

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 62-52

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СКВАЖИН

**А.А. Андреев, П.П. Замосковин, В.В. Кожакин,
В.В. Бочарников, В.Е. Родованов**

Рассмотрена одна из основных частей математической модели – методика расчета управляющих воздействий – системы автоматического регулирования производительности скважин, позволяющей поддерживать стабильность давления газожидкостной смеси с учетом обеспечения оптимальной работы скважин в автоматическом режиме.

Ключевые слова: математическая модель, газовый промысел, автоматическое управление, давление газожидкостной смеси, производительность скважины.

Key words: mathematical model, automatic control, gas-field, liquid-gas mixture pressure, wells productivity.

При создании системы автоматического регулирования производительности скважин (далее – Системы) был сформулирован новый комплексный подход к управлению сложным технологическим процессом добычи и транспорта газожидкостной смеси (ГЖС) по основным измеряемым параметрам (давление и расход), позволяющий поддерживать стабильность давления при случайных воздействиях со стороны газоперерабатывающего завода и объектов промысла на общий отбор ГЖС с учетом обеспечения оптимальных режимов работы скважин Астраханского газоконденсатного месторождения (АГКМ) и строгом выполнении технологических регламентов эксплуатации скважин и подачи ГЖС на переработку в автоматическом режиме [4]. Одна из основных задач, стоящая при реализации Системы, заключалась в выработке управляющих воздействий для поддержания заданного давления на входе путем регулирования производительности скважин.

На изменение величины заданной общей производительности $F_{\text{пр_здн}}$ для следующей итерации по сравнению с текущей

$$F_{\text{пр_здн.}[i+1]} = F_{\text{пр_здн.}[i]} \pm F_{\text{пр_здн_рег}}, \quad (1)$$

влияет только *регулирование по давлению*, поэтому величина изменения $F_{\text{пр_здн_рег}}$ рассчитывается Системой для обеспечения соблюдения регламента.

Смысл регулирования по давлению – рассчитать новое значение общей заданной производительности промысла $F_{\text{пр_здн_рег}}$, которое распределяется по скважинам до наступления следующей итерации в зависимости от изменения давления на критичную величину на текущей итерации [2].

$$F_{\text{пр_здн_рег}} = F_{\text{пр_здн}} * k_{\text{рег}}. \quad (2)$$

Следовательно, исходя из (1)

$$F_{\text{пр_здн.}[i+1]} = F_{\text{пр_здн.}[i]} \pm F_{\text{пр_здн.}[i]} * k_{\text{рег}} \quad (3)$$

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Коэффициент $k_{\text{рег}}$ зависит от удаления текущего давления $P_{\text{пр}}$ от номинального $P_{\text{ном}}$ на интервале граничных значений (см. рис.): чем больше удаление, тем больше величина $k_{\text{рег}}$, зависящая от выбираемой по алгоритму формулы и настроечных коэффициентов.

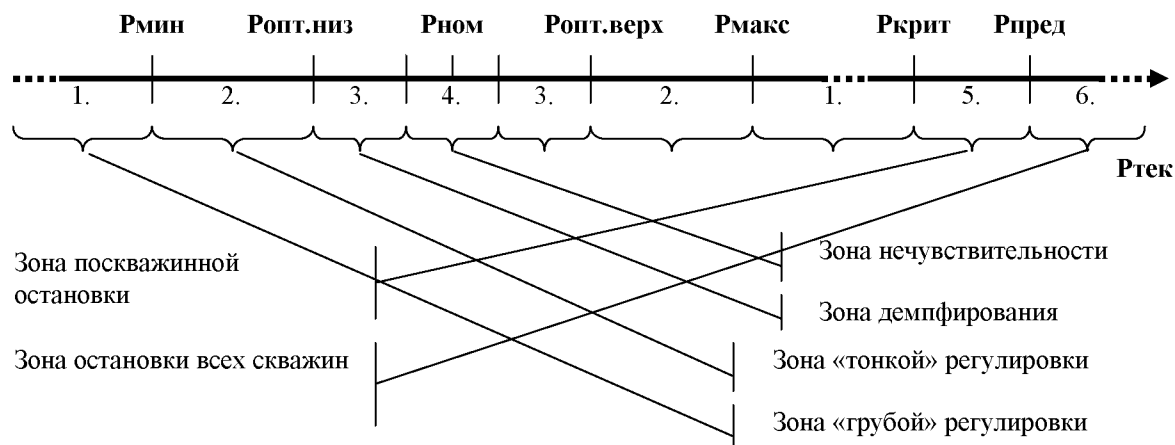


Рис. Интервал граничных значений давления

Текущее значение давления $P_{\text{пр}}$ всегда находится в одном из определенных в математической модели интервалов на всем диапазоне возможных значений давления на входе газоперерабатывающего завода (ГПЗ):

- зона нечувствительности;
- зона демпфирования (зона регламентных значений);
- зона «тонкой» регулировки;
- зона «грубой» регулировки;
- зона поскважинной остановки;
- зона остановки всех скважин.

