

УГЛЕВОДОРОДЫ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
Наука и Техника
№2 (34) 2008 В газовой промышленности

ГЕОЛОГИЯ РАЗРАБОТКА ТРАНСПОРТИРОВКА

ДОБЫЧА ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ ЭНЕРГЕТИКА

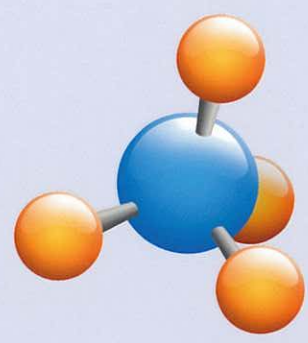
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ ЭКОНОМИКА

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ДИАГНОСТИКА ГЕОФИЗИКА

АВТОМАТИЗАЦИЯ





Х. Б. Сиахаан, Международный исследовательский институт г. Ставангера, Норвегия
О.М. Аамо, Бьярне А. Фосс, Отделение инженерной кибернетики,
 Норвежский университет науки и технологии

Разработка модели предотвращения закупоривания в вертикальных промысловых трубопроводах

H. B. Siahhaan, O. M. Aamo, B. A. Foss

State Feedback Design for Riser-Based Slugging Models

This paper addresses the use of state feedback for riser-based slugging models. The purpose of the feedback is to suppress severe slugging in the riser of multiphase flow pipeline systems by manipulating the choke in the topside of the pipeline automatically. The feedback is designed based on the input-output linearization method from systems theory, and incorporates the saturation effect of the choke. The feedback design can be used as a guideline on selecting the variable to be controlled provided some conditions are satisfied. In case testing the condition analytically becomes difficult, we provide a combination of analytical and empirical approach. By

Введение

Теоретические разработки в области стабилизации многофазных потоков углеводородов в нефтяных промысловых трубопроводах еще далеки от завершения. Проблема стабилизации потока связана с подавлением феномена колебаний (пульсаций) потока, вызываемых интенсивным образованием скоплений газа и жидкости, возникающих в трубопроводах при транспортировке многофазных углеводородных потоков. В свою очередь, причиной интенсивного образования газожидкостных скоплений в трубопроводах является наличие в трубопроводе наклонных или вертикальных секций. Газожидкостные скопления ведут к повреждению технологического оборудования, например сепараторов. Более того, высокая степень колебаний-пульсаций может стать причиной снижения объемов добычи нефти. Традиционным средством «борьбы» с пульсациями потока является его ручное дросселирование (регулирование потока газа с помощью запорной задвижки или вентиля). Реализация такого способа сопровождается уменьшением объемов добычи. В то же время при осуществлении автоматического контроля колебания/пульсации устраняются без падения объемов добычи (в работе [5] рассмотрены потенциальные преимущества предотвращения образования газожидкостных скоплений). Поэтому разработка стратегии управления технологическими процессами, ведущей к ослаблению интенсивности образования газожидкостных скоплений, имеет практическую важность и значимость.

жидкостных скоплений, возникающих в стояках трубопровода. Обобщенная модель базируется на уравнении баланса масс. С целью демонстрации эффективности предлагаемых СОС рассматриваются две модели, представляющие собой частные случаи обобщенной модели.

Обобщенная модель

Моделированию многофазных потоков посвящено достаточно большое количество работ [2,7,10,11]. В зависимости от объекта применения и исходных допущений может быть предложено несколько моделей. В данной работе рассматривается обобщенная модель, предназначенная для расчета параметров многофазного потока (нефти и газа), несущего с собой газожидкостные скопления, вызванные гравитационными явлениями.

