаторным диаграммам является необходимость в замерах давления на установившихся режимах работы, что означает длительный интервал времени выдержки скважины в заданном режиме. К тому же процесс исследования предполагает вывод скважины из режима нормальной эксплуатации и применения глубинного оборудования, требующего значительных эксплуатационных затрат.

### Исследование скважин на нестационарных режимах работы

В основе исследований скважин на нестационарных режимах работы лежит получение и анализ кривой восстановления давления (КВД) — зависимость забойного давления по времени после изменения режима работы скважины.

Рассматривается решение уравнения пьезопроводности для задачи притока упругой жидкости к скважине в бесконечном упругом пласте после ее

внезапной остановки [3]: 
$$\Delta P(r, t) = -\frac{Q\mu b_n}{4\pi kh} \cdot \int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2}{4\chi t}}}{\tau} dt = -\frac{Q\mu b_n}{4\pi kh} \cdot E_i\left(-\frac{r^2}{4\chi t}\right) —$$

изменение давления в упругом пласте в точке, удаленной от точки возмущения на расстояние  $r$  через время  $t$  ( $\chi = \frac{k}{\mu b}$  — коэффициент пьезопроводности,

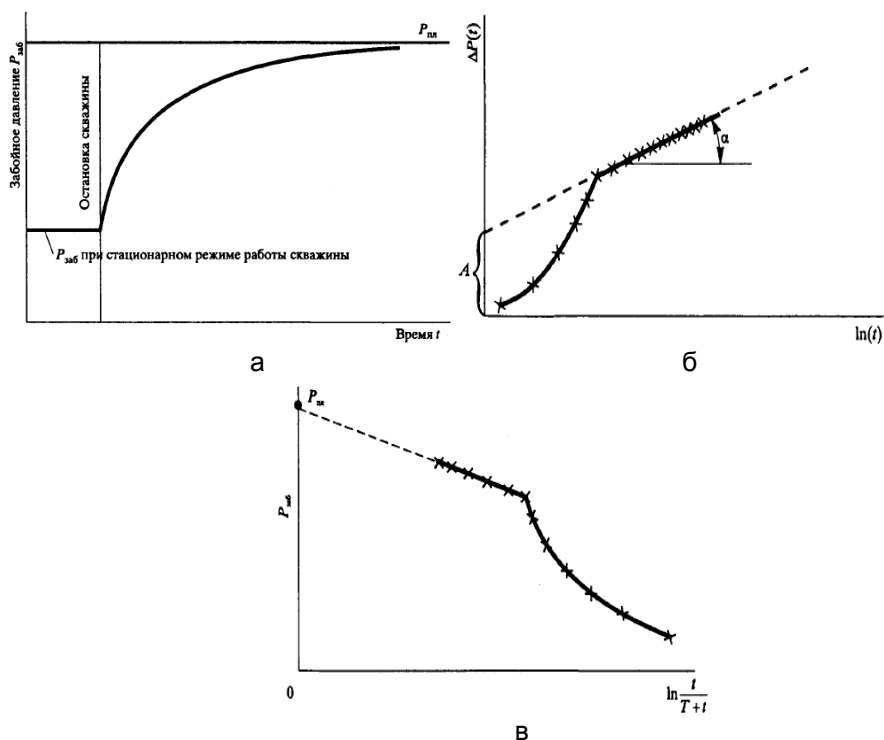
характеризующий способность пласта к передаче возмущений, вызванных изменением режима работы скважин). В данном уравнении  $r = r_c$ ,  $\Delta P(r_c, t)$  — изменение давления на стенке скважины при пуске скважины с постоянным дебитом  $Q$  или ее останов после работы с дебитом  $Q$ . Для практических исследований данную формулу упрощают с использованием разложения в ряд Тейлора (формула М. Маскета):

$$\Delta P(t) = -\frac{Q\mu b_n}{4\pi kh} \cdot \ln\left(\frac{2,25\chi t}{r_{пп}^2}\right). \quad (3)$$

Перед исследованием скважины (при работе ее на стационарном режиме) измеряется дебит скважины. В работающую скважину спускают на забой глубинный манометр. После контроля стационарности режима работы скважину закрывают на устье. Манометр, находящийся на забое и зафиксировавший забойное давление при стационарном режиме работы, после остановки скважины регистрирует так называемую кривую восстановления забойного давления (КВД) (рис. 2а).

