

Моделирование процессов сепарации нефти, газа и пластовой воды

А. Н. Паршуков

В работе получена математическая модель нефтегазосепаратора как объекта управления. Данная модель описывает динамический процесс дегазации в сепараторе и предназначена для автоматического управления этим процессом. Основу модели составляют линеаризованные уравнения материального баланса для жидкой и газовой фаз. Результаты численного моделирования подтверждают чувствительность поведения процесса к автоматическому регулированию.

Ключевые слова: сепарация нефти и газа, математическая модель сепаратора, автоматическое регулирование.

1. Введение

Задачи расчёта систем автоматического регулирования технологическими процессами в нефтедобыче всегда имели важное значение в отрасли. Все современные технологии подготовки нефти и газа к транспорту, включая сепараторы, деэмульгаторы, печи, системы осушки газа и т.п., используют большое количество контуров автоматического регулирования по давлению, уровню жидкости, температуре, влажности и т.п.

Анализ работ известных специалистов в данной области [1–3] свидетельствует о том, что современные технологии нефтедобычи всё в большей степени используют средства информатики и цифровой автоматики (микропроцессорных контроллеров, SCADA-систем и т.п.). Интенсивное использование микропроцессорных контроллеров при управлении технологическими процессами нефтедобычи позволяет расширить регулировочные возможности систем локальной автоматики и тем самым создает предпосылки для улучшения качественных характеристик систем управления.

Значимость вопросов совершенствования систем локального регулирования технологий нефтедобычи иллюстрируется следующим фактом. Большие вариации рабочих режимов сепараторов (уровней жидкости, уровней раздела фаз, давлений газа и т.д.), обусловленные неравномерностью (пульсацией) входного потока и неравномерностью распределения жидкости между параллельно работающими аппаратами, приводят к тому, что промышленные ПИ- и ПИД-регуляторы не в состоянии отрабатывать заданные (стабилизируемые) режимы с требуемой точностью. Это приводит к значительным (до 1.2 % от объёма добычи) потерям нефти в узлах подготовки к транспорту [1]. Предполагается, что внедрение более точных и качественных законов управления (напр., модальных [4, С. 10–14]) позволит уменьшить объём некондиционной нефти и тем самым сократить затраты на её вторичную сепарацию [3].

Важным этапом проектирования системы автоматического управления является составление математической модели управляемого процесса, причем предпочтительнее, чтобы эта модель была линейной¹.

¹ Линейные модели обладают рядом преимуществ по сравнению с нелинейными: в них отсутствуют автоколебательные режимы, их легко исследовать на свойство устойчивости, для них разработаны методы синтеза законов автоматического регулирования.

Существующие в литературе математические модели нефтегазосепаратора (далее – сепаратор) можно разделить на два типа:

1) модели, предназначенные для расчёта технологических параметров аппарата (например, прочностных свойств [5, С. 161–163] или пропускных способностей по нефти и газу [5, С. 156–161]);

2) модели, предназначенные для описания физических процессов в аппарате (см., например, [6]).

Оба типа моделей не предназначены (и непригодны) для целей автоматического регулирования.

Целью данной работы является разработка новой математической модели сепаратора как объекта управления.

2. Математическая модель сепаратора

В качестве основы для разработки математической модели сепаратора возьмем систему уравнений, полученных в работе [6]:

$$\begin{cases} \dot{V} = Q_{\text{IN}} - Q_{\text{OUT}}, \\ Q_G = (1 - \beta) \cdot \rho \cdot Q_{\text{IN}} \cdot G \cdot 10^3 \left(\frac{P_1}{P_S} \cdot \frac{T_S}{T_1} \cdot \frac{z}{z_0} \right), \end{cases} \quad (1)$$

здесь

Q_{IN} – нерегулируемый входной поток газожидкостной смеси ($\text{м}^3/\text{с}$);

Q_{OUT} – регулируемый поток жидкости на выходе из сепаратора ($\text{м}^3/\text{с}$);

V – объем жидкости в сепараторе (м^3);

Q_G – газовый поток ($\text{м}^3/\text{с}$);

ρ – плотность входного потока газожидкостной смеси ($\text{кг}/\text{м}^3$);

$\beta \in [0, 1]$ – обводнённость (доля воды во входном потоке Q_{IN});

G – рабочий газовый фактор ($\text{м}^3/\text{т}$), то есть количество нефтяного газа, отнесённое к одной тонне добытой нефти, приведённое к стандартным условиям (температура 293 К, давление 0.101 МПа);

P_1 и T_1 – атмосферное давление и стандартная температура;

P_S и T_S – давление и температура газа в сепараторе;

z и z_0 – коэффициенты сверхсжимаемости газа² при стандартных условиях и при P_S , T_S .