Обобщенная модель может быть выражена системой дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\frac{dx_1}{dt} = w_{gc}(x) - w_g(x), \quad (2.1)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = w_g(x) - w_{gT}(x)u \quad (2.2)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = w_{oc}(x) - w_{oT}(x)u \quad (2.3)$$

Потоки w_{gc} , w_g , w_{gT} , w_{oc} , w_{oT} в уравнениях (2.1)–(2.3) зависят от многих переменных величин и от структуры рассматриваемой модели. Тем не менее, метод управления технологическими процессами в трубопроводе, предложенный в настоящей работе, не зависит от структуры модели, пока эта модель удовлетворяет условиям (2.1)–(2.3). Для различных структурных видов модели данного типа ниже будут рассмотрены модели двух классов, описанные в [1,10].

Схема системы управления с обратной связью по состоянию на базе линеаризации соотношения параметров вход-выход

В этом разделе нами разрабатывается принцип системы управления с обратной связью по состоянию, в основе которого лежит метод линеаризации соотношения параметров вход-выход [8]. В этом случае параметры выхода являются переменной и



Харди Б. Сиахаан – Международный исследовательский институт г. Ставангера, инженер-исследователь.

Оле М. Аамо – Норвежский университет науки и технологии, отделение инженерной кибернетики, профессор.

Бьярне А. Фосс – Норвежский университет науки и технологии, отделение инженерной кибернетики, профессор.

где $[x_1, x_2, x_3]^T$ отражает состояние системы, x_1 – это совокупная масса газа в объеме 1, x_2 – совокупная масса газа в объеме 2, x_3 – совокупная масса нефти, u – положение запорной задвижки/клапана на входе системы, w_{gc} – массовая скорость газа, перетекающего в объем 1, w_g – массовая скорость газа, перетекающего из объема 1 в объем 2, w_{gT} – массовая скорость газа, перетекающего через полностью открытую запорную задвижку промыслового подъемника, w_{oc} – массовая скорость нефти, втекающей в промысловый подъемник, w_{oT} – массовая скорость



зависит от состояния x . В этом случае допускается, что значение переменных состояния x определяется с помощью измерений. Случаи, когда значения переменных невозможно определить посредством измерений, в данной работе не рассматривались. Такие случаи могут стать объектом будущих исследований.

Предположим, что мы выбрали $\psi(x)$ и u соответственно в качестве управляемой переменной (выход) и независимой (управляющей) переменной (вход). Выбранная переменная $\psi(x)$ является непрерывной и ограничена областью определения D . Во всей работе нами принимается, что множество $\Omega_D := \{\psi(x) \in R_+ | x \in D\}$ содержит все допустимые значения ψ . Иными словами, D представляет собой рабочую область, которой должно принадлежать состояние x .

Мы можем переписать систему уравнений (2.1)–(2.3) следующим образом:

$$\frac{dx_1}{dt} = w_{gc}(x, \psi(x)) - w_g(x, \psi(x)), \quad (3.4)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = w_g(x, \psi(x)) - w_{gt}(x, \psi(x))u, \quad (3.5)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = w_{oc}(x, \psi(x)) - w_{ot}(x, \psi(x))u, \quad (3.6)$$

а динамика управляемой переменной может быть выражена как:

$$\frac{d\psi}{dt} = f_\psi(x) + g_\psi(x)u, \quad (3.7)$$

Пусть выбор $\psi(x)$ таков, что удовлетворяются следующие допущения:

допущение 3.1. $f_\psi(x) g_\psi(x) < 0$ для $x \in D$.

допущение 3.2. $|g_\psi(x)| \geq |f_\psi(x)|$ для $x \in D$.

При практическом применении мы должны учитывать тот факт, что обратная связь должна быть непрерывной, поскольку u – это положение открытого затвора и находится в пределах от нуля до единицы. Следующая теорема отражает непрерывный характер обратной связи.

