

**КОНТРОЛЬ ЗАКАЧКИ ВОДЫ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ РАЗРАБОТКИ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ОХРАНЫ НЕДР И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**
WATER PUMPING CONTROL FOR INCREASING OF FIELDS DEVELOPMENT
EFFICIENCY, PROTECTION OF EARTH'S BOWELS AND ENVIRONMENT

**Р. З. Нургалиев, И. А. Гуськова, В. В. Самойлов, И. П. Ситдикова,
А. Т. Габдрахманов**

R. Z. Nurgaliev, I. A. Guskova, V. V. Samoilov, I. P. Sitdikova, A. T. Gabdrakhmanov

Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск

Ключевые слова: пласт; забойное давление; расходомер; коллектор; закачка

Key words: layer; bottom hole pressure; flow meter; reservoir; injection

Известно, что коллектор призабойной зоны пласта обладает свойством накапливать определенное количество жидкости в порах пластовой породы, если не рассматривать процессы фильтрации в глубь пласта или межпластовые перетоки. При накоплении жидкости происходит рост давления, так как емкость пластовой породы не безгранична. Зависимость накапливаемого или отдаваемого количества жидкости от забойного давления в коллекторе призабойной зоны выразим следующей формулой:

$$Q_{пз} = C_{пз} P_{заб}, \quad (1)$$

где $Q_{пз}$ — количество жидкости, накапливаемое и отдаваемое коллектором призабойной зоны пласта, $м^3$; $C_{пз}$ — коэффициент емкости коллектора призабойной зоны пласта, характеризующий изменение объема жидкости на единицу величины давления, $м^3/Па$.

Различные величины коэффициентов емкости объясняет причины различной скорости падения и восстановления давлений в разных скважинах на одном и том же объекте разработки месторождения, у которого толщина залежи примерно одинакова, а емкость коллектора призабойной зоны из-за различной структуры пластовой породы отличается.

Гидравлическое сопротивление, коэффициент продуктивности и коэффициент емкости пластовой породы по своей физической сущности являются условно постоянными величинами. С течением времени, в процессе механических и температурных преобразований пластовой породы эти параметры постепенно изменяются. Это важно, так

как такое изменение приводит к изменению производительности скважины. Когда идет нагнетание насосным агрегатом вода поглощается скважиной. Как только агрегат останавливается, то в случае наличия обратного клапана на линии подачи воды давление между пластом и забоем выравнивается, и жидкость останавливается. Если же обратного клапана нет, и в инженерной сети закачки воды есть скважины с меньшим пластовым давлением, то нагнетательная скважина переходит в режим истечения. Пример такого процесса был зафиксирован на выносном распределительном пункте ВРП-5 при кустовой насосной станции КНС-58 НГДУ «Джалильнефть», который оборудован реверсивными расходомерами, способными ежечасно записывать интегральные показания расхода в прямом и обратном направлении в память прибора. В таблице представлены показания приборов расхода воды, снятые на суточном интервале времени, в пределах которого насосный агрегат на КНС отключался и через определенный интервал времени снова запускался.

