

ИМИТАЦИОННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ЦИКЛИЧЕСКОГО ГАЗЛИФТА В ОБВОДНЁННОЙ ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЕ

Соколов В.А.

Ухтинский государственный технический университет

Бураков Ю.Г.

Филиал ООО "ВНИИГАЗ" – "Севернипигаз"

Разработан подход к получению модели работы установки циклического газлифта в обводнённой газовой скважине в режиме вынужденных колебаний, позволяющий имитировать не только динамику во времени отдельных параметров режима её работы, но и их взаимосвязь. Полученная с его помощью имитационная динамическая модель рассматриваемого режима записана в виде системы из пяти нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Её особенностью является то, что каждое из уравнений можно решать отдельно, со своим входным воздействием.

1. Особенности работы установки циклического газлифта

Принципом действия установки циклического газлифта [1, 2], разработанной для эксплуатации значительно обводнённых скважин газовых (газоконденсатных) месторождений, является ступенчатый подъём добываемого газа и попутной жидкости при автоматически управляемом взаимодействии попеременной работы забойного газожидкостного эжектора и газлифтного подъёмника.

Работой установки (рис. 1) управляет щит автоматики 1 путём попеременного открытия и закрытия электроприводной задвижки б, установленной на узле подачи рабочего газа газоподводящего трубопровода. В результате этих операций осуществляется периодическая подача рабочего газа на скважину, вследствие чего в самой скважине попеременно реализуются два цикла: цикл накопления поступивших из пласта жидкости и газа в нижней части подъёмника (за счёт эжектирования) и цикл их вытеснения рабочим газом на поверхность (посредством лифтирования).

На рис. 2-3 приведены примеры записи диаграмм самопишущих манометров и дифманометров-расходомеров при работе скв. 197-Вуктыльская на режиме циклического газлифта с продолжительностью циклов (мин): накопления

– 30, вытеснения – 60. На них зарегистрированы следующие параметры режима работы скважины в период с 18 по 20 апреля 2000 г.: давление ГВД на входе в газоподводящий трубопровод и в затрубном пространстве скважины, давление добываемой газожидкостной смеси в буферном пространстве, расходы ГВД и газа сепарации. Из рисунков видно, что динамика подачи рабочего газа на скважину и отмеченные выше особенности функционирования подземного оборудования оказывают существенное влияние на динамику притока флюидов из пласта в скважину и подъёма их на поверхность. Динамика имеет явно выраженный периодический и импульсный характер.