Теорема 3.1. [9]: Предположим

$$\frac{d\psi}{dt} = f_\psi(x) + g_\psi(x)u, \quad (3.8)$$

$$u = \begin{cases} 0, & \text{при } \tilde{u} \leq 0 \\ \tilde{u}, & \text{при } 0 < \tilde{u} < 1 \\ 1, & \text{при } \tilde{u} \geq 1 \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \text{где } f_\psi &= \frac{\partial \psi}{\partial x_1} (w_{gcc}(x, \psi) - \\ & - w_{gc}(x, \psi)) + \frac{\partial \psi}{\partial x_2} (w_{gc}(x, \psi) + \\ & + \frac{\partial \psi}{\partial x_3} (w_{occ}(x, \psi) - \\ & - w_{oc}(x, \psi)) - \\ & - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} w_{gt}(x, \psi) - \\ & - \frac{\partial \psi}{\partial x_3} w_{ot}(x, \psi). \end{aligned}$$

где $\lambda > 0$.



На практике модель многофазного потока может изменяться для соответствия определенным параметрам. Например, уравнение для эксплуатационного клапана может видоизменяться в зависимости от типа используемого клапана. В случае изменения в модели значений членов можно легко изменить уравнение системы обратной связи (3.10). Таким образом, наша система обратной связи является вполне гибкой по отношению к видоизменению модели. В следующем разделе мы рассмотрим схему обратной связи, соответствующей различным типам моделей, рассмотренным в [1, 10].

Разработка систем регулирования с обратной связью для моделей газлифтных скважин

Динамика может выражаться посредством обобщенной модели (2.1)–(2.3). Переток обратный поток в данном случае, не допускается, поэтому все массовые скорости являются величинами неотрицательными (положительными или равными нулю). Например, переток из НКТ в кольцевое пространство предотвращается посредством нагнетательного клапана.

Непостоянные величины – скорости потоков – w_g , w_{gt} , w_{oc} , w_{ot} зависят от переменных (см. [1]).

$p_{a,i}(x)$ – давление в кольцевом пространстве в точке нагнетания,

$p_t(x)$ – давление в верхней части НКТ,

$p_{t,i}(x)$ – давление в НКТ в точке нагнетания газа,

$p_{t,b}(x)$ – давление в нижней части НКТ,

$\rho_m(x)$ – плотность нефтегазовой смеси в верхней части НКТ.

Эти переменные являются отобранными для управляемой переменной ψ . Нами будут отбираться переменные, удовлетворяющие допущениям 3.1. и 3.2, по крайней мере, в некоторых диапазонах заданных значений.

Первый подход заключается в том, чтобы выстроить график $f_\psi(x)$ и $g_\psi(x)$ для указанного набора данных, а затем из этого графика отобрать переменные, удовлетворяющие допущению 3.1. Для этого мы запускаем имитационную модель системы с данным набором параметров. Степень открытия дроссельного отверстия устанавливается на уровне 30 % ($u = 0,3$).

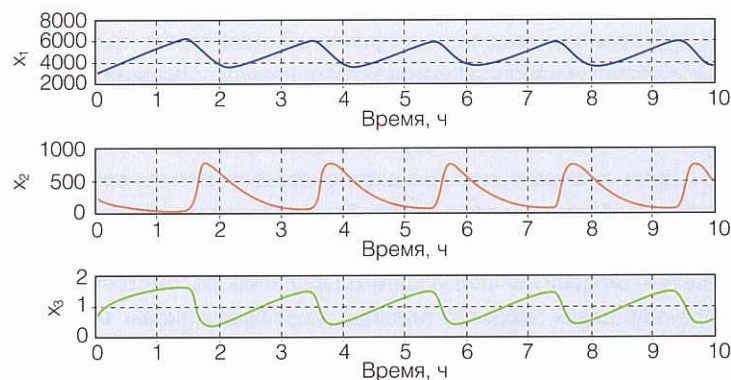
Имитационная модель работает в течение 10 ч, в состояниях наблюдается пульсация (рис. 1). Это означает, что постоянный

Динамика пульсирующего потока в газлифтных скважинах можно описать следующим образом.