Часовые значения расходов воды по водоводам КНС-58

Дата/время	ВРП - 5				КНС - 58			
	6		8		12		13	
	V+	V-	V+	V-	V+	V-	V+	V-
09.05.2013 15:59	39,931	0,000	17,753	0,000	57,893	0,000	0,002	0,000
09.05.2013 16:59	39,712	0,000	17,443	0,000	57,294	0,000	0,003	0,000
09.05.2013 17:59	38,581	0,000	16,651	0,000	59,952	0,000	0,002	0,000
09.05.2013 18:32	Отключен							
09.05.2013 18:59	27,831	0,000	9,544	3,496	32,391	0,000	0,002	0,000
09.05.2013 19:59	10,272	0,000	0,000	5,679	4,454	0,000	0,001	0,001
09.05.2013 20:59	8,867	0,000	0,000	4,138	4,641	0,000	0,003	0,000
09.05.2013 21:59	8,363	0,000	0,000	3,261	5,011	0,000	0,000	0,006
09.05.2013 22:59	8,006	0,000	0,000	2,564	5,416	0,000	0,000	0,012
09.05.2013 23:59	8,010	0,000	0,000	2,088	5,938	0,000	0,000	0,017
10.05.2013 00:59	7,801	0,000	0,000	1,798	6,010	0,000	0,000	0,017
10.05.2013 01:59	7,603	0,000	0,000	1,574	6,034	0,000	0,000	0,015
10.05.2013 02:59	7,464	0,000	0,000	1,393	6,069	0,000	0,000	0,014
10.05.2013 03:59	7,243	0,000	0,000	1,247	6,100	0,000	0,000	0,013
10.05.2013 04:59	7,215	0,000	0,000	1,128	6,111	0,000	0,000	0,012
10.05.2013 05:59	7,134	0,000	0,000	1,020	6,106	0,000	0,000	0,012
10.05.2013 06:59	7,040	0,000	0,000	0,936	6,115	0,000	0,000	0,014
10.05.2013 07:59	6,989	0,000	0,000	0,880	6,102	0,000	0,000	0,005
10.05.2013 08:59	6,908	0,000	0,000	0,820	6,035	0,000	0,001	0,001
10.05.2013 09:59	6,860	0,000	0,000	0,744	6,091	0,000	0,000	0,002
10.05.2013 10:59	6,683	0,000	0,000	0,664	6,075	0,000	0,000	0,002
10.05.2013 11:59	6,799	0,000	0,000	0,606	6,071	0,000	0,000	0,005
10.05.2013 12:59	6,751	0,000	0,000	0,575	6,058	0,000	0,000	0,007
10.05.2013 13:04	Включен							
10.05.2013 13:59	35,657	0,000	15,694	0,052	52,950	0,000	0,000	0,009
10.05.2013 14:59	40,024	0,000	18,006	0,000	58,802	0,000	0,000	0,006
10.05.2013 15:59	40,194	0,000	17,942	0,000	58,728	0,000	0,000	0,005

На данном объекте создана балансовая группа, в которой по водоводам 12 и 13 вода, закачиваемая в пласт, поступает на ВРП-5 от КНС 58, и по водоводам 6, 7, 8 и 10 (водоводы 7 и 10 в таблице не показаны) вода поступает в нагнетательные скважины. Мы видим, что после остановки агрегата на КНС 58 движение воды в системе закачки в пласт не прекращается (см. табл.). После остановки агрегата на водоводе 8 направление движения жидкости поменялось на противоположное.

Возвращаясь к теме общесистемных закономерностей, рассмотрим еще один важный параметр системы «пласт — скважина» — это коэффициент емкости призабойной зоны скважины. Аналогом этого параметра в электротехнике является электрическая емкость конденсатора.

Среднее относительное отклонение баланса за сутки составило менее одного процента, что подтверждает высокую точность измерения интегральных расходов на почасовых интервалах.

Теоретически, в любой идеальный конденсатор можно закачать заряд бесконечного размера. В реальности такого не бывает, поэтому на конденсаторе всегда пишут показатель емкости, который характеризует зависимость напряжения от заряда.

$$q = CU, \quad (2)$$

где q — заряд на обкладке конденсатора, Кл; C — емкость конденсатора, Ф; U — напряжение на обкладках конденсатора, В.

У конденсатора малой емкости рост напряжения от заряда будет выше и, соответственно, время заряда будет маленьким. Но в реальности всегда существуют сопротивления. Для конденсатора скорость заряда будет зависеть от сопротивлений в цепи и емкости конденсатора, а сам заряд будет идти по экспоненциальному закону.

То же самое справедливо и для коллектора пластовой породы, которая также оказывает гидравлическое сопротивление движению жидкости, обладает емкостью для накопления жидкости за счет подпитки из общего резервуара пласта или соседней нагнетательной скважины, и которая может не только накапливать, но и отдавать жидкость в забой добывающей скважины. И это накопление и отдача жидкости происходят подобно конденсатору, по известному экспоненциальному закону.

Согласно теории электротехники, реакция цепи интегрирующего типа, эквивалентом которой является RC-цепь, на единичное ступенчатое воздействие напряжения с амплитудой U определяется следующей формулой [1]:

$$U_c = U_0 + U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (3)$$

где U_0 — начальное значение напряжения на обкладках конденсатора; U — импульс напряжения подаваемый на RC — цепь; τ — постоянная времени, равная произведению сопротивления на емкость конденсатора,

$$\tau = RC. \quad (4)$$

Для призабойной зоны пласта по аналогии с RC-цепью ступенчатое воздействие на забойное давление $P_{зоб}$ запишем подобной математической зависимостью:

$$P_{зоб} = P_{нач} + P(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (5)$$

где $P_{нач}$ — начальное значение забойного давления; P — импульс давления; t — время; τ — постоянная времени, которая равна произведению гидравлического сопротивления призабойной зоны пласта на коэффициент емкости призабойной зоны:

$$\tau = R_{zc} C_{пз}. \quad (6)$$

Учитывая условно постоянное значение плотности воды, и пренебрегая сжимаемостью жидкостью и упругостью материала труб, для трубопровода системы ППД, имеющего две точки учета воды, в которых имеются расходомеры и датчики давления, уравнение Бернулли будет иметь следующий вид:

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = P_2 + \rho gh_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} + P_{пот} = const, \quad (7)$$

где P_1, P_2 — измеренные давления в точках отгрузки и приема воды; V_1, V_2 — измеренное значение скорости движения воды через сечение расходомеров воды; h_1, h_2 — геометрические отметки установки расходомеров и датчиков давления в точках отгрузки и приема воды; $P_{пот}$ — потери давления на участке трубопроводной сети между точками учета воды 1 и 2.

