УДК 622.276.054.22

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМОГРАММ НА КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ГШН

MODELING OF DYNAMOMETER CARDS IN QUASISTEADY OPERATION MODES OF SUCKER ROD PUMPS

В. Д. Ковшов, М. Е. Сидоров, С. В. Светлакова
V. D. Kovshov, M. E. Sidorov, S. V. Svetlakova

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

Ключевые слова: ***динамограмма; моделирование; недостаточный приток; станок-качалка; глубинный штанговый насос***
Key words: ***dynamometer card; modeling; poor inflow; beam-pumping unit; sucker rod pump***

Одной из актуальных проблем нефтедобычи является истощение нефтяного пласта после достаточно длительной эксплуатации скважины. В связи с уменьшением притока нефти к скважине наступает момент, когда нормальная работа глубинного штангового насоса (ГШН) нарушается, и на динамограмме появляются признаки недостаточного притока. Для примера на рис. 1 показаны динамограммы для нормальной работы насоса — 1 и для недостаточного притока — 2. При этом производительность уменьшается, а фактором, отрицательно влияющим на работу насоса, является неполное заполнение насоса, что приводит к ударному воздействию жидкости на плунжер и возникновению дополнительных динамических нагрузок на штанги.

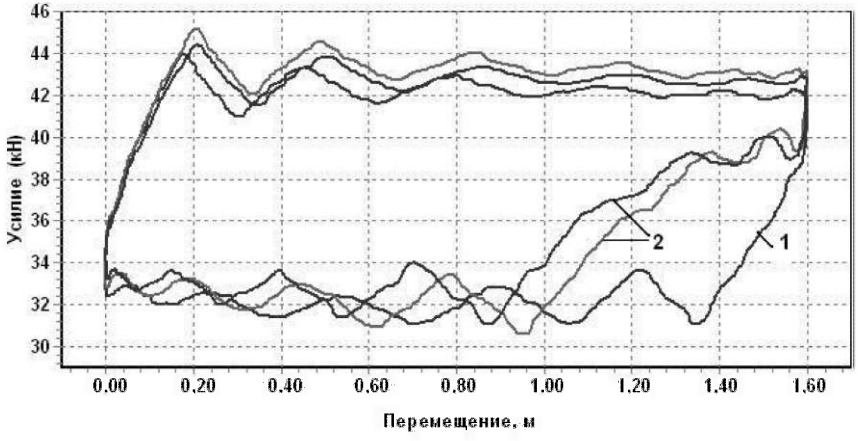

Рис. 1. ***Замеренные динамограммы ГШН:***
1 — нормальная работа насоса; 2 — недостаточный приток

Своевременная диагностика и регулирование (снижение) оборотов электродвигателя станка-качалки с использованием, например, станции управления позволяют устра-

нить неполное заполнение насоса. Этот способ эксплуатации малодебитных нефтяных скважин более предпочтителен, чем периодическая эксплуатация (пуск, остановка насоса), оправданная при невозможности снижения оборотов электродвигателя.

Отметим, что в момент диагностирования недостаточного притока по динамограмме уровень жидкости в затрубном пространстве ГШН уже «нулевой», то есть диагностика несколько запаздывает. Для предотвращения условия недостаточного притока необходимо контролировать уровень жидкости в затрубном пространстве ГШН или глубину погружения насоса под уровень жидкости и уменьшать обороты электродвигателя станка-качалки при некотором «минимально-необходимом» уровне жидкости в затрубном пространстве ГШН. Поскольку приток жидкости в скважину при нулевом уровне жидкости в затрубном пространстве ГШН максимальный, то поддержание такого режима обеспечивает большую производительность насоса, чем при периодической эксплуатации скважины.

Регулирование оборотов электродвигателя станка-качалки позволяет также увеличить производительность насоса для скважин с диагностикой. При этом возможно появление неполного заполнения насоса вследствие уменьшения уровня жидкости в затрубном пространстве ГШН, если производительность насоса превышает приток жидкости в скважину, что приводит к необходимости контролировать уровень жидкости в затрубном пространстве ГШН и момент диагностирования недостаточного притока по динамограмме.

Поскольку регулирование оборотов электродвигателя производится ступенчато, то станок-качалка работает достаточно длительное время при постоянных оборотах, а время перехода на другие обороты мало. Такой режим работы будем называть квазистационарным.

Моделирование динамограмм ГШН на различных режимах работы позволяет установить факторы, влияющие на вид динамограммы [1], а также, изменяя значения параметров, обусловленных этими факторами, точнее определять неисправности ГШН, используя методы распознавания реальных динамограмм [2], замеряемых датчиками усилий (динамометрами) и передаваемых на различные приборы, станции управления либо на серверы баз данных. Моделирование динамограмм ГШН для станков–качалок с регулированием оборотов электродвигателя позволяет рассчитать влияние уровня жидкости в затрубном пространстве на вид динамограммы и определить значение «минимально-необходимого» уровня жидкости в затрубном пространстве ГШН, при котором недостаточный приток еще не наступил и по динамограмме не диагностируется.

