

УДК 621.6.033

## МОДЕЛЬ ИСКУССТВЕННОГО ГАЗЛИФТА И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ В СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

**Бойко И.М., Аль-Дурра А., Абушавиш И., Матраджи И.**

*Университет науки, технологий и исследований Халифа, Абу-Даби, e-mail: i.boiko@ieee.org*

Для решения уравнений описывающих динамику искусственного газлифта (ИГЛ), используется новый алгоритм, названный алгоритмом полиэтиленовых пакетов. Рассмотрено описание динамики системы в виде дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП). Разработанная модель основывается на фундаментальных физических принципах и использует хорошо известные корреляционные зависимости, описывающие состояния нефти и газа. Описано применение этого подхода в системах моделирования газлифта реального времени, используемого в составе аппаратных средств в контуре системы управления ИГЛ. Показывается, что высокая производительность разработанного алгоритма и возможность его использования в системах реального времени достигнута за счет синхронной дискретизации ДУЧП по времени и по пространственным координатам. Обсуждаются результаты, полученные с использованием этой модели, в частности существование колебаний расхода и давления нефти и газа в некоторых режимах, проявляющихся в возникновении газовых пробок и отсутствии каких-либо колебаний в других режимах работы. Также выявлены новые, как правило не проявляющие себя, но возможные при определенных условиях неустойчивые режимы в динамике газлифта, которых следует избегать. Представленные результаты хорошо согласуются с известными экспериментальными данными по системам газлифта.

**Ключевые слова:** искусственный газлифт (ИГЛ), алгоритм полиэтиленовых пакетов, моделирование в реальном времени

## A MODEL OF ARTIFICIAL GAS LIFT AND ITS APPLICATION IN A REAL-TIME SIMULATOR

**Boyko I.M., Al-Durra A., Abushavish I., Matradzhi I.**

*Khalifa University of Science and Technology, Abu Dhabi, e-mail: i.boiko@ieee.org*

A novel Plastic Bag algorithm is applied to analysis of artificial gas lift (AGL) dynamics. The system dynamics is given by partial differential equations (PDE). The developed model based on the fundamental physical principles is presented along with the oil and gas correlations used in the PDE model. An application of this model to a real-time simulator that is used in a hardware-in-the-loop setup is presented. It is shown that high performance of the developed algorithm and the possibility of using it in real-time simulations are achieved thorough the synchronous discretization of the PDE equations with respect to time and space. Results of the solution, such as existence of oscillations in oil and gas flow and pressures in some operating modes, which is revealed as a slugged flow, and absence of any oscillations in other operating modes, are discussed. Some new unstable operating modes are identified, which must be avoided. The produced results well correlate with the experimental data available for artificial gas lift systems.

**Keywords:** artificial gas lift (AGL), plastic bag algorithm, real-time simulation

Искусственный газлифт (ИГЛ) широко используется для добычи нефти из месторождений, в которых естественный приток из пласта является низким. Эта технология подходит для случаев, когда стоимость газа низкая или имеется газ высокого давления. Принцип ИГЛ основан на растворении подаваемого газа в нефти и снижении гидростатического давления, что увеличивает перепад давления между пластом и нижней частью скважины, в результате чего увеличится приток нефти из пласта. Недостатком технологии ИГЛ является возможность режима неустойчивого потока нефти в лифтовой (внутренней) трубе, проявляющегося в возникновении колебаний расхода, известного как прерывистый поток. Эти режимы трудно предсказать, поскольку динамика системы достаточно сложна. Разработка динамических моделей ИГЛ посвящен ряд публикаций.

Модель в виде дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП)

можно построить, рассматривая падение давления, вызываемое изменением высоты, трением и ускорением. Модель ИГЛ третьего порядка с сосредоточенными параметрами, учитывающая законы распределения давления по всей длине скважины в затрубном пространстве и лифтовой трубе, была предложена [1]. Кроме того, модель с сосредоточенными параметрами высокого порядка и решение, основанное на ДУЧП, были предложены [2] и [3] соответственно.

