

УДК 622.276.5

**ВЫБОР РЕЖИМА ЗАКАЧКИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ
НАСОСОВ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ**
SELECTION OF A MODE OF INJECTION FOR HIGH-PERFORMANCE PUMPS
OF RESERVOIR PRESSURE MAINTENANCE SYSTEM

А. С. Галеев, П. А. Ларин, Г. И. Бикбулатова, Р. Н. Сулейманов, Ю. А. Болтнева
A. S. Galeev, P. A. Larin, G. I. Bikbulatova, R. N. Suleimanov, Ju. A. Boltneva

*Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск
Альметьевский государственный нефтяной институт, филиал, г. Октябрьский*

*Ключевые слова: насос; ППД; режим; совместная закачка
Key words: pump; reservoir pressure maintenance system; mode; joint injection*

Известно, что высокопроизводительные насосы системы поддержания пластового давления (ППД) производят закачку через так называемый «блок гребенки», как правило, в несколько трубопроводов, подающих жидкость нагнетания в разные скважины.

Известно также, что оптимизация режима работы таких насосов является важной задачей, так как такие насосы имеют мощность 1 МВт и более [1–4].

Довольно долго основным критерием оптимизации являлся КПД насосного агрегата [5–7]. Однако, это приводит к оптимизации работы насоса, а не системы закачки в целом. В настоящее время в качестве критерия используется удельный расход электроэнергии на единицу объема закачиваемой жидкости. План закачки на каждую насос-

ную станцию «спускается» отделом главного геолога нефтедобывающего предприятия, причем часто объемы закачки оговариваются отдельно по каждому направлению (трубопроводу). В большинстве случаев закачку на насосной станции ведет один насос

Пусть имеется насос с напорной характеристикой $H = H(Q)$ и КПД $\eta = \eta(Q)$ (Q — подача насоса). Насос качает жидкость в два трубопровода с гидравлическими характеристиками $h_1 = h_1(Q)$, $h_2 = h_2(Q)$ (h_1, h_2 — потери напора в трубопроводах, Q — поток, или расход жидкости в них). Через эти трубопроводы, имеющие регуляторы потока (задвижки, вентили, или диафрагмы), нужно закачать объемы V_1 и V_2 с наименьшими затратами энергии. Ранее представлялось, что экономичным способом заполнения этих объемов является «способ 2–1»: сначала заполняем объемы при полностью открытых трубопроводах, затем оставшийся незаполненным объем [1]. Ниже показано, что менее затратным является способ одновременного заполнения объемов, для чего может понадобиться частичное перекрытие трубопроводов.

В данных исследованиях удобней работать с величинами, зависящими не от расхода, а от напора. Поэтому подачу и КПД насоса представим функциями [11] $Q = Q(H)$, $\eta = \eta(H)$, а потоки в трубопроводах — функциями $q_1 = q_1(H)$, $q_2 = q_2(H)$. Примерный вид графиков функций Q , q_1 , q_2 показан на рис. 1, где h_{10} , h_{20} — статические напоры в соответствующих трубопроводах.

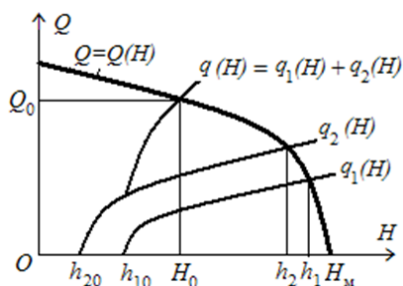


Рис. 1. Графики функций Q , q_1 , q_2

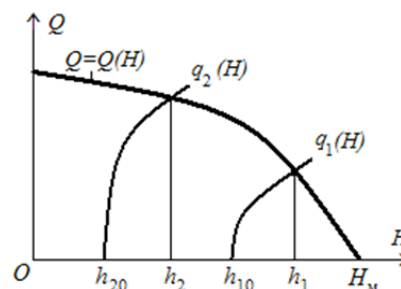


Рис. 2. Гидравлические характеристики трубопроводов

Заметим, что в ситуации, когда гидравлические характеристики трубопроводов подобны тем, что изображены на рис. 2, одновременная закачка невозможна. Поэтому при одновременной закачке выполняются условия

$$h_1 > h_{10}, h_{20}; h_2 > h_{10}, h_{20} \quad (3)$$

в соответствии с рис. 1.