Постановка задачи. Допустим, что расход жидкости, поступающей в скважину, пропорционален перепаду давления (закон Дарси). Тогда приток жидкости в затрубное пространство ГШН при условиях на уровне погружения насоса описывается уравнением

$$dV = K \cdot \left(p_{пл} - p_{заб}\right) d\tau - Q_H d\tau, \qquad (1)$$

где dV — изменение объема жидкости в затрубном пространстве ГШН за время $d\tau$ при условиях на уровне погружения насоса; $p_{пл}$ и $p_{заб}$ — пластовое и забойное давление на уровне погружения насоса; K — продуктивность пласта, Q_H — объем жидкости, откачиваемый насосом в единицу времени.

Забойное давление на уровне погружения насоса можно рассчитать по следующей формуле

$$p_{заб} = \gamma_Ж \cdot H_Ж + p_{затр}, \qquad (2)$$

где $\gamma_Ж$ — средняя плотность жидкости в затрубном пространстве ГШН; $H_Ж$ — высота столба жидкости в затрубном пространстве ГШН, $p_{затр}$ — давление газа в затрубном пространстве.

Отметим, что в (1) объем жидкости рассчитывается при условиях на уровне притока жидкости. Чтобы привести этот объем к объему жидкости, распределенному по высоте затрубного пространства, воспользуемся законом сохранения массы:

$$M_{затр} = M_{затрСр}.$$

Масса жидкости, притекающей в затрубное пространство (на уровне погружения насоса) за некоторое время,

$$M_{затр} = dV \cdot \gamma_{заб},$$

а масса жидкости, находящейся в затрубном пространстве насоса, $M_{затрСр} = dV_{затр} \cdot \gamma$, где $\gamma_{заб}$ и γ — плотности жидкости в затрубном пространстве на уровне погружения насоса и на уровне расчета объема.

Тогда

$$dV \cdot \gamma_{заб} = dV_{затр} \cdot \gamma. \quad (3)$$

Объем притока жидкости в затрубное пространство ГШН за время $d\tau$ можно определить через высоту столба жидкости по формуле

$$dV_{затр} = dH_{Ж} \cdot \frac{f}{\cos(\alpha)}, \quad (4)$$

где f, α — площадь поперечного сечения и угол наклона к вертикали оси затрубного пространства на уровне расчета объема.

Используя зависимости (2)–(4), запишем уравнение (1) в виде

$$\frac{dH_{Ж}}{d\tau} + K \cdot \gamma_{Ж} \cdot \frac{H_{Ж}}{f_{пр}} = K \cdot \frac{p_{пл} - p_{затр}}{f_{пр}} - \frac{Q_{н}}{f_{пр}}, \quad (5)$$

где $f_{пр} = f_{,} \cdot \frac{\gamma}{\cos(\alpha) \cdot \gamma_{заб}}$ — относительный параметр площади поперечного сечения жидкости в затрубном пространстве.

Заменяя $f_{пр}$ средним интегральным значением $f_{ср}$ по высоте столба жидкости в затрубном пространстве, зависимость (5) можно привести к виду

$$\frac{dH_{Ж}}{d\tau} + P(\tau) \cdot H_{Ж} = Q(\tau), \quad (6)$$

где $P(\tau) = K \cdot \frac{\gamma_{Ж}}{f_{ср}}$ — относительный параметр продуктивности пласта;

$Q(\tau) = \frac{K \cdot (p_{пл} - p_{затр}) - Q_{н}}{f_{ср}} = \frac{Q_{макс} - Q_{н}}{f_{ср}}$ — относительный параметр расхода жидкости; $Q_{макс}$ — максимальный приток жидкости в скважину.

Решение линейного дифференциального уравнения первого порядка (6) имеет вид [3]:

$$H_{Ж} = \frac{1}{\varphi(\tau)} \cdot \left(C + \int Q(\tau) \cdot \varphi(\tau) d\tau \right), \quad (7)$$

где

$$\varphi(\tau) = e^{\int P(\tau) d\tau}. \quad (8)$$

Для квазистационарного режима работы ГШН можно ввести допущения: $P(\tau) = P = Const$ и $Q(\tau) = Q = Const$.

