

---

---

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК 519.7  
DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-4-282-287

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ГАЗЛИФТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

И. Б. ФУРТАТ<sup>1</sup>, Е. А. ТУПИЧИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
Институт проблем машиноведения РАН, 199178, Санкт-Петербург, Россия  
Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: cainenash@mail.ru

<sup>2</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

Предложено решение задачи робастного управления процессом газлифтной эксплуатации нефтяных скважин в условиях параметрической неопределенности, неизвестных начальных условий и необходимости измерения выходного сигнала (объемного расхода на выходе скважины). Модель процесса представлена обыкновенными дифференциальными уравнениями, полученными из уравнения Навье—Стокса с использованием метода прямых. Управляющим сигналом является изменение объемного расхода газа, подаваемого в скважину. Для синтеза алгоритма управления используется модифицированный алгоритм бэкстеппинга (алгоритм обратного обхода интегратора, итеративные процедуры синтеза). Достоинства предложенного алгоритма заключаются в применении всего одного фильтра состояния по сигналу управления и упрощенных законах управления, полученных с использованием реальных дифференцирующих звеньев, это позволяет существенно упростить расчет и реализацию системы управления. В качестве эталонного воздействия выбирается программная траектория, которая является решением линейно-квадратичной задачи. Приведены результаты моделирования, иллюстрирующие эффективность предложенного алгоритма.

**Ключевые слова:** робастное управление, метод бэкстеппинга, процесс газлифта

**Введение.** Эффективным и универсальным способом механизированной добычи жидкости из нефтяных скважин является газлифтный метод. В затрубное пространство через газлифтный клапан нагнетается газ, который, поступив в трубу, образует газожидкостную смесь, и в результате возникающего перепада давления жидкость поднимается по стволу за счет естественной энергии пласта. Существующие методы управления процессом газлифта основаны на предположении полной определенности математической модели процесса. Следовательно, алгоритмы, представленные в работах [1—8], могут не обеспечивать достижение заданных целевых показателей качества.

В настоящей статье предлагается использовать модифицированный метод бэкстеппинга для управления процессом газлифта с обеспечением заданного дебита скважины в условиях

неопределенности. Заданный дебит обусловлен программной траекторией, являющейся [2] решением линейной квадратичной задачи.

**Математическая модель процесса газлифта.** Газлифтная скважина представляет собой насосно-компрессорную трубу (НКТ), охваченную кольцевым затрубным пространством [1—8]. Через затрубное пространство с поверхности подается сжатый газ, который, поступив в НКТ, у башмака образует газожидкостную смесь (ГЖС) относительно малого удельного веса. В результате ГЖС пониженной плотности стремится на поверхность. На рис. 1 представлена упрощенная схема газлифтной скважины ( $l$  — высота скважины).

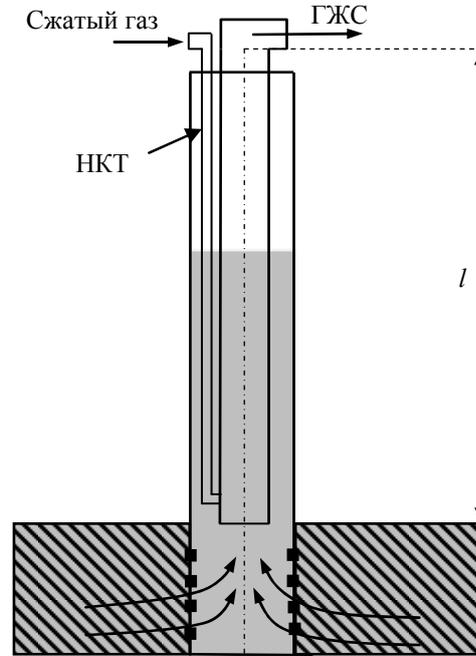


Рис. 1

Согласно работе [2] составим систему дифференциальных уравнений, описывающих процесс газлифта:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial x} &= \frac{1}{F} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2a}{F} Q, \\ -\frac{\partial P}{\partial t} &= \frac{c^2}{F} \frac{\partial Q}{\partial x}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $P = P(x, t)$  — избыточное давление,  $0 \leq x \leq l$ ,  $t \geq 0$  — время,  $F$  — поперечное сечение трубы,  $Q = F\rho\omega_c$ ,  $\omega_c = \omega_c(x, t)$  — осредненная по сечению скорость движения смеси,  $\rho$  — плотность смеси,  $a = 0,5g/\omega_c + 0,25\lambda\omega_c/D$ ,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\lambda$  — гидравлическое сопротивление,  $c$  — скорость звука,  $D$  — диаметр трубы.