Для анализа КВД по формуле (3) ее линеаризуют следующим образом:

$$\Delta P(t) = \frac{Q\mu b_n}{4\pi kh} \cdot \ln\left(\frac{2,25\chi}{r_{пп}^2}\right) + \frac{Q\mu b_n}{4\pi kh} \ln t. \quad (4)$$



**Рис. 2.** Вид сложных индикаторных диаграмм скважин:  
 а — КВД; б — КВД в координатах «  $\Delta P(t) - \ln t$  »;  
 в — КВД в координатах «  $\Delta P(t) - \ln \frac{t}{T+t}$  »

По КВД, построенной в координатах «  $\Delta P(t) - \ln t$  » (рис. 2б), определяют тангенс угла  $\alpha$  и отрезок  $A$ , численные значения которых равны слагаемым в уравнении (4). Затем по известным  $Q$ ,  $b$  и измеренному тангенсу угла  $\alpha$  определяется коэффициент гидропроводности  $\frac{kh}{\mu}$ , по значению длины отрезка

$A$  — приведенный радиус скважины. Необходимым условием для работы по данному методу является достаточная длительность выдержки скважины на стационарном режиме работы до начала исследования ( $T \gg t$ , где  $t$  — время исследования). При невозможности соблюдения данного условия используют метод Хорнера — построение КВД в координатах «  $\Delta P(t) - \ln \frac{t}{T+t}$  » (рис. 2в), который позволяет также оценить пластовое давление  $P_{пл}$ .

Другим существенным недостатком данного метода является нелинейность получаемых КВД, что обусловлено наличием притока продукции в скважину после ее закрытия, который не учитывается формулой (4). Приток флюида в скважину происходит при разности давлений в скважине и призабойной зоне вследствие сжимаемости ГЖС при увеличении забойного давле-

ния, а также из-за инерционности масс жидкости в скважине. Таким образом, формула (4) не учитывает динамику наполнения скважины жидкостью после ее остановки на устье.

Есть большое количество методик, позволяющих косвенно учитывать приток в скважину после ее остановки. Среди них выделяют дифференциальные и интегральные методы.

Дифференциальный метод предложен Ю. П. Борисовым и упрощен Г. В. Щербатовым и Ф. А. Требиным в варианте, когда приток учитывается по данным регистрации забойного, межтрубного и буферного давлений. Метод предусматривает внесение поправок в ординаты фактической кривой восстановления давления с таким расчетом, чтобы получить точки, соответствующие условиям, когда нет дополнительного притока. Дифференциальный метод исследования скважин на неустановившихся режимах поразумевают разбитие процесса восстановления давления на этапы по времени, в пределах которых предполагается линейный закон изменения параметров; на каждом этапе вычисляется поправка для  $\Delta p$  [11]. Общий вид зависимости для обработки КВД по данному методу:

$$\frac{\Delta P(t)}{Q - q(t)} = \frac{\mu}{4\pi kh} \cdot \ln \left[ \frac{2,25\chi}{r_{np}^2} + \varphi(t) \right],$$

где  $\varphi(t) = \frac{Q \ln t - \sigma(t)}{Q - \sigma(t)}$ ,  $\sigma(t) = \int_0^{t-1} \frac{q(\tau)}{t - \tau} d\tau$ ,  $q(t)$  — переменный приток жидкости

в скважину после остановки.