1. Газ из кольцевого пространства начинает поступать в НКТ. Когда газ входит в НКТ, давление в НКТ падает, ускоряя приток лифт-газа (закачиваемого газа).
2. Газ выталкивает значительный объем нефти в насосно-компрессорную трубу, в то время как давление в кольцевом пространстве существенно падает.
3. Кольцевое пространство практически пусто; поток газа, поступающий в НКТ, встречается с жидкостью, скопившейся в НКТ. Вследствие возникшей преграды НКТ начинает наполняться нефтью, а кольцевое пространство – газом.
4. В конечном счете давление в кольцевом пространстве повышается настолько, что газ может



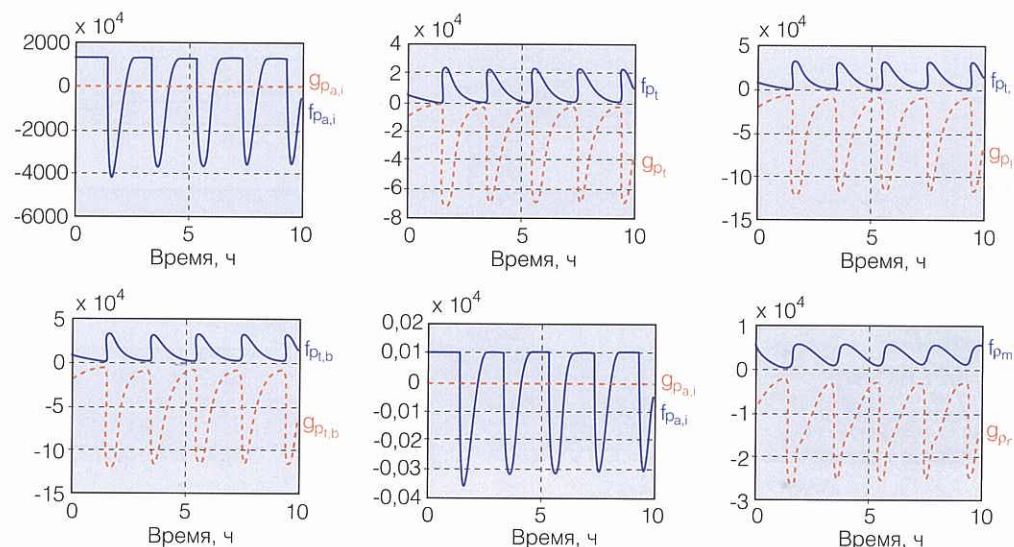
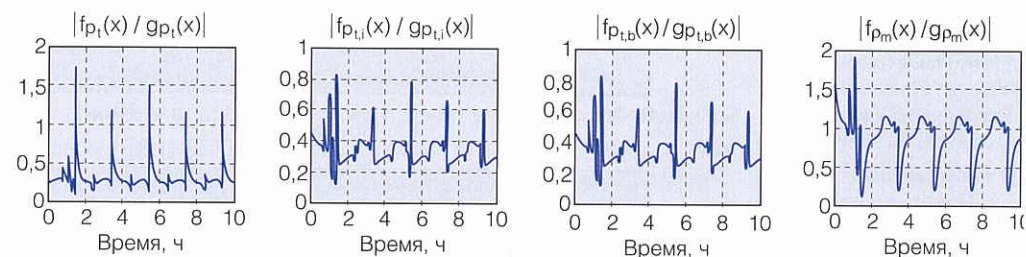
x_1 – газ в кольцевом пространстве, кг;
 x_2 – газ в НКТ, кг;
 x_3 – нефть в НКТ, кг.

Рис. 1. Состояние x для $u=0,3$.