Потери давления при стационарном режиме закачки условно постоянны, и эти потери можно определить экспериментальным путем по уравнению (7).

Инженерная инфраструктура системы ППД состоит из трех уровней, которые условно изображены на рисунке.

Первый уровень инженерной сети содержит балансовую группу водоводов с расходомерами воды, объединяющих объекты подготовки воды (ОС и УПС) и кустовые насосные станции (КНС).

Второй уровень включает балансовую группу водоводов с расходомерами воды между КНС и блок гребенками (БГ) при КНС и выносными распределительными пунктами (ВРП).

Третий уровень состоит из водоводов, объединяющих БГ и ВРП с нагнетательными скважинами. В третьей группе, как правило, балансовые группы отсутствуют, так как расходомеры устанавливаются только в точках отгрузки воды, на устьях нагнетательных скважин расходомеры отсутствуют.

Для первого уровня системы ППД, имея обустроенные узлы учета воды реверсивными расходомерами и датчиками давления в точках отгрузки и приема, с помощью уравнения (7) можно определять возможные порывы трубопроводной сети и также решением обратных задач выявлять неисправности расходомеров и датчиков давления.

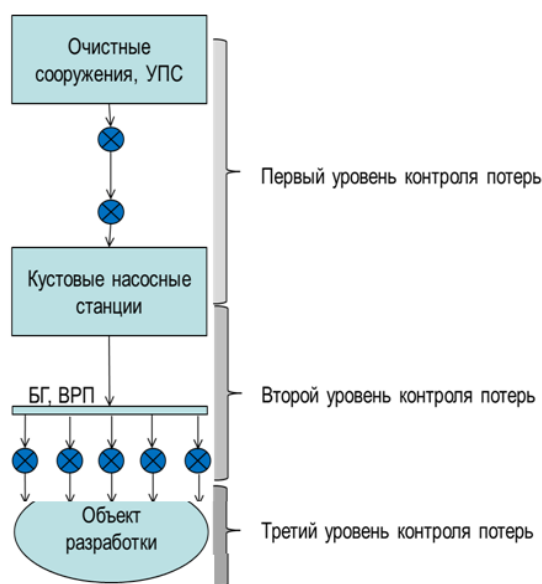


Рисунок. Трехуровневая инфраструктура системы ППД

Второй уровень обеспечивает контролем за балансом объема перекаченной жидкости по интегральным показаниям расходомеров.

Третий уровень контроля является самым сложным, так как в точках отгрузки воды на БГ и ВРП имеются расходомеры, а в точках приема на устьях нагнетательных скважин расходомеров нет. Но, зная режимы работы насосных агрегатов на КНС, а также контролируя закачку воды при стационарном режиме, с помощью специальных алгоритмов обработки измеренных значений мгновенных расходов и давлений в точках трубопроводной сети, которые являются общими для нескольких трубопроводов, можно с помощью того же закона сохранения энергии (7), с высокой точностью определять время

появления инцидентов, величину и характер происходящих изменений.

Под инцидентами понимаются события, приводящие к изменению режимов работы закачки воды в системе ППД. К инцидентам относятся:

- пуски или остановки насосных агрегатов;
- плановые или внеплановые изменения режимов закачки, включая открытие или закрытие отдельных водоводов при работающих насосных агрегатах на КНС, что приводит к перераспределению расходов в водоводах и изменению давлений в общих коллекторах;
- порывы трубопроводов или нарушение конструкции скважин.

Для определения характера инцидента, является ли инцидент аварией или просто плановым мероприятием по изменению режима работы применяются специальные алгоритмы, которые по уравнению переходного процесса (5) решением обратной задачи определяют величину импульса давления и постоянную времени переходного процесса τ . По определенным параметрам амплитуды изменения давления и постоянной

времени переходного процесса специальный алгоритм программы системы дистанционного контроля и управления позволяет идентифицировать аварийные события и изменение режимов закачки, которые не влияют на аварийность инфраструктуры системы ППД, например, плановое открытие или закрытие водовода при работающей КНС.