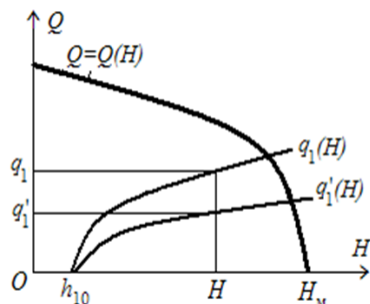


Рис. 3. Графики расхода в первом трубопроводе

Частично перекроем трубопроводы. От этого расходы в них уменьшатся, и графики зависимостей $q_1 = q_1(H)$ и $q_2 = q_2(H)$ понизятся (на рис. 3 изображено понижение графика расхода в первом трубопроводе).

Обозначим $q'_1(H)$, $q'_2(H)$ новые расходы в трубопроводах, соответствующие потере напора H . Суммарная характеристика трубопроводов станет равной $q'(H) = q'_1(H) + q'_2(H)$. Рабочая точка (H, Q) будет определяться уравнением $Q(H) = q'(H)$, или

$$Q(H) = q'_1(H) + q'_2(H). \quad (4)$$

Введем коэффициенты

$$a \equiv \frac{q'_1(H)}{q_1(H)}, \quad b \equiv \frac{q'_2(H)}{q_2(H)},$$

являющиеся мерой открытости трубопроводов. Так как $q'_1(H) \leq q_1(H)$, $q'_2(H) \leq q_2(H)$, то $a, b \in [0, 1]$. Уравнение (4) примет вид

$$Q(H) = a q_1(H) + b q_2(H). \quad (5)$$

Числа a, b задают положение суммарного графика $q'(H)$ правой части, поэтому однозначно определяют рабочую точку насоса (H, Q) – пересечение графика правой части с характеристикой насоса $Q(H)$.

Увеличим a , не меняя b . В соответствии с утверждением (А) Q увеличится, H уменьшится. Уменьшение H вызовет уменьшение значений $q_2(H)$ и $b q_2(H)$. Так как согласно (5) $a q_1(H) = Q(H) - b q_2(H)$, то $a q_1(H)$ увеличится.

Процесс заполнения объемов V_1 и V_2 изобразим линией, которую назовем линией заполнения (рис. 4). Точка $M(x, y)$ изображает момент, когда через первый трубопровод поступил объем x через второй — объем y .

Пусть $a, b < 1$. Увеличение хотя бы одного из этих коэффициентов поднимет график правой части в (5), что приведет к увеличению координаты Q рабочей точки и уменьшению H (А).

Итак, увеличение a при постоянном b влечет увеличение $a q_1(H)$ и уменьшение $b q_2(H)$ (Б).

Если в течение времени Δt значения a, b постоянны, то рабочая точка H, Q определяемая уравнением (5), будет фиксированной. За это время через трубопроводы поступят объемы жидкости

$$\Delta x = q'_1(H) \Delta t = a q_1(H) \Delta t, \quad \Delta y = q'_2(H) \Delta t = b q_2(H) \Delta t. \quad (6)$$

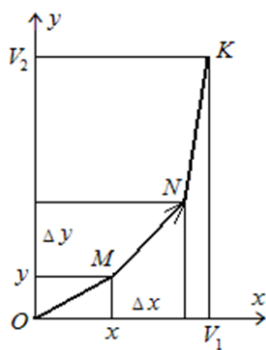


Рис. 4.
График линии
заполнения

Ввиду постоянства значений $a q_1(H)$ и $b q_2(H)$ эти равенства представляют собой уравнения прямой линии и изображаются направленным отрезком (отрезок MN на рис. 4). Умножим (5) на Δt . Из (5) и (6) получим

$$Q(H) \Delta t = \Delta x + \Delta y.$$

Следовательно, за время Δt насос потребляет энергию

$$\Delta E = \rho g \frac{H}{\eta(H)} Q(H) \Delta t = \rho g \frac{H}{\eta(H)} (\Delta x + \Delta y). \quad (7)$$