С помощью метода прямых [6] преобразуем (1) к системе обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dQ_k}{dt} &= -\frac{F_k}{l_k} (P_k - P_{k-1}) - 2a_k Q_k, \\ -\frac{dP_k}{dt} &= \frac{c_k^2}{F_k l_k} (Q_k - Q_{k-1}), \quad k = \overline{1, n}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

здесь  $k$  — номер сечения, полученного делением скважины по высоте методом прямых на  $n$  частей (т.е.  $l = l_1 + l_2 + \dots + l_n$ ).

Примем в системе (2)  $n=2$ , при  $k=1$  рассматривается затрубное пространство, при  $k=2$  — подъемник. В качестве управляющего воздействия выберем  $u = Q_1(x=0, t)$ , в качестве выходной переменной —  $y = Q_2(x=2l, t)$ . Положим, что  $P_1(x=0, t) = \text{const}$ . Тогда систему (2) можно преобразовать к следующему виду:

$$\dot{x} = Ax + G_1u + G_2f, \quad y = [0 \ 0 \ 0 \ 1]x, \quad x(0) = x_0, \quad (3)$$

где

$$G_1 = [c_1^2 / F_1 l_1 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad G_2 = [0 \ F_1 / l_1 \ 0 \ 0]^T, \\ x = [P_1, Q_1, P_2, Q_2]^T, \quad f = P_1(x=0, t), \\ A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ \tilde{A}_2 & A_2 \end{bmatrix}, \quad A_k = \begin{bmatrix} 0 & c_k^2 / F_k l_k \\ F_k / l_k & -2a_k \end{bmatrix}, \quad k=1, 2, \quad \tilde{A}_2 = A_2 + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2a_2 \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим скважину, приведенную в работах [9, 10], где  $l_1 = l_2 = 1485$  м,  $\lambda_1 = 0,01$  и  $\lambda_2 = 0,23$  кг/(с·м),  $D_1 = 0,087$  и  $D_2 = 0,073$  м,  $F_k = 0,25\pi D_k^2$  м<sup>2</sup>,  $\rho_1 = 0,75$  и  $\rho_2 = 700$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_1 = 331$  и  $c_2 = 850$  м/с,  $a_k = 0,5g / \omega_{c,k} + 0,25\lambda_k \omega_{c,k} / D_k$ ,  $\omega_{c,k} = 0,21 / (F_k \rho_k)$ . При  $k=1$  пространство заполнено газом, при  $k=2$  — газожидкостной смесью. Начальные условия по времени примем нулевыми, т.е.  $P(x, 0) = 0$ ,  $Q(x, 0) = 0$ .

**Система управления процессом газлифта.** Для синтеза системы управления процессом газлифта, модель которого представлена уравнением (3), воспользуемся модифицированным методом бэкстеппинга [11—15]. Размерность вектора состояния  $x$  в (3) равна 4. Поэтому общая структура системы управления будет представлена следующими уравнениями:

— уравнение фильтра

$$\dot{v}(t) = A_0 v(t) + bu(t), \quad (4)$$

где  $v(t) = [v_1(t), v_2(t), v_3(t)]^T$ ,  $A_0 = \begin{bmatrix} -r_1 & 1 & 0 \\ -r_2 & 0 & 1 \\ -r_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $r_1, r_2$  и  $r_3$  выбираются так, чтобы матрица  $A_0$

была гурвицевой,  $b = [0, 0, 1]^T$ ;

— уравнения виртуальных  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$  и основного законов управления  $u(t)$ :

$$U_1(t) = -z_1 \mu^{-1} e_1(t) + r_1 v_1(t), \\ U_2(t) = -z_2 e_2(t) + r_2 v_1(t) + \bar{U}_1(t), \\ u(t) = -z_3 e_3(t) + r_3 v_1(t) + \bar{U}_2(t), \quad (5)$$

где  $z_1 > 0$ ,  $z_2 > 0$ ,  $z_3 > 0$  и  $\mu > 0$  — коэффициенты, выбираемые разработчиком,  $e_1(t) = y(t) - y_m(t)$ ,  $y_m(t)$  — оптимальная программная траектория, рассчитанная в [9, 10],  $e_2(t) = v_2(t) - U_1(t)$ ,  $e_3(t) = v_3(t) - U_2(t)$ ,  $\bar{U}_1(t)$  и  $\bar{U}_2(t)$  — оценки сигналов  $\dot{U}_1(t)$  и  $\dot{U}_2(t)$  соответственно;

— уравнения оценок производных

$$\bar{U}_1(t) = \frac{p}{\mu p + 1} U_1(t), \quad \bar{U}_2(t) = \frac{p}{\mu p + 1} U_2(t), \quad (6)$$

где  $p = d / dt$  — оператор дифференцирования.