По интегральному методу производится аналогичное дифференциальному разделение на этапы времени динамики восстановления давления, но при этом поправка каждой последующей точки происходит с учетом предыдущих шагов. Общий вид зависимости для обработки КВД по данному методу:

$$\frac{J(t)}{Qt - q} = \frac{\mu}{4\pi kh} \cdot \ln \left[ \frac{2,25\chi}{r_{np}^2} + \Psi(t) \right],$$

где  $J(t) = \int_0^t \Delta P_{заб}(t) dt$  — импульс депрессии;

$$\Psi(t) = \frac{Q \ln t - 1}{Q - q} - \frac{1}{Qt - q} \int_0^{t-1} \frac{q}{t - \tau} d\tau;$$

$q$  — суммарный по времени приток жидкости в скважину после остановки. Среди интегральных методов выделяют методы И. Д. Умрихина, И. А. Чарного и Б. А. Богачева [11].

Кроме того, существуют аналитические методы обработки КВД — как с учетом, так и без учета притока. Данные методы основаны на анализе зависимости определяемых параметров скважины от отношения площади, ограниченной КВД, к площади прямоугольника, образованного координатами  $\Delta P_{заб}(t)$  и  $t$ . При этом в методе без учета притока (метод А. Т. Горбунова и

В. Н. Николаевского [11]) рассматривается величина  $J(t) = \int_{t_1}^t \Delta P_{\text{заб}}(t) dt$  как реакция на изменение дебита; в методе с учетом притока используется соотношение  $\Psi(t) = \frac{P(t_0)}{F(t_0)}$ , где  $P(t_0), F(t_0)$  — изображения по Лапласу функций давления и дебита.

К методикам исследования скважин на неустановившемся режиме также относится гидропрослушивание — изучение особенностей распространения упругого импульса (возмущения) в пласте между различными скважинами. Согласно данной методике, в одной из скважин, называемой возмущающей скважиной, изменяют режим работы; это может быть остановка скважины, ее пуск в работу с постоянным дебитом или изменение забойного давления и дебита. После создания импульса в возмущающей скважине наблюдают за изменением давления в соседних реагирующих скважинах. Определение параметров скважины (гидропроводность и пьезопроводность реагирующей зоны в явном виде) производится по КВД реагирующей скважины. Один из методов обработки КВД при гидропрослушивании — с использованием эталонной кривой (метод Ю. П. Борисова и В. П. Яковлева [11]). В основе метода — зависимость смещения кривых реагирования в координатах  $\Delta P(t) - \ln t$  по

оси ординат при изменении коэффициента гидропроводности  $\frac{kh}{M}$  и смещения этих кривых по оси абсцисс при изменении коэффициента пьезопроводности  $\frac{r^2}{\chi}$ .

Кроме того, к гидродинамическим методам исследования скважин относят:

— дебитометрические методы — использование глубинных, позиционируемых дебитомеров для оценки степени притока из различных участков пласта по вертикали;

— термодинамические методы — использование скважинных электро-термометров, регистрирующих температуру жидкости в различные моменты времени, для оценки степени различия геотермы (зависимости температуры от глубины в стационарном, естественном режиме) и термограммы в текущем режиме работы. По этим данным и данным об общем притоке в скважину с учетом калориметрической формулы производится оценка притоков в скважину с различных пропластков.

#### **Недостатки существующих методов исследования гидродинамических состояний скважин**

1. Вид индикаторных кривых, полученных по методу установившихся отборов, отличается от теоретических данных, что обусловливается несовершенством скважины, нарушением линейного закона фильтрации и изменением физических свойств пласта и жидкости. Учет данных факторов не всегда возможен, поэтому в результате анализа полученных индикаторных кривых будут получены неточные данные.

2. Использование метода установившихся отборов предполагает строгий режим пуска-останова скважины на всем периоде исследований.

3. Использование метода прослеживания уровня предполагает определение статического уровня в скважине.

4. При исследовании скважин на нестационарных режимах работы начальный участок КВД, характеризующий приток продукции в скважину, исключается из обработки, что приводит к трудностям в аппроксимации оставшегося участка кривой. Методики анализа КВД с учетом притока в скважину используют дифференциальную зависимость приращения объемов жидкости в насосно-компрессорной трубе (НКТ) и затрубном пространстве (ЗТ), причем приток предполагается лишь за счет пласта, при этом действие газлифтного эффекта, изменение давления газовых фаз в НКТ и ЗТ за счет сепарации газа не принимаются во внимание.