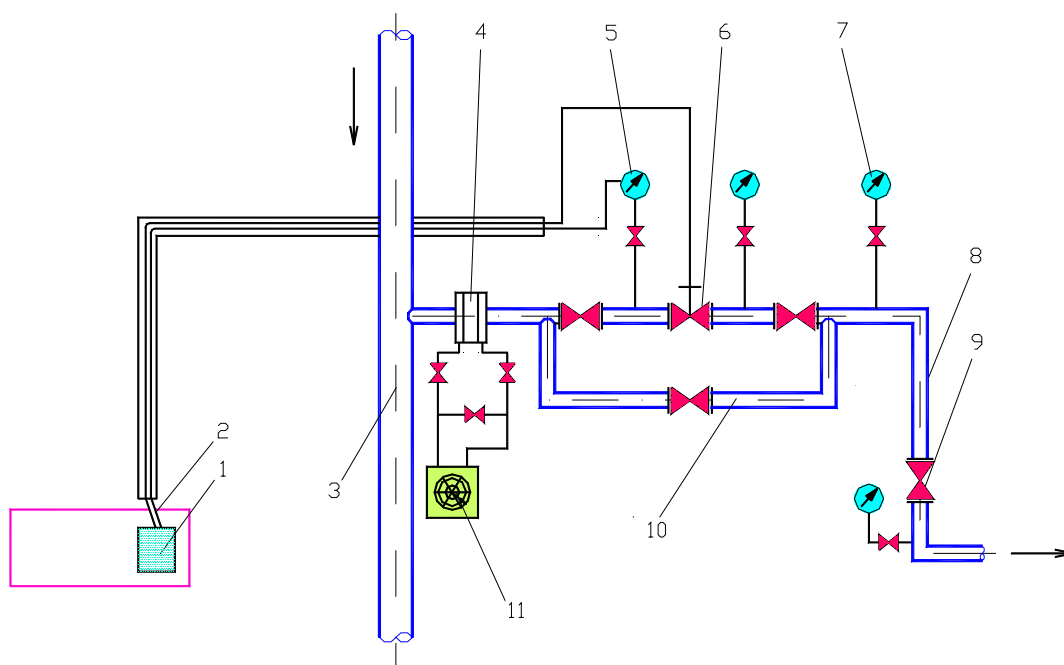
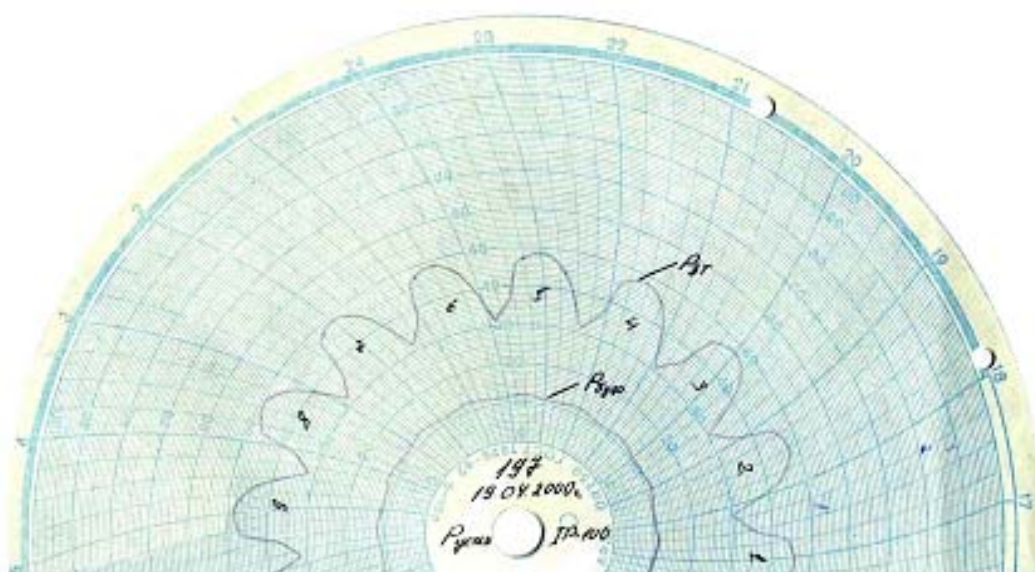


Рисунок 1. Схема узла регулирования подачи рабочего газа на скв. 197 – Вуктыльская [2]:

- 1 – щит автоматики; 2 – токоподводящая линия;
- 3 – коллектор газа высокого давления (ГВД);
- 4 – сужающее устройство; 5 – электроконтактный манометр;
- 6 – электроприводная задвижка; 7 – образцовый манометр;
- 8 – газоподводящий трубопровод, 9 – задвижка с ручным приводом;
- 10 – байпасная линия; 11 – дифманометр-расходомер