В случае, когда насос качает в большее число трубопроводов, будет выполняться аналогичное равенство. Так, если насос подключен к трем трубопроводам, равенство примет вид

$$\Delta E = \rho g \frac{H}{\eta(H)} (\Delta x + \Delta y + \Delta z),$$

где $\Delta z = c q_3(H) \Delta t$ — поступление жидкости в третий трубопровод за время Δt , c — открытость третьего трубопровода.

Формула (7) показывает, что энергию ΔE обеспечивающую поступление фиксированных объемов $\Delta x, \Delta y$, можно минимизировать, если сделать минимальной величину $H/\eta(H)$. Эта величина минимальна при минимальном напоре H или, что тоже, при максимальной подаче $Q(H)$ [2]. В свою очередь, утверждение (А) гласит, что напор можно уменьшить, если увеличить какой-либо из коэффициентов a, b . Выясним, какие максимально возможные значения a, b соответствуют отрезку MN .

Исключив из уравнений (6) время, получим условие, которому должны удовлетворять a и b на участке MN

$$b q_2(H) : a q_1(H) = \Delta y : \Delta x, \quad (8)$$

где правая часть постоянна. (Если насос качает в три трубопровода, то будем иметь, естественно, соотношение

$$c q_3(H) : b q_2(H) : a q_1(H) = \Delta z : \Delta y : \Delta x).$$

Рассмотрим случай, когда $a, b < 1$. Увеличим a не меняя b . Согласно (Б) увеличится $aq_1(H)$ и уменьшится $bq_2(H)$. Левая часть (8) уменьшится, равенство нарушится, и процесс заполнения уже не будет изображаться той же линией MN . Значит, чтобы остаться на линии MN нужно вместе с a увеличить и b . При одновременном увеличении величин a и b , по крайней мере, одна из них первой достигнет максимального значения, равного 1. После этого дальнейшее увеличение другой величины невозможно без нарушения равенства (8). Следовательно, существуют такие максимально возможные значения a и b , отвечающие участку MN , из которых хотя бы одно равно 1. Тогда согласно (А) H будет минимальным и затраты энергии (7) также будут минимальными. Поэтому далее будем считать, что при закачке мы осуществляем этот принцип: *в любой момент заполнения хотя бы один трубопровод полностью открыт, то есть среди коэффициентов a , b хотя бы один равен 1* (В).

Пусть, к примеру, на MN $b = 1$. Равенства (5), (8) дадут систему уравнений

$$\begin{cases} Q(H) = aq_1(H) + q_2(H), \\ aq_1(H)\Delta y = q_2(H)\Delta x, \end{cases}$$

определяющую значения H и a . В самом деле, подставив $aq_1(H)$ из второго уравнения в первое, получим уравнение

$$Q(H) = \left(1 + \frac{\Delta x}{\Delta y}\right) q_2(H). \quad (9)$$

Имея графики функций $Q(H)$, $q_2(H)$ и значения Δx , Δy найдем значения H и $Q(H)$ — рабочую точку насоса. Согласно (9) чем круче отрезок MN , то есть чем больше $\Delta x/\Delta y$ тем меньше $Q(H)$ и больше H . Подставив найденное H во второе уравнение системы, получим наибольшее возможное значение a , соответствующее участку MN

$$a = \frac{q_2(H)\Delta x}{q_1(H)\Delta y}. \quad (10)$$

Формулы (9), (10) показывают, что значения H и a зависят лишь от отношения $\Delta x/\Delta y$

Возьмем произвольную линию заполнения OK описываемую параметрическими уравнениями