Тогда из (7) и (8) получаем

$$H_{Ж} = \frac{1}{e^{P \cdot \tau}} \cdot \left(C + Q \frac{e^{P \cdot \tau}}{P} \right) = \frac{Q}{P} + C \cdot e^{-P \cdot \tau}. \quad (9)$$

Пусть при $\tau = 0$ начальная высота столба жидкости в затрубном пространстве $H_{Ж} := H_0$, тогда

$$H_{Ж} = \frac{Q}{P} + \left(H_0 + \frac{Q}{P} \right) \cdot e^{-P \cdot \tau}. \quad (10)$$

Для стационарного режима $e^{-P \cdot \tau} = 0$ получаем высоту столба жидкости в затрубном пространстве

$$H_{Н} = \frac{\left(p_{пл} - p_{затр} \right) - \frac{Q_{Н}}{K}}{\gamma_{Ж}}. \quad (11)$$

В случае заполнения скважины без откачки $Q_{Н} = 0$ получаем зависимость максимальной высоты жидкости в затрубном пространстве от пластового давления:

$$H_{макс} = \frac{p_{пл} - p_{затр}}{\gamma_{Ж}}. \quad (12)$$

Нетрудно также получить зависимость для расчета максимального притока жидкости в скважину:

$$Q_{макс} = K \cdot H_{макс} \cdot \gamma_{Ж}. \quad (13)$$

Результаты моделирования. Для моделирования динамограмм необходимо рассчитать высоту столба жидкости в затрубном пространстве $H_{Ж}$ по формуле (10). При этом нагрузки и параметры ГШН задаются значениями, известными для реальных станков-качалок, а параметры пласта ($p_{пл}$ и K) рассчитываются из условий стационарных режимов, то есть из уравнений (11)–(13), для исходного режима (при известных $H_{Н}$: и $Q_{Н}$:) и режима максимального заполнения (для заданного $H_{макс}$). Максимальный приток жидкости в скважину можно найти через параметры известного стационарного режима ГШН по формуле

$$Q_{макс} = \frac{H_{макс} \cdot Q_{Н}}{H_{макс} - H_{Н}}. \quad (14)$$

Тогда для расчета параметров пласта достаточно задать значение $H_{макс}$, которое может изменяться от глубины погружения насоса на известном стационарном режиме $H_{Н}$ до глубины скважины $H_{скв}$.

Ниже получены результаты расчетов для ГШН со значениями параметров, приведенными в таблице 1.

Таблица 1

Значения параметров для расчетов

$H_{Н}$: (м)	$Q_{Н}$ (м^3/сут)	$H_{макс}$ (м)	$Q_{макс}$ (м^3/сут)	$p_{затр}$ (МПа)	$\gamma_{Ж}$ (н/м^3)	$f_{ср}$ (м^2)
92	3,1	902	3,45	0,1	8 500	0,025

На рис. 2 показаны результаты расчетов по формуле (10) зависимости глубины погружения насоса от времени работы ГШН при увеличении $Q_{Н}$ (числа качаний от исходного n = 1,92 кач/мин) до достижения нулевого значения глубины погружения насоса $H_{Ж} = 0$ и далее для n = 2,0.

Приведены следующие режимы:

1 — n увеличивается на 0,1 каждые 0,5 суток до 2,72, при $H_{Ж} = 0$;

2 — n увеличивается на 0,1 каждые 0,2 суток до 3,12, при $H_{Ж} = 0$;

3 — n увеличивается на 0,2 каждые 0,1 суток до 3, при $H_{Ж}$ от 66,5 до 0;

4 — n = 3,5 кач/мин до $H_{Ж} = 0$.

Для построения динамограмм использовались модели, описанные авторами в ранних работах [1].

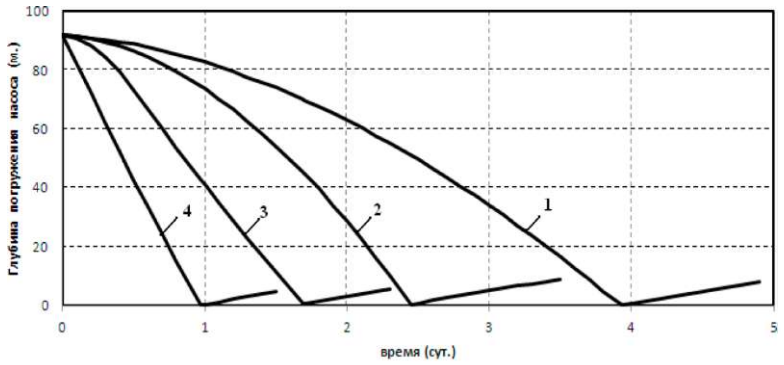

Рис. 2. ***Влияние числа качаний на глубину погружения насоса***

На рис. 3 показаны результаты моделирования динамограмм при исходном числе качаний $n = 1{,}92$ кач/мин (нормальная работа насоса на стационарном режиме $H_Ж = 92$ м) и при увеличении числа качаний до достижения нулевого значения глубины погружения насоса $H_Ж = 0$ (режим недостаточного притока) (табл. 2).