Зададим в (4)  $r_1 = -6$ ,  $r_2 = -12$  и  $r_3 = -8$ ,  $z_1 = 1$ ,  $z_2 = z_3 = 100$ , а в (5) и (6) —  $\mu = 0,01$ . Все начальные условия в системе управления примем нулевыми.

На рис. 2 представлены переходные процессы по выходу  $y(t)$  и программная траектория  $y_m(t)$ .

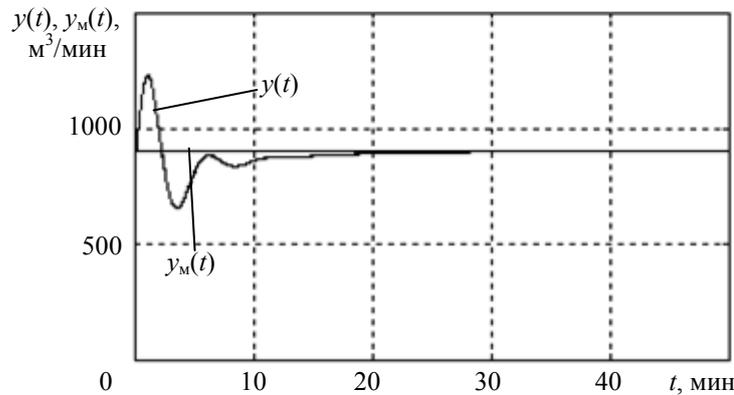


Рис. 2

Анализ результатов моделирования показал, что абсолютное значение установившейся ошибки  $e_1(t)$  не превосходит  $0,7 \text{ м}^3/\text{мин}$  спустя 40 мин после начала работы системы. Система управления показала робастность по отношению к параметрическим возмущениям, обусловленным изменением параметров в модели (3).

**Заключение.** В работе предложен алгоритм бэкстеппинга для управления процессом газлифта в условиях параметрической неопределенности с обеспечением заданного дебита скважины. Используются представленные в работах [9, 10] модель процесса газлифта, ее параметры и заданный дебит скважин, но в настоящей статье, в отличие от [9, 10], алгоритм управления не зависит от параметров процесса, таким образом, обеспечивается робастность замкнутой системы по отношению к параметрическим возмущениям, что подтверждено результатами моделирования.

Данные, представленные в разделе „Математическая модель процесса газлифта“, получены в ИПМаш РАН при поддержке РФ (проект № 14-29-00142); результаты, приведенные в разделе „Система управления процессом газлифта“, получены при поддержке гранта Президента Российской Федерации (договор № 14.W01.16.6325-МД (МД-6325.2016.8)). Другие исследования частично поддержаны грантом МОН РФ (проект 14.Z50.31.0031) и грантом Правительства РФ (074-U01).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шулов В. И. Технология и техника добычи нефти. М.: Недра, 1983.
2. Алиев Ф. А., Муталлимов М. М., Исмаилов Н. А., Раджабов М. Ф. Алгоритмы построения оптимальных регуляторов при газлифтной эксплуатации // Автоматика и телемеханика. 2012. № 8. С. 3—15.
3. Eikrem G. O., Aamo O. M., Foss B. A. On instability in gas lift wells and schemes for stabilization by automatic control // SPE Production & Operations. 2008. Vol. 23. P. 2—21.
4. Eikrem G. O., Imsland L. S., Foss B. A. Stabilization of gas lifted wells based on state estimation // Proc. of the Intern. Symp. on Advanced Control of Chemical Processes. Oulu, Finland, 2003. P. 21—28.
5. Aamo O. M., Eikrem G. O., Siihaan H. B., Foss B. A. Observer design for multiphase flow in vertical pipes with gas-lift — theory and experiments // J. of Process Control. 2004. Vol. 15, N 3. P. 247—257.
6. Imsland L. S., Eikrem G. O., Foss B. A. A state feedback controller for a class of nonlinear positive systems applied to stabilization of gas-lifted oil wells // Control Engineering Practice. 2004. Vol. 7, N 3. P. 24—29.
7. Eikrem G. O., Aamo O. M., Foss B. A. Stabilization of gas-distribution instability in single-point dual gas lift wells // SPE Production & Operations. 2006. Vol. 21, N 2. P. 112—119.