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad (11)$$

где время t играет роль параметра (рис. 5). (Если насос работает на три трубопровода, добавится уравнение $z = z(t)$). На OK выделим элемент dx , dy отвечающий бесконечно малому отрезку времени dt , за который через трубопроводы поступили объемы

$$dx = aq_1(H)dt, \quad dy = bq_2(H)dt. \quad (12)$$

Из (12) следует

$$\dot{x} \equiv \frac{dx}{dt} = aq_1(H), \quad \dot{y} \equiv \frac{dy}{dt} = bq_2(H),$$

где правые части неотрицательны. Формула (5) запишется в виде

$$Q(H) = \dot{x} + \dot{y}. \quad (13)$$

Во время закачки $Q(H) > 0$, поэтому $\dot{x} + \dot{y} > 0$. Равенство (13), выполняемое в рабочей точке насоса, определяет неявную зависимость H от $x+y$. Если, например, напорную характеристику насоса задать приближенной формулой

$$Q(H) = A\sqrt{H_m - H},$$

то подстановка в (13) даст уравнение $A\sqrt{H_m - H} = \dot{x} + \dot{y}$,

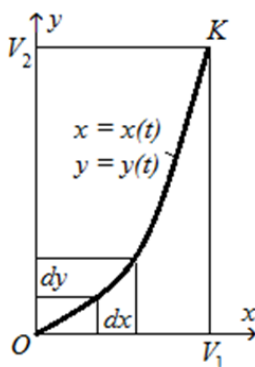


Рис. 5. График линии заполнения

из которого получается явная зависимость H от $x+y$

$$H = H_m - \left(\frac{\dot{x} + \dot{y}}{A} \right)^2.$$

За время dt насос потребит энергию

$$dE = \rho g \frac{H}{\eta(H)} Q(H) dt. \quad (14)$$

Будем считать, что зависимости $Q(H)$ и $\eta(H)$ изображаются гладкими линиями. В этом случае потребляемая мощность насоса

$$N(H) = \frac{dE}{dt} = \rho g \frac{H}{\eta(H)} Q(H)$$

будет дифференцируемой функцией. Так как H зависит от $x+y$ то мощность является функцией от $x+y$

$$N(H) = F(\dot{x} + \dot{y}).$$

Поэтому равенство (14) можно написать в виде

$$dE = F(\dot{x} + \dot{y}) dt.$$

Отсюда

$$E = \int_0^T F(\dot{x} + \dot{y}) dt, \quad (15)$$

где T — время заполнения обоих объемов. Значит, затрачиваемая насосом энергия минимальна, когда минимален функционал (15), зависящий от T и от формы линии заполнения, задаваемой уравнениями (11). В начальный момент $t=0$ жидкость еще не поступала, поэтому

$$x(0) = 0, \quad y(0) = 0. \quad (17)$$

В конечный момент $t = T$ объемы должны быть заполнены

$$x(T) = V_1, \quad y(T) = V_2. \quad (18)$$

Среди линий заполнения нужно найти особенную линию, экстремаль — линию, на которой функционал (15) минимален. Заполнение объемов V_1, V_2 происходит непрерывно, следовательно, экстремаль непрерывна. Для упрощения выкладок введем замену $u = x + y$.

Тогда

$$\dot{u} = \dot{x} + \dot{y}, \quad (19)$$

и (15) примет вид

$$E = \int_0^T F(\dot{u}) dt.$$

В соответствии с (17), (18) должно быть

$$u(0) = 0, \quad u(T) = V_1 + V_2. \quad (20)$$

Предположим, что экстремалью является гладкая линия. Тогда она будет определяться уравнением Эйлера

$$\frac{d}{dt} F_{\dot{u}} - F_u = 0. \quad (21)$$

В нашем случае F зависит только от u поэтому $F_u = 0$. Из (21) получим $\frac{d}{dt} F_{\dot{u}} = 0$,