Регулируемый поток жидкости Q_{OUT} описывается законом Торричелли:

$$Q_{\text{OUT}} = \lambda S_1 \nu \sqrt{\rho g h}, \quad (2)$$

здесь

λ – коэффициент, зависящий от конструкции сливного отверстия (определяется экспериментально);

S_1 – площадь поперечного сечения сливной трубы (м^2);

$\nu \in [0, 1]$ – степень открытия регулируемого вентиля сливной трубы (при значении 0 вентиль закрыт, при значении 1 – полностью открыт);

g – ускорение свободного падения ($g = 9.807 \text{ м}/\text{с}^2$);

h – высота столба жидкости в сепараторе (м).

² Отношение z/z_0 для условий 1-й ступени сепарации можно принять равным 0.95 [5, С. 11].

Система уравнений (1)–(2) описывает материальный баланс газовой и жидкой фаз в сепараторе.

В качестве *контролируемых* переменных примем наиболее важные физические параметры процесса – давление газа P_S и высоту столба жидкости h в сепараторе. Для оптимального протекания процесса дегазации необходимо, чтобы значения P_S и h поддерживались постоянными, равными, соответственно, P_S^0 и h_0 (значения P_S^0 и h_0 определяются по технологической модели сепаратора [5, С. 156–161]).

Исходя из особенностей технологии нефтедобычи и подготовки нефти к транспорту, входной поток газожидкостной смеси Q_{IN} является нерегулируемым, в силу ряда причин его характеристики могут существенно и непредсказуемо меняться с течением времени. Таким образом, характеристики входного потока могут рассматриваться как *возмущения (помехи)*.

Регулируя выходные потоки Q_G и Q_{OUT} , можно целенаправленно влиять на контролируемые переменные P_S и h . Следовательно, изменения выходных потоков Q_G и Q_{OUT} являются *управляющими воздействиями*.

В модели (1)–(2) все три типа переменных (контролируемые переменные, возмущение, управляющие воздействия) связаны между собой нелинейными уравнениями. Очевидно, что модель вида (1)–(2) непригодна для целей автоматического регулирования – необходимо выделить контролируемые переменные, а для этого систему уравнений (1)–(2) следует линеаризовать в окрестности стабилизируемого режима работы.

Статический (стабилизируемый) режим работы сепаратора характеризуется постоянными потоками

$$Q_{IN} = Q_{IN}^0, Q_G = Q_G^0, Q_{OUT} = Q_{OUT}^0$$

и контролируемыми переменными

$$P_S = P_S^0, h = h_0.$$

При линеаризации учтем, что поток газа не нуждается в регулировании (давление автоматически регулируется с помощью клапана), поэтому соответствующее уравнение в системе (1) можем далее не рассматривать, в результате система (1)–(2) принимает вид:

$$\begin{cases} \dot{V} = Q_{IN} - Q_{OUT}, \\ Q_{OUT} = \lambda S_1 \nu \sqrt{\rho g h}. \end{cases} \quad (3)$$

При малых отклонениях от статического режима можем записать

$$Q_{IN} = Q_{IN}^0 + \Delta Q_{IN}, Q_{OUT} = Q_{OUT}^0 + \Delta Q_{OUT}, h = h_0 + \Delta h, \nu = \nu_0 + \Delta \nu.$$

Предполагая, что в пределах изменения уровня $h \in [h_0 - \Delta h, h_0 + \Delta h]$ площадь S горизонтального сечения сепаратора не меняется, можем записать

$$V = S(h_0 + \Delta h).$$

Подставляя Q_{OUT} из второго уравнения системы (3) в первое и принимая

$$Q_{OUT}^0 = Q_{IN}^0,$$

получим следующее уравнение (в отклонениях):

$$S \frac{d(\Delta h)}{dt} = Q_{IN}^0 + \Delta Q_{IN} - \lambda S_1 (\nu_0 + \Delta \nu) \sqrt{\rho g (h_0 + \Delta h)}, \quad (4)$$

где t – непрерывное время.