Цель исследования: разработка системы моделирования газлифта реального времени. В работе представлен алгоритм полиэтиленовых пакетов в качестве решения для модели ИГЛ, описываемой дифференциальными уравнениями в частных производных (ДУЧП) вместе с с уравнениями состояния нефти и газа. Описано применение этого подхода в системах моделирования газлифта реального времени, используемого в составе аппаратных средств в контуре системы

управления ИГЛ, который может быть использован для определения неустойчивых режимов и настройки контроллеров промышленной системы управления.

*Динамика искусственного газлифта*

В системе искусственного газлифта компрессоры нагнетают газ высокого давления через газовый клапан в затрубное пространство. Оттуда газ поступает через обратный клапан в лифтовую трубу. Закачиваемый газ снижает гидростатическое давление и таким образом увеличивает перепад между давлением пласта и давлением в нижней части скважины. Добываемые флюиды (смесь нефти, газа и, как правило, воды) подаются на сепаратор. В нём флюиды разделяются на нефть, воду и газ. Выделенный на сепараторе газ подается обратно на компрессор, и цикл повторяется снова. Обычно в ИГЛ используется попутный газ из самой скважины, что гарантирует отсутствие нежелательных химических реакций.

Модель, описываемая ДУЧП, учитывает падение давления, вызываемое трением и гравитацией. Возможны эффективные численные решения, построенные на этой модели [2]. Эта модель может обеспечить более точные результаты по сравнению с упрощенной моделью третьего порядка и предоставляет возможность более эффективного численного решения, чем модели, базирующиеся на таких пакетах, как Comsol Multiphysics® и Ansys® [4].

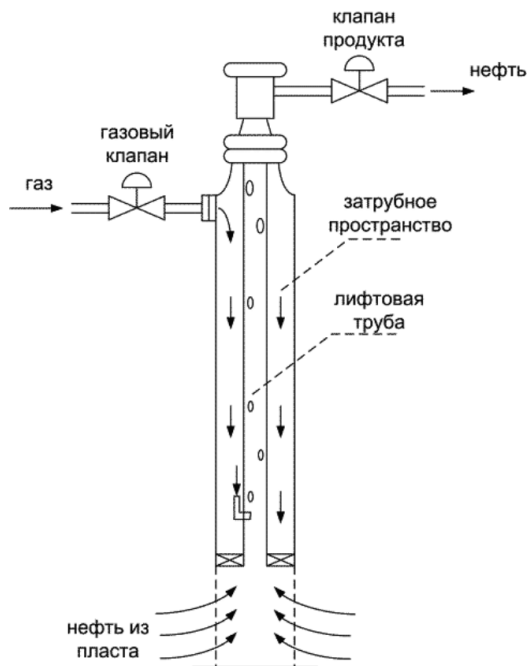


Рис. 1. Схема искусственного газлифта

В лифтовой трубе движение нефтегазовой смеси описывается следующим уравнением:

$$-\frac{dp(z,t)}{dz} = \frac{S}{2A_t} f_{oil} \rho_0(z,t) u_0^2(z,t) + \rho_m(z,t)g, \quad (1)$$

где  $p$  – давление в лифтовой трубе,  $z$  – вертикальная координата,  $u_0$  – приведенная скорость,  $\rho$  – плотность нефтегазовой смеси,  $g$  – ускорение свободного падения,  $A_t$  – площадь сечения лифтной трубы,  $f_t$  – коэффициент трения,  $S$  – коэффициент, учитывающий размерность.

Формула (1) должна быть дополнена уравнениями состояния для нефти и газа, описывающими их физические свойства. Эти зависимости приведены ниже. Алгоритм, или компьютерная модель, названная алгоритмом полиэтиленовых пакетов, был предложен в работе [2]. Алгоритм полиэтиленовых пакетов реализуется путем синхронной дискретизации дифференциальных уравнений, описывающих динамику газлифта, одновременно по времени и пространственной координате.