то есть $F_{\dot{u}\dot{u}} \ddot{u} = 0$. Отсюда

$$\begin{aligned} \ddot{u} &= 0, \\ \dot{u} &= Q_0 = \text{const}. \end{aligned} \quad (22)$$

Подставив это значение в (19), затем в (13), получим

$$Q(H) = Q_0$$

— во время закачки подача насоса и, следовательно, его рабочие характеристики должны сохраняться вплоть до одновременного заполнения обоих объемов. Иначе говоря, линией заполнения должен быть прямолинейный отрезок ОК

Проверим, может ли экстремаль быть ломаной линией. Предположим, что в момент времени $\tau \in (0, T)$ экстремаль претерпевает излом, оставаясь в промежутках $[0, \tau]$, $[\tau, T]$ гладкой. Тогда в этих промежутках экстремаль должна удовлетворять уравнению Эйлера (21). Поэтому в каждом промежутке экстремаль задается дифференциальным уравнением (22), решение которого имеет вид

$$u = Qt + R,$$

где Q, R — постоянные. Поэтому можно написать

$$u = \begin{cases} Q_1 t + R_1 & \text{в промежутке времени } 0 \leq t \leq \tau, \\ Q_2 t + R_2 & \text{в промежутке времени } \tau \leq t \leq T. \end{cases}$$

Подстановка граничных условий (20) дает

$$R_1 = 0, \quad R_2 = V_1 + V_2 - \alpha_2 T.$$

Значит,

$$u = \begin{cases} Q_1 t & \text{в промежутке времени } 0 \leq t \leq \tau, \\ Q_2(t - T) + V_1 + V_2 & \text{в промежутке времени } \tau \leq t \leq T. \end{cases} \quad (23)$$

В силу непрерывности экстремали оба его куса должны соединяться при $t = \tau$:

$$Q_1 \tau = Q_2(\tau - T) + V_1 + V_2. \quad (24)$$

Далее, в момент излома $t = \tau$ функция F должна удовлетворять условиям Вейерштрасса — Эрдмана:

$$\begin{aligned} F_{\dot{u}} \Big|_{t=\tau-0} &= F_{\dot{u}} \Big|_{t=\tau+0}, \\ F - \dot{u} F_{\dot{u}} \Big|_{t=\tau-0} &= F - \dot{u} F_{\dot{u}} \Big|_{t=\tau+0}. \end{aligned}$$

Первое условие выполняется в силу дифференцируемости функции $F(\dot{u})$, представляющей потребляемую мощность насоса. По этой причине второе условие можно записать так:

$$\dot{u} \Big|_{t=\tau-0} = \dot{u} \Big|_{t=\tau+0}. \quad (25)$$

Так как согласно (23)

$$\dot{u} = \begin{cases} Q_1 & \text{в промежутке времени } 0 \leq t \leq \tau, \\ Q_2 & \text{в промежутке времени } \tau \leq t \leq T, \end{cases}$$

то подстановка этих значений в (25) даст $Q_1 = Q_2$. Тогда из (24) будем иметь

$$Q_1 = \frac{V_1 + V_2}{T}$$

и выражение (23) приобретет единый вид

$$u = Q_1 t \quad \text{в промежутке времени } 0 \leq t \leq T.$$

Следовательно, искомая экстремаль не имеет изломов. Аналогичные выкладки можно повторить для трех и более числа трубопроводов, подключенных к насосу.

Вернемся к нашим двум трубопроводам. На участке ОК, $b=1$ Кроме того, при перемещении от точки О к точке К имеем $\Delta x = V_1$, $\Delta y = V_2$. Из (9) и (10) получим

$$Q(H) = \left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) q_2(H), \quad a = \frac{q_2(H)V_1}{q_1(H)V_2}.$$

Первое уравнение позволяет определить рабочую точку насоса: напор H и подачу Q . Подставив найденное значение H во второе равенство, получим необходимую открытость первого трубопровода.

Выводы

1. Для экономичной работы насоса необходимо так отрегулировать потоки в трубопроводах, чтобы требуемые объемы заполнились одновременно.
2. При этом, по крайней мере, один трубопровод должен быть полностью открыт.