В зависимости от текущего значения давления $P_{\text{пр}}$ и величины его отличия от номинального значения $P_{\text{ном}}$ для его приведения в математической модели используется три вида регулировок:

- «грубая» регулировка (зависит от коэффициента $k_{\text{груб_рег}}$);
- «тонкая» регулировка (зависит от коэффициента $k_{\text{тонк_рег}}$);
- операция демпфирования (не рассматривается в данной статье).

После выдачи регулировки необходимо учитывать инерционность системы, так как выданное воздействие на скважины, находящиеся на различном удалении от установки предварительной подготовки газа (УППГ), окажет влияние на давление на входе завода только через некоторый промежуток времени [3].

Поэтому после выдачи регулирующего воздействия, вызванного «грубой» или «тонкой» регулировкой, Система выставляет временной счетчик задержки $t_{\text{рег}}$, необходимый для предотвращения повторной выдачи воздействия, пока выданные на скважины изменения не отразятся на общем результирующем давлении на входе завода. На время действия счетчика приостанавливается выдача всех регулировок с таким же или меньшим приоритетом (самый высокий приоритет у «грубой» регулировки) с аналогичным вектором направления. Например, «грубая» регулировка при необходимости будет произведена даже несмотря на то, что не окончен цикл ожидания после выдачи «тонкой» регулировки с аналогичным вектором направления [1].

Величины $t_{\text{рег}}$, $k_{\text{тонк_рег}}$, $k_{\text{груб_рег}}$ – настроечные параметры системы. В процессе эксперимента для подбора их оптимальных значений варьировались не только процентные отноше-

ния регулировок $k_{\text{тонк_рег}}$ и $k_{\text{груб_рег}}$, но и учитывались различные расстояния до скважин каждого УППГ (средние, максимальные, минимальные и др.), влияющие на параметр $t_{\text{рег}}$ [2].

«Грубая» регулировка. При значительных отклонениях (превышение предельно допустимых значений $P_{\text{мин}}$ или $P_{\text{макс}}$) используются формулы «грубой» регулировки:

$$k_{\text{рег}} = ((P_{\text{мин}}/P_{\text{пр}} - 1) * k_{\text{подстр}} + 1) * k_{\text{груб_рег}} \quad \text{при } P_{\text{пр}} \leq P_{\text{мин}} \quad (4)$$

и

$$k_{\text{рег}} = (-1) * ((P_{\text{пр}}/P_{\text{макс}} - 1) * k_{\text{подстр}} + 1) * k_{\text{груб_рег}} \quad \text{при } P_{\text{пр}} \geq P_{\text{макс}}, \quad (5)$$

где $k_{\text{груб_рег}}$ – процентное отношение от текущей общей заданной производительности УППГ при попадании давления в зону «грубой» регулировки; $k_{\text{подстр}}$ – коэффициент усиления, вспомогательный коэффициент для зоны «грубой» регулировки, определяющий скорость увеличения коэффициента $k_{\text{рег}}$ по мере удаления текущего давления от номинала.

Смысл действий, заключенных в скобках, в формулах (4) и (5) состоит в оценке удаленности текущего давления $P_{\text{пр}}$ от соответствующего граничного значения ($P_{\text{мин}}$ или $P_{\text{макс}}$). При равенстве текущего давления последнему граничному значению формулы принимают вид:

$$k_{\text{рег}} = k_{\text{груб_рег}}. \quad (6)$$

Однако чем больше удаление, тем больше должно быть выдаваемое управляющее воздействие, вследствие этого коэффициент $k_{\text{груб_рег}}$ в математической модели рассчитывается динамически. Для этого был введен дополнительный коэффициент $k_{\text{подстр}}$, влияющий на скорость изменения коэффициента «грубой» регулировки $k_{\text{груб_рег}}$. В описываемой системе для АГКМ $k_{\text{подстр}} = 0,8$.

Исходя из этого, формула (3) для расчета нового значения общей заданной производительности промысла при выдаче «грубой» регулировки при необходимости существенного увеличения будет иметь вид:

$$F_{\text{пр_зdn}, [i+1]} = F_{\text{пр_зdn}, [i]} \pm F_{\text{пр_зdn}, [i]} * (((P_{\text{пр}}/P_{\text{макс}} - 1) * k_{\text{подстр}} + 1) * k_{\text{груб_рег}}) \quad (7)$$

а при необходимости существенного уменьшения:

$$F_{\text{пр_зdn}, [i+1]} = F_{\text{пр_зdn}, [i]} \pm F_{\text{пр_зdn}, [i]} * (((P_{\text{мин}}/P_{\text{пр}} - 1) * k_{\text{подстр}} + 1) * k_{\text{груб_рег}}) \quad (8)$$

Таким образом, Система рассчитает необходимость выдачи «грубой» регулировки, когда текущее давление $P_{\text{пр}}$ находится за граничными значениями ($P_{\text{мин}}$ или $P_{\text{макс}}$), при следующих обстоятельствах:

- если таймер ожидания обнулен;
- если не выполняется «грубая» регулировка с аналогичным вектором направления.