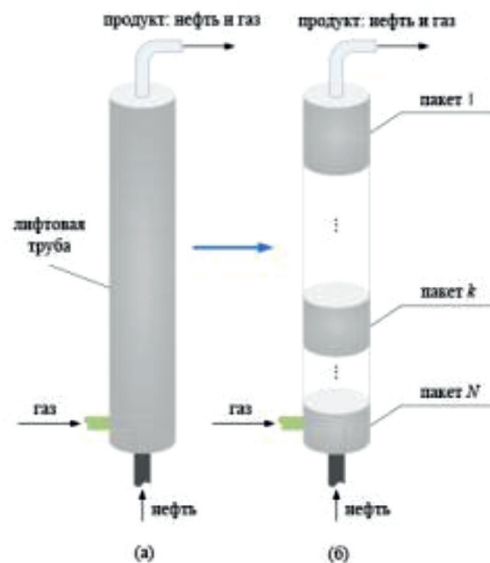


Рис. 2. Схема алгоритма полиэтиленовых пакетов для системы газлифта (для трубопровода): (а) реальный трубопровод, (б) виртуальное разбиение на пакеты

Принцип этого алгоритма состоит в рассмотрении последовательности виртуальных цилиндрических полиэтиленовых пакетов, заключающих в себе нефтегазовую смесь в лифтовой трубе, в соответствии со следующим:

– Флюиды (смесь нефти и газа) рассматриваются как виртуально заключенные в полиэтиленовые пакеты.

– Объём каждого полиэтиленового пакета является переменным и зависит от давления.

– Флюиды равномерно распределены в каждом пакете, но давление в пакете является функцией вертикальной координаты.

– Флюиды не перетекают из одного пакета в другой.

– Пакет формируется в месте подачи газа в лифтовую трубу за счет смешивания нефти и газа в течение заданного интервала времени.

– При достижении пакетом верха лифтовой трубы он опорожняется.

– Давление в верхней части  $k$ -го пакета равно давлению в нижней части  $(k + 1)$ -го пакета.

Давление и плотность распределения в каждом пакете определяются следующими зависимостями:

$$P_{ii} = \frac{(m_{gt} + m_{lt})g}{A_i} \cdot \frac{1}{1 - e^{\left(\frac{(m_{gt} + m_{lt})g - aA_i H_i}{A_i b}\right)}}, \quad (2)$$

$$P_{it} = \frac{(m_{gt} + m_{lt})g}{A_i} \cdot \frac{e^{\left(\frac{(m_{gt} + m_{lt})g - aA_i H_i}{A_i b}\right)}}{1 - e^{\left(\frac{(m_{gt} + m_{lt})g - aA_i H_i}{A_i b}\right)}}, \quad (3)$$

$$P_{ib} = P_{it} + \rho_l g H_r, \quad (4)$$

$$\rho_m = \frac{1 + \lambda}{\lambda \frac{RT_i}{P_{it} M} + \frac{1}{\rho_l}}. \quad (5)$$

В алгоритме полиэтиленовых пакетов, предложенном в работе [2], использовались уравнения идеального газа для описания свойств нефтегазовой смеси, что соответствует физической модели, согласно которой газ содержится в нефти в виде пузырьков. Однако это справедливо только для давления ниже давления точки начала образования пузырьков (кипения).

Использование более точных уравнений состояния нефти и газа значительно повышает точность модели и правильность прогнозирования режимов устойчивого и неустойчивого потока.