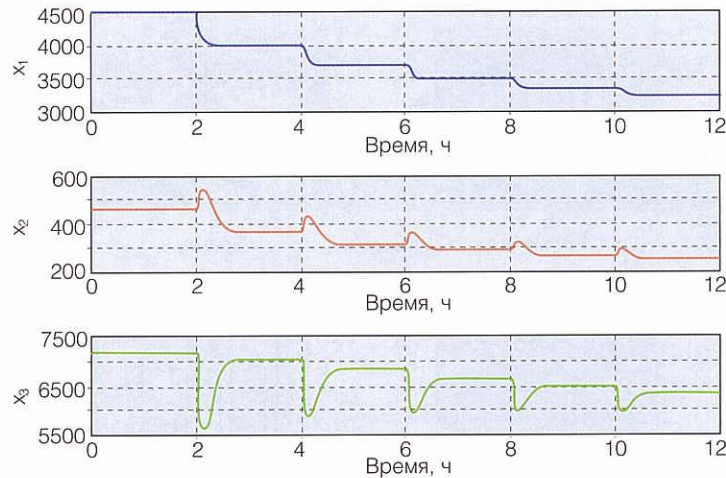
На основании имеющегося набора данных интенсивного образования газожидкостных скоплений в течение 10-часового периода при положении открытого дроссельного отверстия 30 % мы выстраиваем графическую зависимость $f_{\psi}(x)$ и $g_{\psi}(x)$ (рис. 2). По графикам можно увидеть, что $f_{\psi}(x)$ и $g_{\psi}(x)$ и всегда имеют разный знак для переменных p_t , $p_{t,i}$, $p_{t,b}$ и p_m . Следовательно, переменные p_t , $p_{t,i}$, $p_{t,b}$ и p_m удовлетворяют Допущению 3.1. Затем мы проверяем, удовлетворяет ли Допущению 3.2 p_t , $p_{t,i}$, $p_{t,b}$ и p_m . На рис. 3 показаны графики зависимости $|f_{\psi}(x)/g_{\psi}(x)|$ для p_t , $p_{t,i}$, $p_{t,b}$ и p_m . В этом случае $p_{t,i}$, $p_{t,b}$ и p_m удовлетворяют допущению 3.2, поскольку $|f_{\psi}(x)/g_{\psi}(x)|$ меньше, чем $p_{t,i}$, $p_{t,b}$ и p_m . Таким образом, на основании имеющихся данных мы можем выбрать любое значение u , $u = 0,2$ и $u = 0,7$ в

Понятие «заданное значение» здесь означает точку, которая связана с условием равновесия $dx/dt = 0$, когда используется определенное постоянное значение u на входе. В этом случае значение u на входе может быть постоянной величиной в пределах от нуля до единицы. Следует отметить, что конечная цель нашей работы заключается, во-первых, в стабилизации переменной на некотором уровне с помощью схемы с обратной связью, основанной на теореме 3.1, и, во-вторых, в исследовании, будет ли такая стабилизация сдерживать интенсивное образование газожидкостных скоплений.

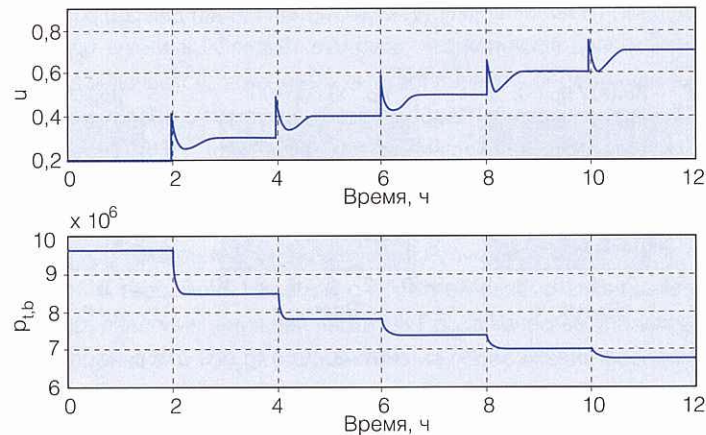
Для имитационной модели с замкнутым контуром с предложенной в теореме 3.1 схемой с обратной связью выбирается, например, давление в нижней части НКТ $p_{t,b}$ в качестве управляемой переменной ($\psi = p_{t,b}$). На практике из соображений безопасности следует избегать высокой степени пульсации. При интенсивном образовании газожидкостных скоплений можно избежать пульсаций высокой степени в период стабилизации неустойчивого заданного значения за счет выбора исходных заданных значений, соответствующих стабильной зоне (положение дроссельного отверстия, при котором не происходит образования газожидкостных скоплений). Стабилизации можно также достичь путем медленного изменения заданных параметров от устойчивого заданного значения (отсутствие газожидкостных скоплений) в сторону неустойчивого заданного значения (образование газожидкостных скоплений) при работающем датчике обратной связи по теореме 3.1.

