

А.В. Стрекалов, М.С. Королев

ТЕХНОЛОГИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ СЕТЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Рассмотрены алгоритмы и рекомендации по управлению гидравлическими системами трубопроводной сети, включающей насосы, арматуру и скважины.

Управление, трубопроводная система, гидравлика, технология.

Для технических гидросистем (ТГ) со сложной структурой, представленной сетью трубопроводов, множеством насосных агрегатов, трубопроводной арматуры и скважин, задача оптимального и оперативного регулирования гидравлических режимов (давлений и расходов жидкости) работы скважин и других элементов является актуальной.

Суть известных способов решения данной задачи в большинстве гидросистем нефтяных промыслов сводится к варьированию технических показателей гидросистемы таким образом, чтобы обеспечить заданные технологией гидравлические параметры на наиболее ответственных участках гидросистемы. На примере гидросистем поддержания пластового давления (ППД) это преимущество в каждой скважине нагнетательного фонда.

В качестве устройств (средств) для изменения давления и расхода жидкости в большинстве гидросистем применяются штуцеры, диафрагмы, клапанная или золотниковая запорная арматура (ЗА), необходимые для создания дополнительного гидравлического сопротивления на определенных участках схемы. Их применение позволяет управлять потокораспределением [1].

Согласно ранее проведенному анализу [2], следует полагать, что наиболее рациональным является процесс автоматического (в отношении динамических технических показателей) регулирования гидросистем, так как иные способы во многом опираются на последовательный подбор, требующий существенных затрат и носящий неопределенный характер вследствие возникновения нестационарных процессов в системе.

Основная проблема автоматического управления гидросистемой заключается в следующем: изменение технического показателя (например, положения затвора) хотя бы в одном элементе влечет изменение гидравлических параметров (температуры, расхода и давления жидкости) во всех элементах гидросистемы. Поэтому, вследствие постоянного изменения состояния гидросистемы: включение/отключение скважин, насосов, перекрытие линий, износ элементов и т.п., описать постоянный закон управления запорной арматурой невозможно.

В связи с этим необходимо применение автономных гидравлических регуляторов (ГР), которые должны обеспечивать оперативное и максимально локализованное воздействие на ТГ.

Основными технологическими задачами и условиями установки гидравлического регулятора, который предлагается использовать, являются: 1) удержание в определенном диапазоне величины объемного расхода жидкости в каждую скважину или куст; 2) удержание давления в определенном диапазоне, который устанавливается в качестве оптимального: для гидросистем ППД — верхний предел давления гидравлического разрыва пласта, для систем нефтесбора — верхний предел напряжения в трубах, обусловленный их прочностью; 3) перемещение затвора, которое не должно вызывать гидравлических уда-

ров; 4) время принудительного изменения положения затвора более расчетного времени выхода системы на стационарный режим [2]; 5) не может быть установлено более одного регулятора в линейной структурной взаимосвязи (грубо — на одной линии) (рис. 1); 6) в древовидной структуре не могут быть установлены регуляторы на всех ветвях (рис. 2, а); количество регуляторов должно быть меньше или равно $N_V - 1$, где N_V — количество ветвей (рис. 2, б).

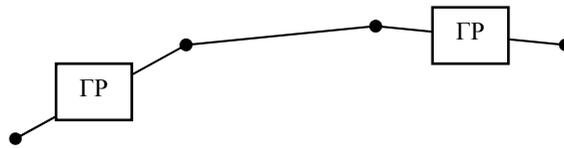


Рис. 1. Недопустимое расположение регуляторов по рекомендуемой технологии регулирования

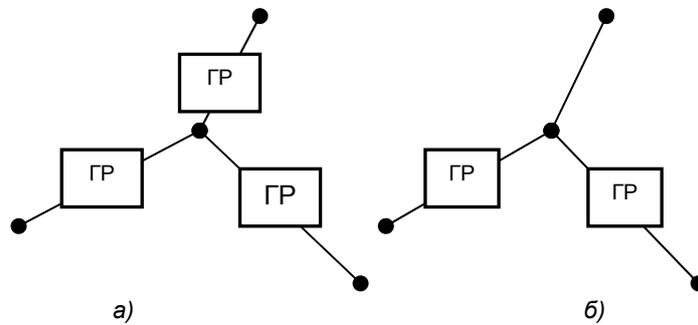


Рис. 2. Расположение регуляторов по рекомендуемой технологии регулирования: а) недопустимое; б) предельно допустимое