Список литературы

1. Галеев А. С., Горшков А. Н., Ларин П. А. Выбор экономичного режима работы насоса, качающего на два коллектора. Ученые записки АГНИ. Том XII, ч. 1. – Альметьевск: АГНИ, 2014.
2. Галеев А. С., Сулейманов Р. Н., Филимонов О. В. Эксплуатация насосного оборудования в нефтегазовой отрасли: учеб. пособие. – Альметьевск: АГНИ, 2004. – 124 с.
3. Сулейманов Р. Н., Галеев А. С., Бикбулатова Г. И. Эффективность работы насосных агрегатов. – Уфа, 2004. – 109 с.
4. Галеев А. С., Сулейманов Р. Н., Бикбулатова Г. И. К проблеме повышения эффективности работы насосных агрегатов // Технологии ТЭК. – М.: Нефть и Капитал, 2005. – № 2. – С. 92-97.
5. Колосов Б. В., Сулейманов Р. Н., Котович А. А. К вопросу определения гидравлического КПД центробежных насосов системы поддержания пластового давления // Нефтепромысловое дело. – М.: ВНИИОЭНГ, 2001. – № 10. – С. 15-18.
6. Сулейманов Р. Н., Султанов Б. З., Каплан Л. С. Учет сжимаемости газированных жидкостей при их перекачке высоконапорными насосами // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 4. – С. 107-109.
7. Сулейманов Р. Н. Методика интерпретации замеров гидравлического КПД насосов на базе процедуры сравнения с паспортными данными // Технологии ТЭК. – М.: Нефть и Капитал, 2004. – № 1. – С. 61-66.

Сведения об авторах

Галеев Ахметсалим Сабирович, д. т. н., профессор кафедры «Нефтегазовое оборудование», Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел. 8(8553)310124, e-mail: agni-ngo@mail.ru

Ларин Петр Андреевич, ст. преподаватель кафедры информационных технологий, математики и естественных наук, филиал Альметьевского государственного нефтяного институт, г. Октябрьский, тел. 8(34767)65909, e-mail: itmen@of.ugntu.ru

Бикбулатова Голия Ильдусовна, к. т. н., доцент, заведующая кафедрой «Нефтегазовое оборудование», Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел. 8(8553)310124, e-mail: agni-ngo@mail.ru

Сулейманов Раис Насибович, к. т. н., доцент кафедры информационных технологий, математики и естественных наук, филиал Альметьевского государственного нефтяного институт, г. Октябрьский, тел. 8(34767)65909, e-mail: itmen@of.ugntu.ru

Болтнева Юлия Анатольевна, ст. преподаватель кафедры «Нефтегазовое оборудование», Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел. 8(8553)310124, e-mail: agni-ngo@mail.ru

Information about the authors

Galeev A. S., Doctor of Engineering, professor of the Department of «Oil and gas production equipment», Almetievsk State Petroleum Institute, Almetievsk, tel. 8(8553)310124, e-mail: agni-ngo@mail.ru

Larin P. A., senior lecturer of the Department of Information Technology, Mathematics and Natural Sciences, branch of Almetievsk State Petroleum Institute, Oktyabrskiy, tel. 8(34767)65909, e-mail: itmen@of.ugntu.ru

Bikbulatova G. I., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the Department of «Oil and gas production equipment», Almetievsk State Petroleum Institute, Almetievsk, tel. 8(8553)310124, e-mail: agni-ngo@mail.ru

Suleimanov R. N., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the Department of Information Technology, Mathematics and Natural Sciences, branch of Almetievsk State Petroleum Institute, Oktyabrskiy, tel. 8(34767)65909, e-mail: itmen@of.ugntu.ru

Boltneva Yu. A., senior lecturer of the Department of «Oil and gas production equipment», Almetievsk State Petroleum Institute, Almetievsk, tel. 8(8553)310124, e-mail: agni-ngo@mail.ru