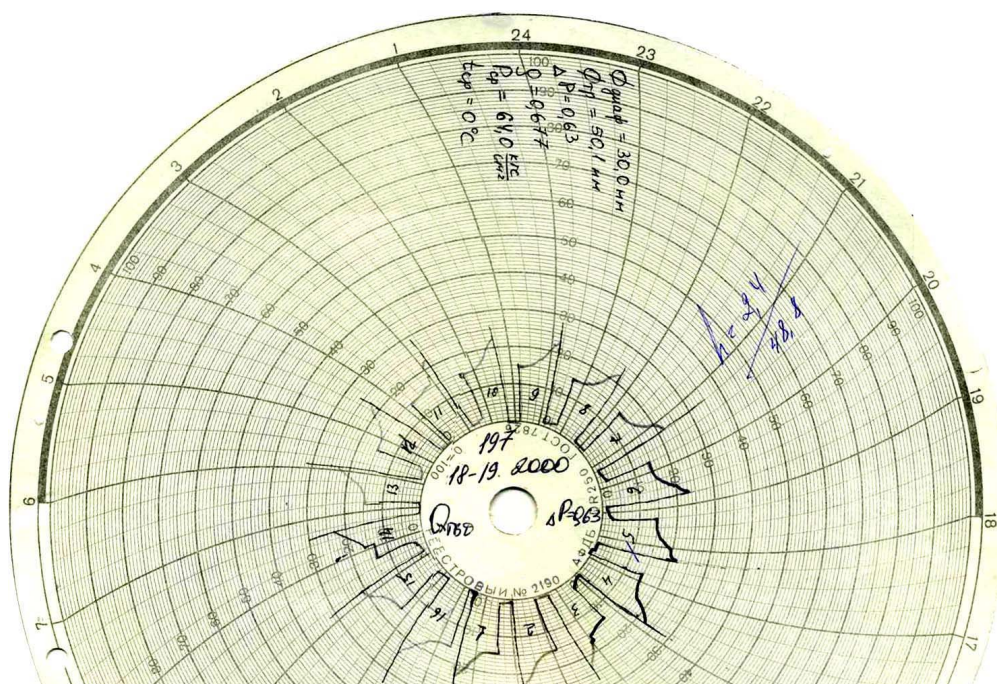


а)

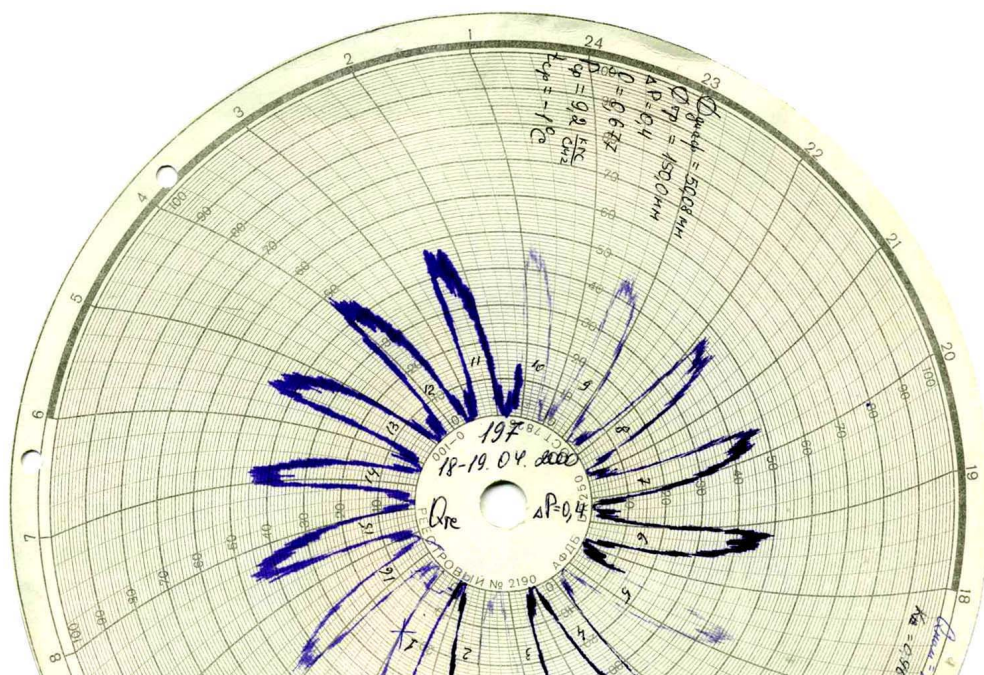


б)

Рисунок 2. Копии фрагментов рабочих диаграмм самопишущих манометров с записью давлений на входе в газоподводящую линию (а) и на устье скв. 197-Вуктыльская (б) при её работе на одном из режимов циклического газлифта



а)



б)

Рисунок 3. Копии рабочих диаграмм дифманометров с записью расходов ГВД (а) и газа сепарации (б) при работе скв. 197-Вуктыльская на одном из режимов циклического газлифта

Из краткого описания устройства, принципа действия и характера динамики во времени основных параметров работы установки циклического газлифта также видно, что она вместе со скважиной, призабойной зоной пласта и наземными газоподводящим (метанолопровод) и отводящим (шлейф) трубопроводами представляет собой достаточно сложную геолого-техническую систему, работающую на режимах с вынужденными колебаниями.