Раскладывая нелинейные функции в уравнении (4) в ряд Тейлора по переменным Δh , Δv и ΔQ_{IN} в окрестности стабилизируемого режима работы и вводя безразмерные переменные

$$x = \Delta h / h_0, \quad \zeta = \Delta Q_{\text{IN}} / Q_{\text{IN}}^0, \quad u = \Delta v / v_0,$$

получаем следующую линейную модель:

$$T\dot{x}(t) = -x(t) + K_1 u(t) + K_2 \zeta(t), \quad (5)$$

здесь

x – новая контролируемая переменная (изменение уровня жидкости в сепараторе относительно стабилизируемого значения h_0);

ζ – новая помеха (изменение входного потока газожидкостной смеси относительно статического потока Q_{IN}^0);

u – новое управление (относительное изменение положения регулируемого вентиля);

$T = (S \cdot h_0) / Q_{\text{IN}}^0$ – постоянная времени сепаратора;

$K_1 = 2$ – коэффициент передачи по управлению;

K_2 – коэффициент передачи по возмущению:

$$K_2 = \frac{2 Q_{\text{IN}}^0}{S_1 v \sqrt{\rho g h_0}}.$$

Полученная модель (5) позволяет рассчитывать изменение контролируемой переменной x и может быть использована для синтеза законов автоматического управления.

3. Пример моделирования переходных процессов в сепараторе

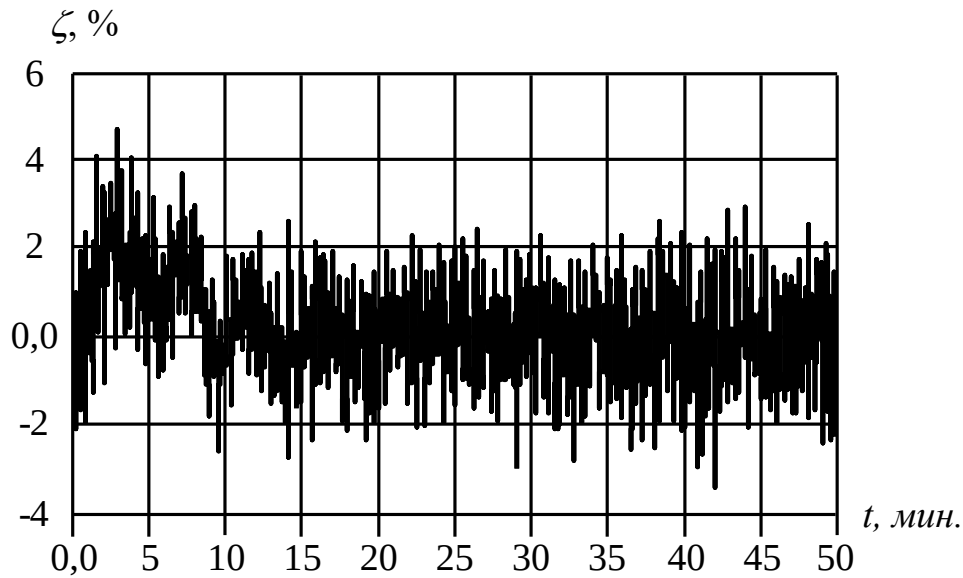
Для расчёта коэффициентов в модели (5) примем следующие значения рабочего режима и характеристики аппарата:

$$h_0 = 0.6 \text{ м}, \quad S_0 = 3.24 \text{ м}^2, \quad S_1 = 0.031 \text{ м}^2, \quad v_0 = 0.024, \quad Q_{\text{IN}}^0 = 0.114 \text{ м}^3/\text{мин},$$

получим:

$$T = 17 \text{ мин}, \quad K_1 = 2, \quad K_2 = 4.$$

При моделировании переходного процесса по возмущению принималось, что помеха ζ меняется случайным образом в интервале $\pm 5\%$ (см. рис. 1). Соответствующий график переходного процесса показан на рис. 2, откуда определяем, что переходный процесс длится примерно 50 мин.