5. Все вышеперечисленные методы предполагают, во-первых, использование глубинного оборудования, во-вторых, исключение скважины (или группы скважин) из режима нормальной эксплуатации на весь интервал исследования.

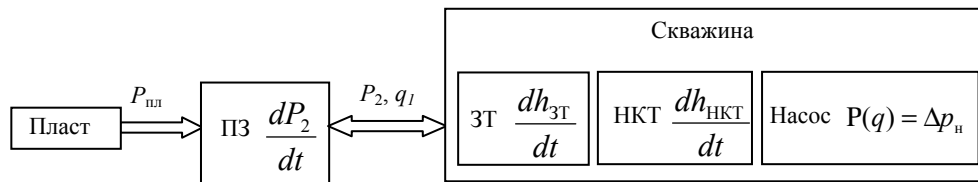
В последнее время появилось большое число работ, посвященных созданию и развитию новых методик анализа КВД. Среди них можно выделить методы, в которых используются уравнения расчета притока к несовершенной скважине как временной функции (метод А. П. Телкова); методы статистического анализа КВД и оценки устойчивости результатов, методы анализа использования регуляризирующих алгоритмов для повышения качества результатов; методы, подразумевающие разработку конкретных моделей пластов и классификации данных моделей, в том числе с помощью нейронных сетей [1, 4, 6–8]. В то же время наметилась тенденция к созданию моделей эксплуатационных участков с учетом переходных процессов в скважине в виде непосредственно дифференциальных уравнений, учитывающих динамику давлений в скважине и призабойной зоне [2, 5, 9].

Одним из перспективных направлений в развитии технологий информационного сопровождения процессов разработки и эксплуатации скважины является внедрение так называемых «интеллектуальных» скважин, подразумевающих использование замкнутых контуров управления процессом выработки и эксплуатации с применением концепции адаптивного наблюдения и управления в режиме реального времени [10, 12, 13]. Данная концепция предполагает, во-первых, использование «интеллектуального» оборудования для исследования и управления основными параметрами скважины, во-вторых, наличие единой модели «пласт — скважина», параметры которой постоянно уточняются на основе полученных измерений.

#### **Описание единой модели «пласт — скважина — насос»**

Анализ существующих методов гидродинамических исследований скважин показал, что наиболее информативными с точки зрения исследования пласта являются данные о переходных процессах основных динамических параметров скважины (в том числе КВД). Таким образом, наличие единой модели «пласт — скважина — насос», описывающей и согласующей динамику параметров скважины (динамический уровень жидкости в ЗТ, давление газовой фазы в ЗТ, расход и давление на устье НКТ) и пласта (давление в призабойной зоне (ПЗ), давление в забое, приток в забой), позволяет осуществлять решение обратной задачи определения гидродинамических параметров с использованием методов идентификации динамических систем (в том числе МНК).

Структурная схема единой модели «пласт — призабойная зона — скважина» представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Модель «пласт — призабойная зона — скважина»

В данной модели пласт задается квазистационарной моделью; приток жидкости в ПЗ и забой —  $q_1$  описывается законом Дарси, динамика давления в ПЗ —  $P_2$  — уравнением упругих свойств пласта; модель скважины — дифференциальным уравнением динамики забойного давления (уровня) в скважине в зависимости от степени притока из ПЗ, дебита скважины —  $q$  (модель насоса — аппроксимация напорной характеристики —  $C(q)$ , соотношение давлений на приеме и выкиде насоса —  $\Delta p_n$  и объемов жидкости в НКТ и ЗТ), режимных и эксплуатационных характеристик скважины.