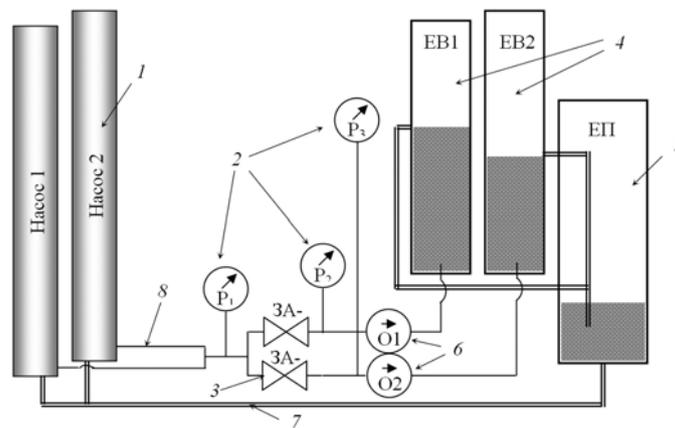


Рис. 3. Схема стендовой установки: 1 — насосные агрегаты; 2 — датчики давления; 3 — дросселирующая запорная арматура; 4 — выкидные емкости; 5 — приемная емкость; 6 — датчики расхода (расходомеры); 7 — приемный коллектор; 8 — выкидной коллектор

Общий принцип действия автоматических регуляторов расхода состоит в избирательном дросселировании потока в зависимости от текущего расхода жидкости. В связи с особенностями эксплуатации гидросистем нефтяных про-

мыслов (высокое давление и агрессивность рабочей жидкости) требуется в качестве дросселирующего элемента использовать **клапанную запорную арматуру**, преимущество которой заключается в отсутствии вероятности прикипания затвора, работе в условиях агрессивных сред и обеспечении требуемой плавности перекрытия потока. Рассмотрим показатели испытания предлагаемого регулятора на модели (рис. 4) стендовой установки (рис. 3).

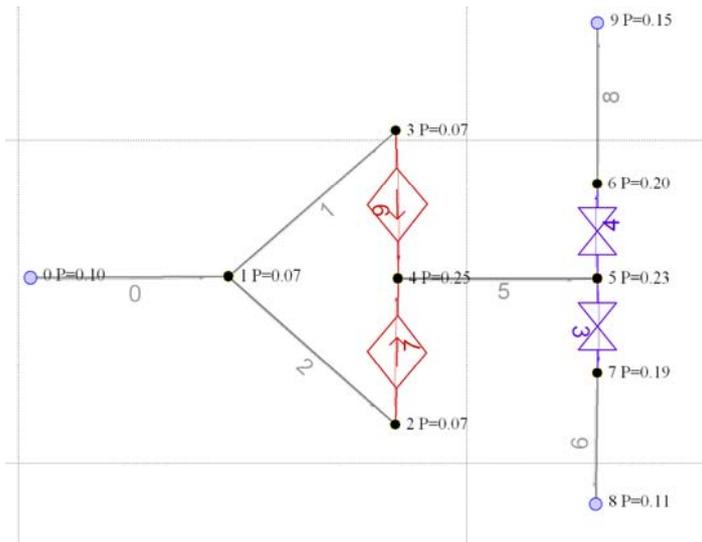


Рис. 4. Схема модели стендовой установки, представленной в программном комплексе [3]

Гидравлические характеристики ЗА-1, ЗА-2 (стендовая установка) — звеньев 3, 4 (модель) будем рассчитывать по формуле [1]

$$\Delta p = f_{pp}(q, h, d) = \left(2.7 - 0.8 \frac{d}{h} + 0.14 \frac{d^2}{h^2} \right) \rho q^2 \frac{8}{(\pi d^2)^2}, \quad (1)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³; q — расход жидкости, м³/с; h — высота затвора над седлом, м; d — диаметр поперечного сечения, м.

Основанием для изменения положения затвора будут функции регулировочных кривых, которые рассчитываются в модели [2], а для опытного образца привязываются к фактическим замерам расхода и положению затвора.

Положение затвора из регулировочной кривой вычисляется на основании формулы

$$K = \left(2.7 - 0.8 \frac{d}{h} + 0.14 \frac{d^2}{h^2} \right) \quad (2)$$

при известном K и наоборот.

Установим требуемые (например, по технологии) величины расходов для участков ЗА-1, ЗА-2 (стендовая установка) — звенья 3, 4 (модель) в значения $Q_3 = 50$ м³/сут и $Q_4 = 80$ м³/сут. Приведем систему в действие посредством пуска насосов (рис. 3, 1; рис. 4, звенья 6, 7) и проследим модельную динамику расходов.