Рис. 2. Функции $f_{\psi}(x)$ (сплошная линия) и $g_{\psi}(x)$ (пунктирная линия) для $p_{a,i}$, p_t , $p_{t,i}$, $p_{t,b}$, $p_{a,i}$, p_m .Рис. 3. $|f_{\psi}(x)/g_{\psi}(x)|$ для p_t , $p_{t,i}$, $p_{t,b}$ и p_m .

$u = 0,2$, является устойчивым. Любое заданное значение, соответствующее уровню открытия дроссельного отверстия более 20 %, является неустойчивым (наблюдается образование газожидкостных скоплений), что можно наблюдать на имитационной модели. Обратная связь моделируется таким образом, что система постепенно движется от исходных условий, связанных с устойчивым заданным значением при $u = 0,2$, проходя через точку 0,1 к конечному значению $u = 0,7$. Результаты имитаций с использованием системы с обратной связью и соответствующего значения λ представлены на рис. 4 и 5. На этих рисунках все состояния собраны вместе и система с обратной связью обеспе-



x_1 – газ в кольцевом пространстве, кг;
 x_2 – газ в НКТ, кг;
 x_3 – нефть в НКТ, кг.

Рис. 4. Состояние x , когда $p_{1,b}$ является управляемой переменнойРис. 5. Обратная связь u и давление в нижней части НКТ при параметре $p_{1,b}$ в качестве управляемой переменной

Система с обратной связью для управления образованием газожидкостных скоплений в моделях вертикальных трубопроводов без закачки газа

Данный раздел базируется на исследовании [9]. Приведем краткий обзор полученных результатов. Динамика образования затворов в стояке (вертикальном подъемнике) в основном схожа

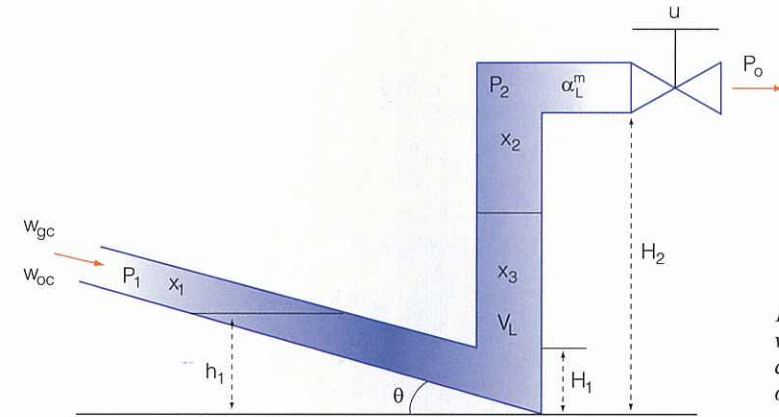


Рис. 6. Система скважинного стояка (вертикального подъемника)

Нефть блокирует поступление газа в стояк до тех пор, пока давление газа в зоне, расположенной выше основания стояка, сможет преодолеть гидростатическое давление жидкости в стояке. Когда давление газа становится достаточно высоким, газ проникает в стояк и резко выталкивает скопившуюся нефть из стояка. Подобная ситуация ведет к широким колебаниям в сепараторе, что может явиться причиной его поломки.