Наиболее сложным для автоматического обнаружения является определение возможного нарушения конструкции нагнетательной скважины. На изменение режимов закачки могут повлиять нарушение герметичности НКТ, эксплуатационной колонны, а также пакера. При таких нарушениях происходят скрытые потери давления в контуре призабойной зоны нагнетательной скважины. Скважины, в которых происходят такие нарушения после остановки насосных агрегатов на КНС, начинают принимать воду, которая изливается с других нагнетательных скважин, имеющих большее гидростатическое давление. С помощью реверсивных счетчиков определяются направление водоводов, в которые направлены потоки воды после остановки насосных агрегатов, и если на направлении подключена не одна, а несколько скважин, путем последовательного отключения скважин определяется скважина, принимающая воду после остановки агрегатов на КНС. По величине амплитуды импульса давления (7) определяется характер проблемы в нагнетательной скважине. Для точного определения проблемы проводятся гидродинамические исследования конструкции нагнетательной скважины.

Выводы

Теоретические и методические материалы, изложенные в данной статье, основаны на исследованиях, проведенных в рамках опытно-промышленных испытаний реверсивных ультразвуковых расходомеров на разных участках разрабатываемых месторождений. Применение реверсивных расходомеров в составе автоматизированной системы дистанционного контроля и управления АСДКУ позволили выявить большое количество участков системы ППД в разных НГДУ, в которых происходят неконтролируемые изливы воды после остановки насосных агрегатов. На отдельных участках объемы изливов достигают 20 % от объема закаченной в пласт воды. Массовый характер данной проблемы для многих НГДУ, эксплуатирующих месторождения на поздней стадии разработки, требует системного подхода в решении задачи определения потерь и повышения эффективности работы системы ППД.

Список литературы

1. Ландау Л. Д. «Теоретическая физика», том VI Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. – М.: Наука, 1986. — 736 с.
2. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.nicmi.ru/ups.php>
3. Электронный ресурс. – Режим доступа: http://www.s-ng.ru/pdf/main_623.pdf
4. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.nicmi.ru/assets/files/InstrForE.pdf>
5. Непримеров Н. Н. Экспериментальные исследования некоторых вопросов подземной гидромеханики и физики системы «пласт-скважина» / Н. Н. Непримеров // Диссертация на соискание ученой степени доктора наук. Казань, 1962.

Сведения об авторах

Нургалiev Роберт Загитович, исполняющий обязанности ректора Альметьевского государственного нефтяного института, г. Альметьевск тел. 88553310004, e-mail: nurgaliev@agni-rt.ru.

Гуськова Ирина Алексеевна, д. т. н., профессор, проректор по научной работе, заведующая кафедрой «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», Альметьевский государственный нефтяной институт, тел. 88553310088, e-mail: guskovaagni1@rambler.ru.

Самойлов Владимир Васильевич, директор ООО «Глобальные бизнес технологии», тел. 88553377274, e-mail: samoilov@tatintec.ru.

Ситдикова Ирина Петровна, к. т. н., доцент, доцент кафедры «Автоматизация информационных технологий», Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск тел. 8(906)3314086, e-mail: sitdikova_ip@mail.ru.

Габдрахманов Артур Тагирович, к. т. н., доцент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», Альметьевский государственный нефтяной институт, тел. 88553310088, e-mail: artur.gabdrakhmanov@rambler.ru.

Information about the authors

Nurgaliev R. Z., Acting Rector of Almet'yevsk State Oil Institute, Almet'yevsk, tel. 88553310004, e-mail: nurgaliev@agni-rt.ru.

Guskova I. A., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Vice-rector of Scientific work, Head of Department «Development and exploitation of oil and gas fields», Almet'yevsk State Oil Institute, Almet'yevsk, tel. 88553310088, e-mail: guskovaagni1@rambler.ru.

Samoilov V. V., Director of Ltd. «Global business technology», tel. 88553377274, e-mail: samoilov@tatintec.ru.

Sitdikova I. P., Candidate of Engineering Sciences, associate professor of Department «Automation of Information Technology», Almet'yevsk State Oil Institute, tel. 8(906)3314086, e-mail: sitdikova_ip@mail.ru.

Gabdrakhmanov A. T., Candidate of Engineering Sciences, associate professor of Department «Development and exploitation of oil and gas fields», Almet'yevsk State Oil Institute, tel. 88553310088, e-mail: artur.gabdrakhmanov@rambler.ru.