Зададим простой алгоритм коррекции положения затвора: будем снижать коэффициент K на 10 д.е. при текущем расходе q меньше заданного Q , на-

пример, для звена 3 — $q_3 < Q_3$; коэффициент K будем увеличивать на 10 д.е. при $q > Q$. Условие требуемой точности — $\left| \frac{q - Q}{Q} \right| < 1\%$.

На рис. 5 показана динамика скоростей потока и изменяемого коэффициента местного сопротивления в звене 4 от времени при условии практически мгновенной реакции регулирования (времени между изменением положения затвора в зависимости от расхода жидкости).

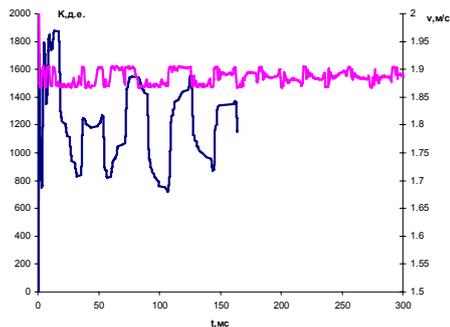


Рис. 5. Расчетная динамика расхода в звене 4 от времени при автоматической корректировке коэффициента местного сопротивления (мгновенная 0.001 мс реакция)

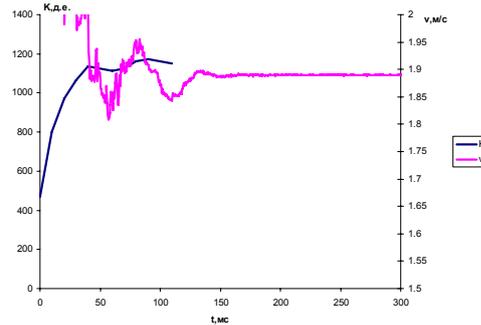


Рис. 6. Расчетная динамика расхода в звеньях 4 от времени при автоматической корректировке коэффициента местного сопротивления (реакция 10 мс)

Как видно, мгновенная реакция при регулировании — изменении положения затвора провоцирует колебания давления и скорости потока в ЗА, а следовательно, и во всей гидросистеме. В условиях не мгновенной реакции — 10 мс работа модели регулятора становится более «гладкой», т.е. волновые процессы протекают менее интенсивно (рис. 6).

Дальнейшее увеличение времени реакции (опроса) ведет к еще большему снижению проявлений волновых процессов (рис. 7).

Из вышесказанного следует вывод, что время реагирования регулирующего воздействия не должно быть существенно меньше времени выхода гидросистемы на стационарный режим, которое может быть вычислено по следующей методике.

Формула для расчета времени необходимого для выхода системы на стационарный режим:

$$\delta = B \eta(\bar{D}) \frac{L}{\Psi^A} [\ln(\bar{\beta}) + 1] e^{\frac{\bar{q}}{\Delta v} \varphi} \quad (3)$$

где \bar{q} — средний расход жидкости до возмущения, $\text{м}^3/\text{с}$; Δ — абсолютная шероховатость, м; ν — кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$; L — суммарная длина трубопроводов, м; φ — коэффициент пропорциональности, равный 10^{-7} ; B — коэффициент пропорциональности, равный 10^{-2} ; $\bar{\beta} = \frac{\beta}{\beta^*}$ — относительная сжимаемость, равная отношению текущей сжимаемости к сжимаемости $\beta^* = 1.0$ 1/ГПа, при этом $\beta > \beta^*$; $\eta(\bar{D})$ — вспомогательная функция, с/м; A — коэффициент, пропорциональности равный 2.1 д.е.; Ψ — средний относительный скачок давления во всех точках возбуждения:

$$\Psi = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - P_0)}{NP_0}, \quad (4)$$

где N — количество узлов, в которых изменяется давление; P_i — новое давление в узле, МПа; P_0 — давление в остальных узлах и звеньях системы.

В формуле для расчета времени выхода системы на стационарный режим функция $\eta(\bar{D})$ должна вычисляться по формуле

$$\eta(\bar{D}) = \frac{1}{\lambda} \left(1.6 \frac{1}{\bar{D}^{0.83}} + 8.2 \bar{D}^{0.79} \right), \quad (5)$$

где $\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} D_i}{n_i d}$ — относительный средний диаметр трубопроводов в ТГ; d — условный стандартный диаметр, равный 0.1 м; D_i — внутренний диаметр трубопровода звена i ; n_i — количество трубопроводов; λ — коэффициент пропорциональности, равный 3000 м/с.