 Рис. 1. График изменения возмущения ζ

Для объекта управления (5) регулятор будем искать в виде отрицательной статической обратной связи

$$u(t) = -K_r x(t), \quad (6)$$

где K_r – коэффициент передачи обратной связи, подлежащий определению. После замыкания объекта (5) регулятором (6) получим следующее уравнение замкнутой системы:

$$T\dot{x}(t) + (1 + K_1 \cdot K_r)x(t) = K_2 \zeta(t). \quad (7)$$

Характеристический полином дифференциального уравнения (7):

$$a^{c.l.}(1, s) = Ts + (1 + K_1 \cdot K_r), \quad (8)$$

здесь s – переменная (преобразования Лапласа).

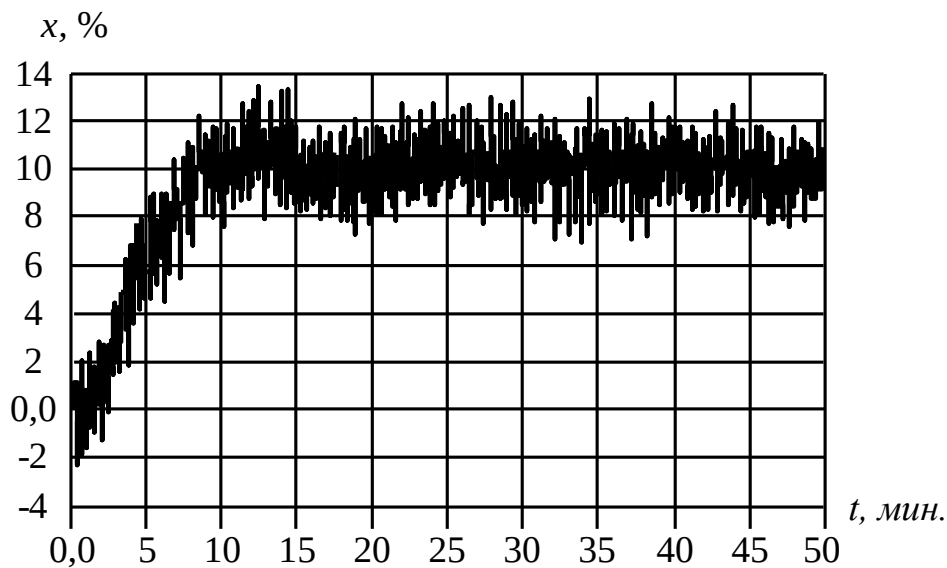


Рис. 2. Переходный процесс в сепараторе (без управления)

Расположение корней характеристического полинома (8) на комплексной плоскости определяет основные динамические свойства системы (7), поэтому коэффициенты регулятора следует искать из условия совпадения корней характеристического полинома замкнутой системы с заданными корнями.

Полином $a^{c.l.}(1, s)$ имеет единственный корень:

$$\lambda_1 = -(1 + K_1 \cdot K_r) / T.$$

Из теории автоматического управления известно, что корень λ_1 характеристического полинома системы связан со временем переходного процесса T_p соотношением

$$T_p \cong \frac{3}{|\lambda_1|}.$$

Выбирая

$$\lambda_1 = -0.2 \text{ рад/мин},$$

что соответствует желаемому времени $T_p \cong 15$ мин, получим:

$$K_r = -(\lambda_1 \cdot T + 1) / K_1,$$

после подстановки значений T и K_1 окончательно получим $K_r = 42$.

Переходный процесс замкнутой системы показан на рис. 3. Сравнивая графики, изображенные на рис. 2 и 3, видим, что переходный процесс замкнутой системы ведёт себя более плавно, а главное – имеет меньшую длительность – всего 15 мин.