Исходя из вышеизложенного, при «грубой» регулировке функция расчета величины $F_{\text{пр_зdn_рег}}$ в общем случае зависит от следующих параметров:

$$F_{\text{пр_зdn_рег}} = f(F_{\text{пр_зdn}}, k_{\text{груб_рег}}, k_{\text{подстр}}, P_{\text{пр}}, P_{\text{макс}}, P_{\text{мин}}). \quad (9)$$

«Тонкая» регулировка. Незначительное отклонение от оптимального интервала вызывает расчет корректирующего воздействия. Если текущее давление находится в предельно допустимом интервале $[P_{\text{мин}} \div P_{\text{макс}}]$, но не попадает в интервал оптимальных значений $[P_{\text{опт_низ}} \div P_{\text{опт_верх}}]$, т.е. находится между граничным и оптимальным граничным значениями давления – в зоне «тонкой» регулировки, то используется формула:

$$k_{\text{рег}} = (1 + k_{\text{произв}}) * k_{\text{вспом_кф}} \quad (10)$$

где $k_{\text{вспом_кф}}$ – временный вспомогательный коэффициент; $k_{\text{произв}}$ – коэффициент влияния изменения производной.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Временный вспомогательный коэффициент $k_{\text{вспом_кф}}$ при необходимости увеличения общей заданной производительности рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{вспом_кф}} = 0,5 * k_{\text{тонк_рег}} * (1 + (P_{\text{опт_низ}} - P_{\text{пр}}) / (P_{\text{опт_низ}} - P_{\text{мин}})) \quad (11)$$

при $P_{\text{мин}} < P_{\text{пр}} \leq P_{\text{опт_низ}}$

а при необходимости уменьшения:

$$k_{\text{вспом_кф}} = (-1) * 0,5 * k_{\text{тонк_рег}} * (1 + (P_{\text{пр}} - P_{\text{опт_верх}}) / (P_{\text{мах}} - P_{\text{опт_верх}})) \quad (12)$$

при $P_{\text{опт_верх}} \leq P_{\text{пр}} < P_{\text{мах}}$,

где $k_{\text{тонк_рег}}$ – процент от текущей общей заданной производительности УППГ.

Значение выражения в скобках вычисляет местоположение давления в текущем интервале, так как при «тонкой» регулировке коэффициент $k_{\text{вспом_кф}}$ рассчитывается динамически на всем промежутке от оптимального до граничного значений, изменяясь прямо пропорционально в интервале $[k_{\text{тонк_рег}}/2, k_{\text{тонк_рег}}]$.

Коэффициент влияния изменения производной $k_{\text{произв}}$ является величиной, способной несколько усилить или снизить значение коэффициента $k_{\text{вспом_кф}}$ в зависимости от поведения производной по давлению $P_{\text{пр}}^I$.

Если при выдаче уставки на повышение производная по давлению $P_{\text{пр}}^I$ снижалась на протяжении трех итераций ($[i-2]$, $[i-1]$, $[i]$), то будет произведено усиление выходного коэффициента $k_{\text{рег}}$. Коэффициент $k_{\text{рег}}$ усиливается и при выдаче уставки на понижение, если производная по давлению $P_{\text{пр}}^I$ увеличивалась на протяжении трех итераций.

Тогда

$$k_{\text{произв}} = k_{\text{усил}} \quad \text{при } P_{\text{мин}} < P_{\text{пр}[i]} \leq P_{\text{опт_низ}}, P_{\text{пр}[i-2]}^I < 0, P_{\text{пр}[i-1]}^I < 0, P_{\text{пр}[i]}^I < 0 \quad (13)$$

и

$$k_{\text{произв}} = k_{\text{усил}} \quad \text{при } P_{\text{опт_верх}} \leq P_{\text{пр}[i]} < P_{\text{мах}}, P_{\text{пр}[i-2]}^I > 0, P_{\text{пр}[i-1]}^I > 0, P_{\text{пр}[i]}^I > 0 \quad (14)$$

Снижение выходного коэффициента $k_{\text{рег}}$ происходит:

- когда давление $P_{\text{пр}}$ ниже номинального $P_{\text{ном}}$ и необходима «тонкая» регулировка на повышение, но происходит постепенный его рост;
- когда давление $P_{\text{пр}}$ выше номинального $P_{\text{ном}}$ и необходима «тонкая» регулировка на понижение, но происходит постепенное его уменьшение.