На рис. 8 показаны кривые изменения расхода и положения затвора для ЗА-1, полученные в результате стендовых испытаний. В условиях стенда степень дросселирования запорных элементов ЗА-1, ЗА-2 в определенные моменты времени изменялась вручную. Испытания позволяют сделать вывод об эффективности будущего опытного образца.

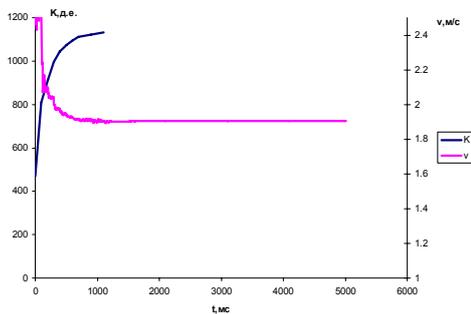


Рис. 7. Расчетная динамика расхода в звене 4 от времени при автоматической корректировке коэффициента местного сопротивления (реакция 100 мс)

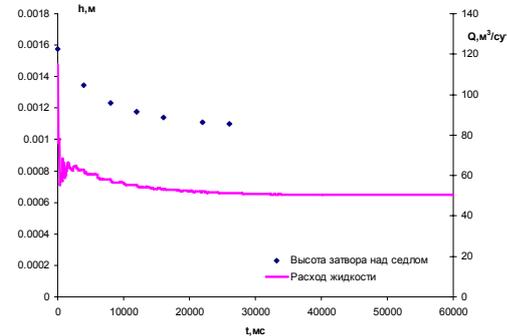


Рис. 8. Динамика положения затвора и расхода жидкости в ЗА-2

Расчет изменения положения затвора происходил по следующему алгоритму посредством последовательных приближений.

1. Если интервал времени опроса выше либо равен времени выхода на стационарный режим, то определяется относительная погрешность текущего расхода жидкости q относительно требуемого Q

$$\varepsilon = \left| \frac{q - Q}{Q} \right|. \quad (6)$$

2. Если выполняется условие

$$\varepsilon > 1 \%, \quad (7)$$

то рассчитывается отношение

$$\alpha = \left| \frac{q}{Q} \right|. \quad (8)$$

3. Если $\alpha > 1$, то

$$K_{t+1} = K_t + \varepsilon \cdot A, \quad (9)$$

иначе

$$K_{t+1} = K_t - \varepsilon \cdot A, \quad (10)$$

где t — номер шага времени или итерации; A — показатель скорости перемещения затвора от 1 до 10 000 д.е.

4. С целью предотвращения перекрытия затвора, если $K_{t+1} \leq 0$, то $K_{t+1} = 1$.

Если величина $\varepsilon < 1\%$, то положение считается определенным на данный момент времени. В противном случае алгоритм переходит к п. 1.

Обеспечение точности положения затвора осуществлялось поворотом рукоятки штока на угол от 45° до 360° . Начальное положение затвора относительно полностью закрытого крана и соответствующее $K = 100$ составляет 5.1 мм, что приблизительно 3720° (10.3 оборота).

Выводы

1. При установке регуляторов в гидросистему должны выполняться условия: более одного регулятора не должно быть установлено в линейной структурной взаимосвязи; количество регуляторов должно быть меньше или равно количеству ветвей, соединенных с общим узлом, минус одна в системах с сетевой древовидной структурой.

2. Последовательные приближения при установлении необходимого положения затвора позволяют вывести систему на требуемый стационарный режим за конечное время.

3. Выполнение условия скорости перемещения затворов в дросселирующей арматуре позволяет избежать факторов образования «взаимовозбуждающих» гидравлических волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Стрекалов А.В.* Математические модели гидравлических систем для управления системами поддержания пластового давления. Тюмень: Тюм. дом печати, 2007. 664 с.
2. *Морозов В.Ю.* Технология регулирования систем поддержания пластового давления нефтяных промыслов: Дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2010. 122 с.
3. *Свидетельство № 2002611864* о регистрации программы для ЭВМ. Комплекс универсального моделирования технических гидравлических систем поддержания пластового давления (Hydra'Sym). М., 2002.

A.V. Strekalov, M.S. Korolev

Technology of a distributed control over hydraulics of a network structure

The article considers algorithms and recommendations on the hydraulics control of a pipeline network, including pumps, armature and wells.

Control, pipeline system, hydraulics, technology.