Таблица 2

Значения n (кач/мин) при разных режимах работы ГШН

Режимы работы ГШН	1	2	3	4	5
n (кач/мин)	1,92	2,28	2,38	2,46	2,62

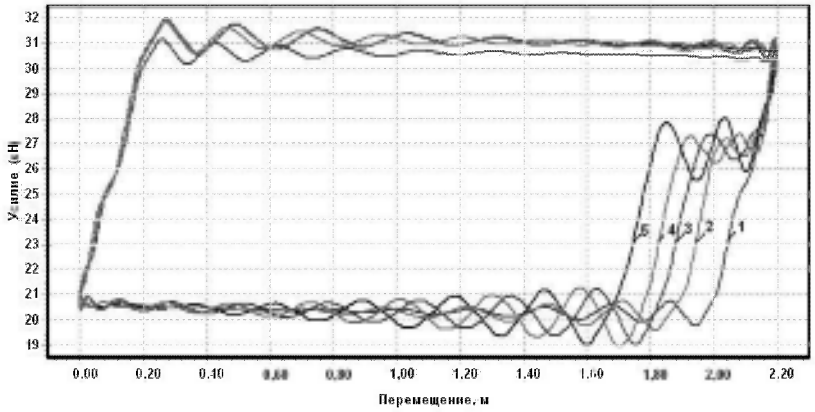

Рис. 3. ***Результаты моделирования динамограмм***

Отметим, что средняя нагрузка на динамограмме при ходе плунжера вверх для исходного стационарного режима равна примерно 30,5 кН, а для режима недостаточного притока — 31 кН. Данная разница является следствием изменения уровня жидкости в затрубном пространстве от 92 м до 0 м.

Выводы

- Для моделирования динамограмм на квазистационарных режимах работы ГШН можно рассчитать высоту столба жидкости в затрубном пространстве $H_Ж$, используя значения параметров исходного стационарного режима (при известных $H_Н$ и $Q_Н$) и задавая высоту столба жидкости в затрубном пространстве $H_{макс}$ для стационарного режима при $Q_Н = 0$.
- Для реальных динамограмм можно рассчитать высоту столба жидкости в затрубном пространстве $H_Ж$ для заданного стационарного режима ГШН, измеряя по динамограмме изменение средней нагрузки при ходе плунжера вверх для данного режима и для режима недостаточного притока при $H_Ж = 0$. Также в режиме недостаточного

притока можно оценить по замеренной динамограмме значение $Q_{макс}$ и таким образом рассчитать по формуле (14) значение $H_{макс}$, а значит и параметры пласта ($p_{пл}$ и K).

- При увеличении числа качаний в случае регулирования станцией управления необходимо ограничивать наибольшее число качаний, поскольку при достижении нулевого уровня жидкости в затрубном пространстве (режим недостаточного притока) происходит резкое «схлопывание» динамограммы, что приводит к росту динамических нагрузок.

Список литературы

1. Ковшов В. Д., Светлакова С. В., Сидоров М. Е. Моделирование динамограммы станка-качалки // Нефтяное хозяйство. – 2005. – № 11. – С. 84–87.
2. Ковшов В. Д., Сидоров М. Е., Светлакова С. В. Динамометрирование, моделирование и диагностика состояния глубинной штанговой насосной установки // Известия вузов. Нефть и газ. – Тюмень. – 2011. – № 3. – С. 25–29.
3. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1977. – 872 с.

Сведения об авторах

***Ковшов Владимир Дмитриевич**, к. т. н., директор, ООО НПП «Грант-Партнер», г. Уфа, тел. 8(347)2840209, e-mail: info@grant-ufa.ru*

***Сидоров Михаил Евгеньевич**, к. т. н., доцент кафедры «Информатика и информационно-коммуникационные технологии», Уфимский государственный университет экономики и сервиса, г. Уфа, тел. 8(347)2537173*

***Светлакова Светлана Валерьевна**, к. т. н., доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, тел. 89279399611*

Information about the authors

***Kovshov V. D.**, Candidate of Science in Engineering, director of LLC NPP «Grant-Partner», Ufa, phone: 8(347)2840209, e-mail: info@grant-ufa.ru*

***Sidorov M. E.**, Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «informatics and information-communication technologies», Ufa State University of Economics and Service, Ufa, phone: 8(347)2537173*

***Svetlakova S. V.**, Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Automation of technological processes in oil industry», Ufa State University of Economics and Service, Ufa, phone: 89279399611*