Тогда

$$k_{\text{произв}} = k_{\text{сниж}} \quad \text{при } P_{\text{мин}} < P_{\text{пр}[i]} \leq P_{\text{опт_низ}}, P_{\text{пр}[i-2]}^I > 0, P_{\text{пр}[i-1]}^I > 0, P_{\text{пр}[i]}^I > 0 \quad (15)$$

и

$$k_{\text{произв}} = k_{\text{сниж}} \quad \text{при } P_{\text{опт_верх}} \leq P_{\text{пр}[i]} < P_{\text{мах}}, P_{\text{пр}[i-2]}^I < 0, P_{\text{пр}[i-1]}^I < 0, P_{\text{пр}[i]}^I < 0. \quad (16)$$

В остальных случаях изменение коэффициента $k_{\text{вспом_кф}}$ не происходит:

$$k_{\text{произв}} = 0, k_{\text{рег}} = k_{\text{вспом_кф}}. \quad (17)$$

У «грубой» регулировки значительно больший выходной коэффициент $k_{\text{рег}}$, так как она служит для быстрого приведения текущего давления в зону оптимальных значений в связи с существенным отличием текущего давления от номинального.

Колебания давления, которые могут возникнуть, нивелируются в дальнейшем посредством тонких регулировок и/или операций демпфирования.

Таким образом, Система рассчитает необходимость выдачи «тонкой» регулировки, когда текущее давление $P_{\text{пр}}$ находится в предельно допустимом интервале $[P_{\text{мин}}, P_{\text{мах}}]$, но не попадает в интервал оптимальных значений, при следующих обстоятельствах:

- если таймер ожидания обнулен;
- если не выполняются «грубая» или «тонкая» регулировки с аналогичным вектором направления.

Таким образом, при «тонкой» регулировке функция расчета величины $F_{\text{пр_з_дн_рег}}$ в общем случае зависит от следующих параметров:

$$F_{\text{пр_з_дн_рег}} = f(F_{\text{пр_з_дн}}, k_{\text{тонк_рег}}, k_{\text{произв}}, P_{\text{пр}}, P_{\text{макс}}, P_{\text{мин}}, P_{\text{опт_верх}}, P_{\text{опт_низ}}, P_{\text{пр}}^I). \quad (18)$$

Система автоматического регулирования производительности скважин «Комплексная энергосберегающая автоматизированная система оптимизации работы промысла АГКМ» [5] внедрена в промышленную эксплуатацию в Газопромысловом управлении ООО «Газпром добыча Астрахань». Результаты эксплуатации показывают, что Система позволяет:

- поддерживать более стабильные параметры газожидкостной смеси на входе газоперерабатывающего завода, что сглаживает колебания режима скважин и объектов газопромыслового управления и установок завода;
- повысить качество управления, обеспечивая более близкую к оптимальной по сравнению с ручным регулированием загрузку завода;
- обеспечить систематическое и неукоснительное соблюдение технологических регламентов эксплуатации скважин и др.

Библиографический список

1. **Авязов, Д. З.** Концептуальная модель комплексной системы автоматического управления Астраханским газовым промыслом [Текст] // Компьютерные технологии поддержки принятия решений в диспетчерском управлении газотранспортными и газодобывающими системами «ДИСКОМ-2009»: сб. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. / Д. З. Авязов, П. П. Замосковин, А. А. Андреев, В. Е. Родованов. – М., 2009. – С. 106–124.
2. **Андреев, А. А.** Информационно-измерительная и управляющая система стабилизации давления добываемой газожидкостной смеси астраханского месторождения [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Андреев. – Астрахань, 2005.
3. **Круглов, Ю. И.** Оптимизация режима работы газоконденсатных скважин Астраханского ГКМ [Текст] / Ю. И. Круглов, В. С. Семенякин, А. А. Соболев // Наука и техника углеводородов. – 2001. – № 4. – С. 38–40.
4. **Круглов, Ю. И.** Особенности разработки Астраханского газоконденсатного месторождения [Текст] / Ю. И. Круглов, А. К. Токман, А. И. Масленников // Наука и техника углеводородов. – 2001. – № 4. – С. 44–46.
5. **Пат.** на полезную модель 96675 Российская Федерация, МПК⁷ G06F13/00. Информационно-управляющая аналитическая система комплексной оптимизации технологических режимов скважин [Текст] / Авязов Д. З., Андреев А. А., Богомолов Н. С., Бочарников В. В., Замосковин П. П., Кожанкин В. В., Михайленко С. А., Невшупа А. П., Пономаренко Д. В., Родованов В. Е.; заявитель и патентообладатель ООО «Газпром добыча Астрахань». – 2010111825/22, заявл. 26.03.2010, опубл. 10.08.2010. – Бюл. № 22. – 3 с.