8. *Imsland L. S., Foss B. A., Eikrem G. O.* A state feedback controller for a class of nonlinear positive systems applied to stabilization of gas-lifted oil wells // Proc. of the European Control Conf. 2003. P. 2499—2504.
9. *Furtat I. B., Tupichin E. A.* Modified simple adaptive-robust backstepping algorithm // Proc. of the 19th Intern. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2014. Międzyzdroje, Poland, September 2—5, 2014. P. 183—188.
10. *Furtat I. B., Tupichin E. A.* Control of nonlinear plant based on modified robust backstepping algorithm // Proc. of the 2014 IEEE Intern. Conf. on Control Applications (CCA). Multiconf. on Systems and Control. Antibes, France, October 8—10, 2014. P. 941—946.
11. *Чарный И. А.* Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: Гостехиздат, 1951.
12. *Furtat I. B., Tupichin E. A.* Modified robust backstepping algorithm for plants with time delay // Proc. of the 6th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). St. Petersburg, Russia, October 6—8, 2014. P. 541—545.
13. *Aliiev F. A., Mutallimov M. M.* Asymptotic method of solution for a problem of construction of optimal gas-lift process modes // Math. Probl. Engin. 2010. ID 191053.
14. *Furtat I. B., Furtat E. Tupichin E. A.* Modified backstepping algorithm with disturbances compensation // 1st IFAC Conf. on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON 2015). St. Petersburg, Russia, June 24—26, 2015. P. 1056—1061.
15. *Фуртат И. Б., Тупичин Е. А.* Упрощенный алгоритм бэкстеппинга для управления нелинейными системами // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 173—178.

#### Сведения об авторах

**Игорь Борисович Фуртат**

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики, профессор; ИПМаш РАН, лаборатория управления сложными системами, ведущий научный сотрудник; СПбГУ, кафедра прикладной кибернетики, ведущий научный сотрудник; E-mail: cainenash@mail.ru

**Евгений Александрович Тупичин**

— аспирант; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: tupichin@mail.ru

Рекомендована лабораторией  
управления сложными системами  
ИПМаш РАН

Поступила в редакцию  
19.11.15 г.

**Ссылка для цитирования:** *Фуртат И. Б., Тупичин Е. А.* Управление процессом газлифтной эксплуатации нефтяных скважин в условиях параметрической неопределенности // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 4. С. 282—287.

### CONTROL OVER GAS-LIFT OIL WELLS OPERATION UNDER PARAMETRIC UNCERTAINTY CONDITION

I. B. Furtat<sup>1</sup>, E. A. Tupichin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,  
199178, St. Petersburg, Russia  
St. Petersburg State University, 199034, St. Petersburg, Russia  
E-mail: cainenash@mail.ru*

<sup>2</sup>*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*

A solution to the problem of robust control over gas-lifted oil wells operation is proposed. The described solution is suitable for parametric uncertainty, unknown initial conditions, and necessity of output signal (volume flow at the well outlet) measurement. The model of the process is represented by ordinary differential equations derived from the Navier-Stokes equations using the straight lines approximation. The control signal is variation of flow rate of the gas supplied to the well. A modified back-stepping algorithm is used for control algorithm synthesis. Implementation of a single filter for the system condition by the control signal and straightforward control laws obtained using real differentiating element, allow to simplify the calculations and implementation of the control system. The trajectory which is a solution to linear-quadratic model problem is taken as a standard action. Simulation results are presented to demon-

strate the effectiveness of the proposed scheme which is robust to parametric perturbations caused by variations of physical and chemical parameters of the process.

**Keywords:** robust control, back-stepping method, gas lift process

**Data on authors**

- Igor B. Furtat** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; IPME RAS, Laboratory of Control of Complex Systems; St. Petersburg State University, Department of Applied Cybernetics; E-mail: cainenash@mail.ru
- Evgeny A. Tupichin** — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Control Systems and Informatics; E-mail: tupichin@mail.ru

**For citation:** *Furtat I. B., Tupichin E. A.* Control over gas-lift oil wells operation under parametric uncertainty condition // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 4. P. 282—287 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-4-282-287