Использование единой модели «пласт — призабойная зона — скважина» в системе адаптивного наблюдения динамических параметров скважины позволяет решать основные задачи гидродинамических исследований скважин и в то же время преодолеть ограничения на технологические параметры или непосредственно на результаты исследований, характерные для вышерассмотренных методов:

а) основным методом решения обратной задачи получения параметров скважины является МНК идентификации параметров на основе данных о переходных процессах, полученных непосредственно с устья скважины в режиме реальных измерений без изменения режима ее эксплуатации и использования глубинного оборудования;

б) модели притока в скважину, насоса и динамики движения жидкости в НКТ и ЗТ могут быть дополнены с учетом влияния различных осложняющих факторов: действия газлифтного эффекта, наличия локальных гидросопротивлений на различных участках движения жидкости, изменения характеристик насоса, изменения фильтрационных свойств пласта и т. д.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бочаров Р. В. Исследование скважин на нестационарных режимах в системе пласт — скважина: Дис. ... канд. техн. наук. — М., 2004. — 128 с.
2. Ведерников В. А., Лысова О. А. Синтез замкнутой оптимальной системы управления электродвигателем погружной центробежной установки // Изв. вузов. Нефть и газ. — 2002. — № 2. — С. 10–17.
3. Ведерников В. А., Соловьев И. Г. Разработка и использование гидродинамических моделей скважин, оборудованных УЭЦН // Вестн. кибернетики. — 2002. — Вып. 1. — С. 85–91.
4. Гарифуллин Р. Н., Еникеев Р. Р., Хасанов М. М. Новый подход к интерпретации кривых восстановления давления // Вестн. инженерингового центра «Юкос». — 2001. — № 2. — С. 13–16.



5. Королев К. Б., Силкина Т. Н., Пугачев Е. В. Анализ применения адаптированного алгоритма пересчета забойного давления по данным устьевых замеров в скважинах механизированного фонда // Нефтяное хоз-во. — 2006. — № 12.
6. Леонов В. И. Исследование решений гидродинамических задач притока жидкости/газа к скважине: Дис. ... канд. техн. наук. — М., 2004. — 132 с.
7. Рочев А. Н. Повышение информативности гидродинамических исследований скважины // Докл. 5-й Междунар. науч.-практ. конф. «Хазарнефтегазтаг-2002», Баку, 18–19 ноября 2002 г. — Баку, 2002. — С. 241–252.
8. Соколов В. А. Диагностирование структуры объекта по характеристикам хаотичности переходных процессов в неоднородных пластах // Нефтяное хоз-во. — 2005. — № 5. — С. 7–12.
9. Тускаев Н. Г., Гизатуллин Р. Г. Математическая модель работы скважины с УЭЦН // Нефть и газ. — 2004. — № 2. — С. 23–28.
10. Шагеев А. Ф., Тимушева А. М., Шагеева Л. Н. Автоматизированный мониторинг процессов обработки скважин — первая ступень интеллектуальных систем управления // Технологии ТЭК. — 2000. — № 11.
11. Ягафаров А. К., Федорцев В. К., Телков А. П. и др. Гидродинамические исследования малodeбитных непереливающих скважин. — Тюмень: Вектор Бук, 2006. — 352 с.
12. Gao Changhong, Rajeswaran T., Nakagawa Edson. A literature review on smart-well technology [Электрон. ресурс] // 2007 SPE Production and Operations Symposium.
13. Going W. S., Thigpen B. L., Chock P. M. et al. Intelligent — Well Technology: Are We ready for Closed-Loop Control ? [Электрон. ресурс] // 2006 SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition.

D. A. Govorkov

ON METHODS OF SURVEYING HYDRODYNAMIC STATES  
OF OIL WELLS AND BEDS

*The article considers basic methods of hydrodynamic survey of oil wells, practices of their employment and results' processing. The author marks pros and cons of the said methods, and perspectives of their development. He suggests a procedure of surveying oil well hydrodynamic states by using least-squares technique (LST) as an identification algorithm of "bed — bottom-hole zone — oil well" model, using evaluation of transient processes in a well basing on measurements of a well-head under normal operating conditions.*