#### Уравнения состояния нефти и газа

Для описания состояния нефтегазовой смеси важно, находится ли рассматриваемое давление ниже или выше так называемого давления точки кипения. Нефтяные скважины эксплуатируются длительное время, и в большинстве случаев давление в лифтовой трубе снижается и достигает значения, меньшего давления точки кипения. При этом начинают формироваться газовые пробки, что приводит к прерывистому потоку [5]. Когда давление

в лифтовой трубе меньше давления точки кипения, жидкая фракция нефтегазовой смеси находится в *насыщении*. Однако если давление в лифтовой трубе начинает расти и становится выше, чем давление точки кипения, то газ содержится в нефти в растворенной форме, что называется режимом *недонасыщения*. Для точного описания поведения нефтегазовой смеси необходимо определить диапазоны давления, когда реализуется режим насыщения и когда реализуется режим недонасыщения. Одним из наиболее известных и широко используемых уравнений состояния в нефтяной и газовой промышленности является *корреляция Васкеса – Беггса* [6]. Эта корреляционная зависимость содержит соотношения для определения газового фактора смеси, коэффициента объёмного расширения нефти и сжимаемости нефти. Эта корреляция строится на более чем 600 лабораторных исследованиях пластовых флюидов, собранных в различных месторождениях. Корреляции делятся на две группы в зависимости от относительного удельного веса нефти: те, что меньше  $300^\circ \text{API}$ , и другие, превышающие  $300^\circ \text{API}$ . Согласно корреляционным зависимостям Васкес – Беггса [6], давление точки кипения равно

$$p_b = \left( \frac{R_s}{C_1 \gamma_g \cdot e^{\left( C_2 \left( \frac{\gamma_{API}}{T + 459.67} \right) \right)}} \right)^{\frac{1}{C_2}}, \quad (6)$$

где  $R_s = C_1 \gamma_g p^{C_2} e^{\left( C_3 \left( \frac{\gamma_{API}}{T + 459.67} \right) \right)}$  – газовый фактор смеси, стандартный фут<sup>3</sup>/баррель в стандартных условиях,  
 $R_s = R_{SB}$  – растворенный газовый фактор смеси, стандартный фут<sup>3</sup>/баррель в стандартных условиях (scf/STB) для давления в зоне насыщения,  
 $T$  – температура, °F,  
 $\gamma_g$  – удельный вес газа (для воздуха  $\gamma_g = 1$ ),  
 $\gamma_{API}$  – плотность нефти, °API,  
 $p$  – давление, psia.

Сжимаемость нефти определяется отношением степени изменения объема сырой нефти на единицу изменения давления, при постоянной температуре. Как правило, изотермическая сжимаемость может быть описана в виде дифференциального уравнения, на основе следующей формулы:

$$c = - \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T, \quad (7)$$

где  $V$  – объём флюида,  
 $P$  – давление флюида,  
 $T$  – температура флюида.

$T$  обозначает тот факт, что изменение в объеме жидкости происходит только из-за изменения давления при постоянной температуре (изотермическое состояние). Таким образом, для определения  $\rho$  используются уравнения, зависящие от того, находится ли давление в зоне насыщения или недонасыщения. Эти параметры являются функциями давления точки кипения ( $p_B$ ). Для зоны насыщения ( $\rho \leq \rho_B$ ), изотермическая сжимаемость сырой нефти определяется следующим образом:

$$c_0 = \frac{-1433 + 5R_{sb} + 17,2T - 1180\gamma_g + 12,61\gamma_{API}}{10^5 p} + \frac{B_g \frac{dR_s}{dp}}{B_0}$$

где  $B_0$  – объёмный коэффициент для нефти (FVF), определяемый как

$$B_0 = 1 + A_1R_s + A_2(T - 60) \left( \frac{\gamma_{API}}{\gamma_g} \right) + A_3R_s(T - 60) \left( \frac{\gamma_{API}}{\gamma_g} \right).$$

Корреляционные зависимости для газа даны как уравнения состояния реального газа:

$$pV_g = ZnR_uT, \tag{8}$$

где  $p$  – абсолютное давление, psia,

$V_g$  – объём газа, м<sup>3</sup>,

$Z$  – коэффициент сжимаемости газа (коэффициент сжимаемости), безразмерный,

$n$  – число киломолей,

$R_u$  – универсальная газовая постоянная, 18.3145 Дж/Моль·К,

$T$  – абсолютная температура, К.