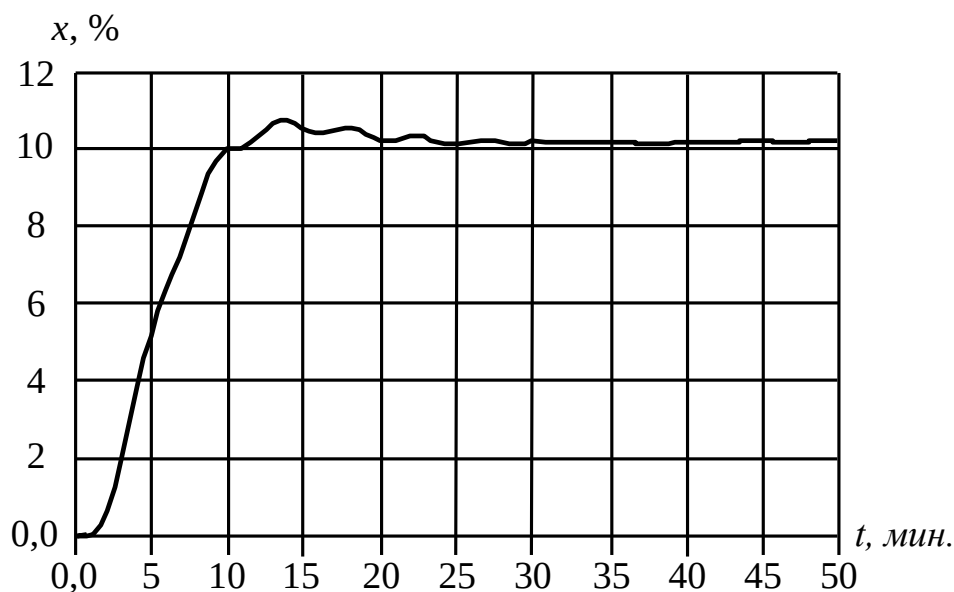


Рис. 3. Переходный процесс в сепараторе (с управлением)

4. Заключение

В настоящей работе предложена новая математическая модель сепаратора. Данная модель предназначена для автоматического управления процессом дегазации в сепараторе. Из приведённых графиков (рис. 2, 3) видно, что замкнутая система управления улучшает сходимость переходного процесса (15 мин вместо 50 мин).

Литература

1. *Еремин Ал. Н., Еремин Ан. Н., Еремин Н. А.* Управление разработкой интеллектуальных месторождений нефти и газа. В 2-х кн. Кн.2. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. 165 с.
2. *Абрамкин С. Е., Душин С. Е.* Перспективы развития систем управления газодобывающими комплексами // Вторая всеросс. научн. конф. по проблемам управления в технических системах, Санкт-Петербург, 25–27 октября 2017. № 1. С. 156–159.
3. *Душин С. Е., Красов А. В., Литвинов Ю. В.* Моделирование систем и комплексов: учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. 177 с.
4. *Паршуков А. Н.* Методы синтеза модальных регуляторов: учебное пособие. Тюмень: ТюмГНГУ, 2009. 84 с.
5. *Лутощкин Г. С.* Сбор и подготовка нефти, газа и воды: учебник. М.: Недра, 1977. 192 с.
6. *Абрамкин С. Е., Душин С. Е.* Управление технологическими процессами газодобывающих комплексов // Системный синтез и прикладная синергетика: IX Всероссийская научная конференция, п. Нижний Архыз, 24–27 сентября 2019. С. 430–439.

*Статья поступила в редакцию 28.03.2021;
переработанный вариант – 04.04.2021.*

Паршуков Андрей Николаевич

к.т.н., доцент, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: anparshukov@mail.ru.

Modeling of oil, gas and reservoir water separation processes

A. N. Parshukov

In this paper, a mathematical model of an oil and gas separator as an object of control is obtained. This model describes the dynamic process of degassing in the separator and is intended for automatic control of this process. The model is based on the material balance linearized equations for the liquid and gas phases. The results of numerical simulation confirm the sensitivity of the process behavior to automatic control.

Keywords: oil and gas separation, mathematical model of the separator, automatic control.