Динамика процесса может быть выражена обобщенной моделью (2.1)–(2.3). Массовые скорости потоков нефти и газа, соответственно w_{gc} и w_{oc} , принимаются постоянными.

Для данного перечня параметров отбираются данные, соответствующие степени открытия дроссельного отверстия 50 % ($u = 0,5$), при котором возникают интенсивные газожидкостные скопления. На основании графиков $f_{\psi}(x)$ и $g_{\psi}(x)$ из имеющегося множества данных мы подбираем переменные V_L , h_1 и p_{G2} , удовлетворяющие Допущению 3.1. Однако из графика $|f_{\psi}(x) / g_{\psi}(x)|$ следует, что ни один из выбранных параметров не удовлетворяет условиям Допущения 3.2. Следует иметь в виду, что процесс отбора данных основывается на множестве данных интенсивного образования газожидкостных скоплений, при котором ожидается высокая величина колебаний / пульсации состояния x . В этом кроется причина того, что в отдельных случаях Допущение 3.2 не выполняется для V_L , h_1 и P_2 . Для сравнения можно выполнить другой вариант имитации с исходными условиями образования газожидкостных скоплений, а затем изменить положение дрос-

Непостоянные потоки w_g , w_{gT} , w_{oT} зависят от следующих переменных, отобранных для ψ :

$v_{G1}(x)$ – скорость газового потока с основания стояка,

$\rho_{G1}(x)$ – плотность газа в объеме 1,

$A_{G1}(x)$ – площадь потока газа в основании стояка,

$\alpha_L^m(x)$ – доля нефти (в массовом выражении), проходящая через затвор,

$w_p(x)$ – общая массовая скорость потока, проходящего через затвор, когда он полностью открыт,

$h_1(x)$ – уровень жидкости в основании стояка,

$P_1(x)$ – давление в объеме 1,

$P_2(x)$ – давление в объеме 1,

$\alpha_L(x)$ – примерная доля жидкости (в объемном выражении) в стояке,

$\alpha_{LT}(x)$ – примерная доля жидкости (в объемном выражении), проходящая через затвор,

$\rho_T(x)$ – плотность потока, проходящего через затвор

$V_{LR}(x)$ – объем нефти в стояке,

$V_{G2}(x)$ – величина объема 2,



Заключение

В статье представлены начальные этапы построения системы с обратной связью по состоянию для снижения образования интенсивных газожидкостных скоплений в вертикальных трубопроводах. Предлагаемый подход использует технику линеаризации данных входа-выхода. Сформулированы условия устойчивой работы схемы. Эти условия являются базовыми при выборе значений управляемой переменной. Путем тщательного подбора управляемой переменной с помощью модели с обратной связью можно избежать интенсивного образования газожидкостных скоплений.

удовлетворяют Допущению 3.1. Напомним, что на практике из соображений безопасности всегда избегают больших колебаний. Учитывая это, можно выбрать V_L , h_1 и P_2 в качестве управляемых переменных.

С точки зрения этого комплексного подхода отобранными параметрами будут общая масса жидкости x_3 и общая масса $M = x_1 + x_2 + x_3$. Таким образом, получаем:

$$f_{x_3}(x) = w_{oc}(x) > 0, \quad g_{x_3}(x) = -w_{от}(x) < 0,$$

$$f_M(x) = w_{gc} + w_{oc}(x) > 0, \quad g_M(x) = -w_{гт}(x) - w_{от}(x) < 0.$$

Предполагается, что условия Допущение 3.1 выполнено. При возникновении интенсивных газожидкостных скоплений в следствии заторов общая массовая скорость потока, проходящего через эксплуатационный клапан ($w_{гт}(x)$ и $w_{от}(x)$), существенно уменьшается. В результате абсолютная величина $g_{\psi}(x)$ очень мала по сравнению с $f_{\psi}(x)$ для x_3 и M . Следовательно, Допущение 3.2 не выполняются. С другой стороны, при отсутствии газожидкостных скоплений, используя те же аргументы, можно гарантировать, что абсолютная величина $g_{\psi}(x)$ достаточно велика, чтобы выполнялось Допущение 3.2 для x_3 и M .