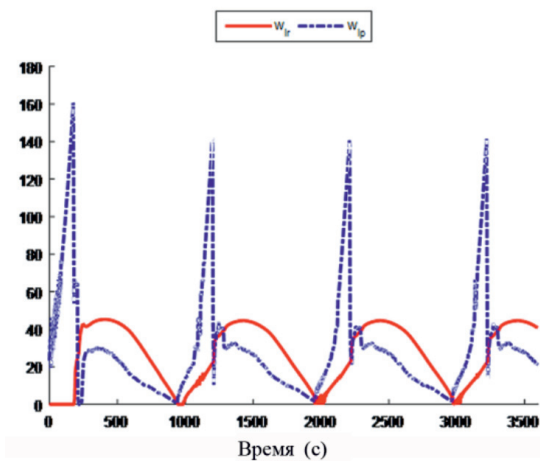


Рис. 3. Массовый расход жидкости в кг/с

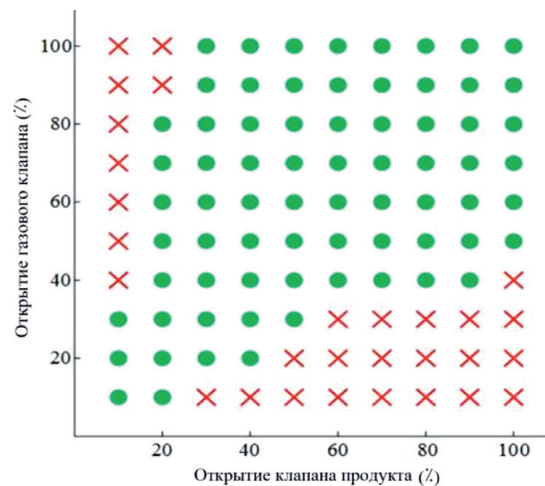


Рис. 4. Диаграмма устойчивости

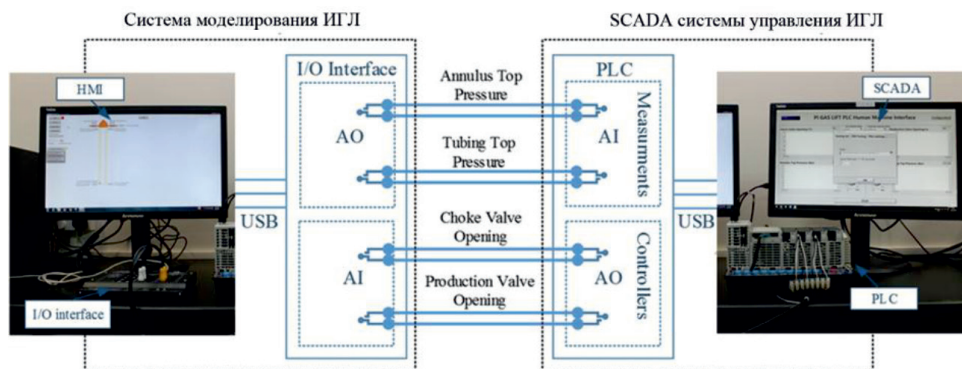


Рис. 5. Система моделирования ИГЛ, подключенная к системе управления, выполненной на ПЛК

Приведенные выше корреляционные зависимости используются в настоящем исследовании в сочетании с *алгоритмом полиэтиленовых пакетов*. На самом деле, для каждого полиэтиленового пакета используются корреляционные зависимости нефти и газа для описания состояния флюидов. Многочисленные решения уравнений (1)–(8) с использованием *алгоритма полиэтиленовых пакетов* для различных условий работы показывают, что режимы устойчивого и неустойчивого потока могут быть ясно и точно определены. Пример неустойчивого (прерывистого) потока приведен на рис. 3. Диаграмма, показывающая устойчивые и неустойчивые режимы для различных положений газового клапана и выходного клапана, приводится на рис. 4. Результаты, основанные на *алгоритме полиэтиленовых пакетов*, совпадают с результатами, полученными с помощью программного обеспечения Dynalift<sup>®</sup>, в основу которого положены эмпирические данные.

#### *Система моделирования искусственного газлифта*

Ввиду высокой эффективности *алгоритма полиэтиленовых пакетов* стало возможным разработать систему моделирования газлифта реального времени, предназначенную для использования в составе аппаратных средств в контуре системы управления ИГЛ. Система моделирования газлифта может быть использована для тестирования и настройки алгоритмов управления, реализованных на программируемых логических контролерах (ПЛК) или в распределенной системе управления (PCU). Система моделирования является *программно-аппаратным продуктом*, который выполнен на высокопроизводительном компьютере (Intel<sup>®</sup> Xeon<sup>®</sup>, с 16 GB RAM) и имеет стандартный интерфейс с PCU или ПЛК (4–20 mA, 0–10 V, HART или сетевой интерфейс). Система моделирования, подсоединенная к системе управления на основе ПЛК, показана на рис. 5. Программное обеспечение, которое помимо модели и алгоритма решения включает в себя интерфейс «Человек – машина» (ИЧМ), написана на языке C#. Выполнение алгоритма синхронизировано с реальным временем, чтобы сделать систему моделирования совместимой с системами управления, реализованными на ПЛК или PCU. Однако процесс, который она имитирует, достаточно медленный, и при тактовой частоте реали-

зации *алгоритма полиэтиленовых пакетов* величиной в одну секунду возможно увеличение скорости расчета с применением данного алгоритма до 10 раз по сравнению со скоростью протекания реального процесса. Это позволяет производить тестирование и настройку системы управления гораздо быстрее. Вместе с тем при использовании ускоренного режима настройка контроллеров ПЛК/PCU происходит при масштабировании постоянных времени. Таким образом, после осуществления настройки эти постоянные времени должны быть увеличены в число раз, соответствующее используемому коэффициенту ускорения моделирования.

#### **Заключение**

В статье представлено исследование, включающее разработку математической модели ИГЛ, основанной на эффективных вычислительных методах динамики жидкости и газа, уравнениях состояния нефти и газа и реализации этой модели в программно-аппаратном продукте – системе моделирования АГЛ реального времени. Использование разработанного продукта для идентификации устойчивых и неустойчивых режимов эксплуатации АГЛ, а также настройки контроллеров, выполненных в ПЛК/PCU, показало его удобство и практическое значение.

*Авторы выражают признательность за финансовую поддержку, оказанную проектом PIRC 14506 Петролеум института, Абу-Даби, ОАЭ.*

#### **Список литературы**

1. Hussein H., Al-Durra A., Boiko I. Design of gain scheduling control strategy for artificial gas lift in oil production through modified relay feedback test. J. of the Franklin Institute. 2014. vol. 352. 11. P. 5122–5144. DOI: 10.1109/VSS.2014.6881124.
2. Shao W., Boiko I., Al-Durra A. Plastic bag model of the artificial gas lift system for slug flow analysis. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. vol. 33. P. 573–586.
3. Shao W., Boiko I., Al-Durra A. Control-oriented modeling of gas-lift system and analysis of casing-heading instability. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. vol. 29. P. 365–381. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.01.007.
4. Abushawish I. PDE Based Model of Artificial Gas Lift Dynamics, MSc thesis, Petroleum Institute, Abu Dhabi, 2016. 181 p.
5. Baker H.A., Al-Shamma D.A., Fagher E.A. New Correlation for Predicting Undersaturated Oil Compressibility for Mishrif Reservoir in the Southern Iraqi Oil Fields. Journal of Engineering. 2013. vol. 19. 9. P. 1158–1168.
6. Vazquez M.E., Beggs H.D. Correlations for Fluid Physical Property Prediction. Journal of Petroleum Technology. 1980. vol. 32. 6. P. 968–970.