Список литературы

1. O.M. Aamo, G.O. Eikrem, H.B. Siahhaan and B.A. Foss, "Observer Design for Multiphase Flow in Vertical Pipes with Gas-Lift: Theory and Experiments", Journal of Process Control, 5, Issue 3, pp. 247–257, 2005.
2. K. Bendiksen, D. Malnes and O. Nydal, "On the Modelling of Slug Flow", Chemical Engineering Science, 40, pp. 59–75, 1985.
3. M. Dalsmo, E. Halvorsen and O. Slupphaug, "Active Feedback Control of Unstable Wells at the Brage Field", SPE Production and Facilities, SPE 77650, 2002.
4. K. Havre and M. Dalsmo, "Active Feedback Control as a Solution to Severe Slugging", SPE Production and Facilities, SPE 79252, pp. 138–148, 2002.
5. K. Havre, K.O. Stornes and H. Stray, "Taming Slug Flow in Pipelines", ABB Review, 4, Dec. 2000.
6. P. Hedne and H. Linga, "Suppression on Terrain Slugging with Automation and Manual Riser Choking", Advances in Gas-Liquid Flows, pp. 453–460, 1990.
7. G. Kaasa, V. Alstad, J. Zhou and O.M. Aamo. "Attenuation of Slugging in Unstable Oil Wells by Nonlinear Control", to appear in Proceedings 17th IF AC World Congress, Seoul, Korea, 2008.
8. H. K. Khalil. Nonlinear Systems, Prentice Hall, 3rd. ed. 2002.
9. H.B. Siahhaan, O.M. Aamo and B.A. Foss. "Suppressing Riser-Based Slugging in Multiphase Flow with State Feedback", Proceedings 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference 2005, Seville, Spain, 2005.
10. E. Storkaas, S. Skogestad and J. Godhavn, "A Low Dimensional Model of Severe Slugging for Controller Design and Analysis", Proc. Multi Phase '03, San Remo. Italy, 2003.



Ученый номера

Хачатуров Владимир Рубенович



70 лет

Редакция журнала поздравляет с Юбилеем ведущего специалиста в области дискретной оптимизации, имитационного моделирования, автоматизации проектирования, системного анализа не полностью формализованных задач – Владимира Рубеновича Хачатурова.

В.Р. Хачатуров – научный работник высшей квалификации, обладающий широким кругом теоретических и практических знаний и внесший выдающийся вклад в развитие новых информационных технологий.

Им разработаны методы и алгоритмы решения новых классов многоэкстремальных задач математического и динамического программирования, оптимального управления.

Основное направление работ ученого в настоящее время связано с разработкой математических основ построения новых информационных технологий для исследования с помощью компьютерных (человеко-машинных) систем плохо формализуемых проблем. Предложенный им аппроксимационно-комбинаторный метод декомпозиции и композиции систем является сильным математическим средством для решения различных классов многокритериальных, обратных и некорректных задач. Этот метод положен в основу новой информационной технологии построения человеко-машинных систем, следуя которой можно обосновывать достоверность полученных с их помощью результатов расчетов при решении не полностью формализованных задач.

Под научным руководством В.Р. Хачатурова и при его непосредственном участии созданы технический и рабочий

Заведующий отделом методов проектирования развивающихся систем Вычислительного центра им. А.А. Дороницына РАН.

Академик Российской Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского.

Доктор физико-математических наук, профессор.

Член Совета Международной внешнеполитической ассоциации России.

Лауреат Премии им. А.Н. Косыгина «За большие достижения в решении проблем развития экономики»