Итак, основными режимами подачи рабочего газа на скважину, оснащённую установкой циклического газлифта, являются периодический (автоматизированный, например с помощью щита автоматики или автоматизированной системы управления) и непрерывный. Кроме того, как показывает десятилетний опыт эксплуатации скв. 197-Вуктыльская, при непрерывной подаче рабочего газа в узком диапазоне эксплуатационных условий возможен режим саморегулирования, когда скважина вместе с подземным оборудованием, обводнённым пластом, газоподводящей и газоотводящей системами работает в автоколебательном режиме, то есть в режиме, когда потребность в рабочем газе определяется системой циклического газлифта автоматически.

2. Имитационная динамическая модель работы системы циклического газлифта на режимах с вынужденными колебаниями

Ранее в публикациях авторов [3-5] были разработаны методики моделирования во времени динамики различных параметров работы системы циклического газлифта на режимах с вынужденными колебаниями. При этом все разработанные модели основывались на использовании подходов, применяемых академиком А.Х. Мирзаджанзаде и его последователями и заимствованных из теории автоколебаний и самоорганизующихся (саморегулирующихся) систем [6]. При этом, моделируемые выходные переменные связывались нелинейными обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ) без выделения входной переменной. Здесь следует отметить, что эти подходы, вероятно, дадут лучшие результаты при моделировании автоколебательных режимов, наличие которых при работе системы циклического газлифта отмечалось выше.

Для моделирования работы системы циклического газлифта в режиме вынужденных колебаний взаимосвязь основных параметров целесообразно

учитывать с использованием подхода, предложенного ниже. Полученная модель будет являться тем инструментом, который позволит имитировать не только динамику во времени отдельных параметров режима работы установки циклического газлифта в обводнённой газовой скважине, но и их взаимосвязь.

С этой целью разработана следующая схема имитационного динамического моделирования режимов работы системы циклического газлифта с вынужденными колебаниями (рис. 4).

Она реализуется с использованием фактических материалов следующим образом. Сначала по фактическим данным периодической подачи рабочего газа на скважину (то есть с использованием тех параметров режима вынужденных колебаний, при которых эта подача реализована на промысле) осуществляется моделирование динамики расхода ГВД во времени алгебраической функцией $f(t)$. Затем с помощью имитационного уравнения с простой мультипликативной нелинейностью путём подачи на его вход функции $f(t)$ (значений расхода ГВД во времени, описание динамики которого получено ранее) последовательно моделируются динамика следующих параметров: разности квадратов затрубного и буферного давлений, квадрата затрубного давления. И уже после этого уравнениями такого же типа (но, естественно, с другими коэффициентами) моделируются с использованием имитационных уравнений динамики всех остальных (основных) параметров работы установки циклического газлифта в обводнённой газовой скважине. При этом входом для всех этих уравнений будет являться уже не динамика расхода ГВД при его периодической подаче на скважину, описываемая функцией $f(t)$, а динамика во времени одного и того же параметра – разности квадратов затрубного и буферного давлений. Эта последовательность расчётов логично повторяет (имитирует) последовательность реальных процессов, происходящих при работе натурального объекта – анализируемой системы циклического газлифта.

Из краткого рассмотрения схемы проведения расчётов по имитации работы установки циклического газлифта в обводнённой газовой скважине на режиме вынужденных колебаний следует, что в качестве входной функции в этой схеме принят расход ГВД. Причина, по которой это было сделано, следующая. Входным воздействием, обеспечивающим работу системы циклического газлифта, является

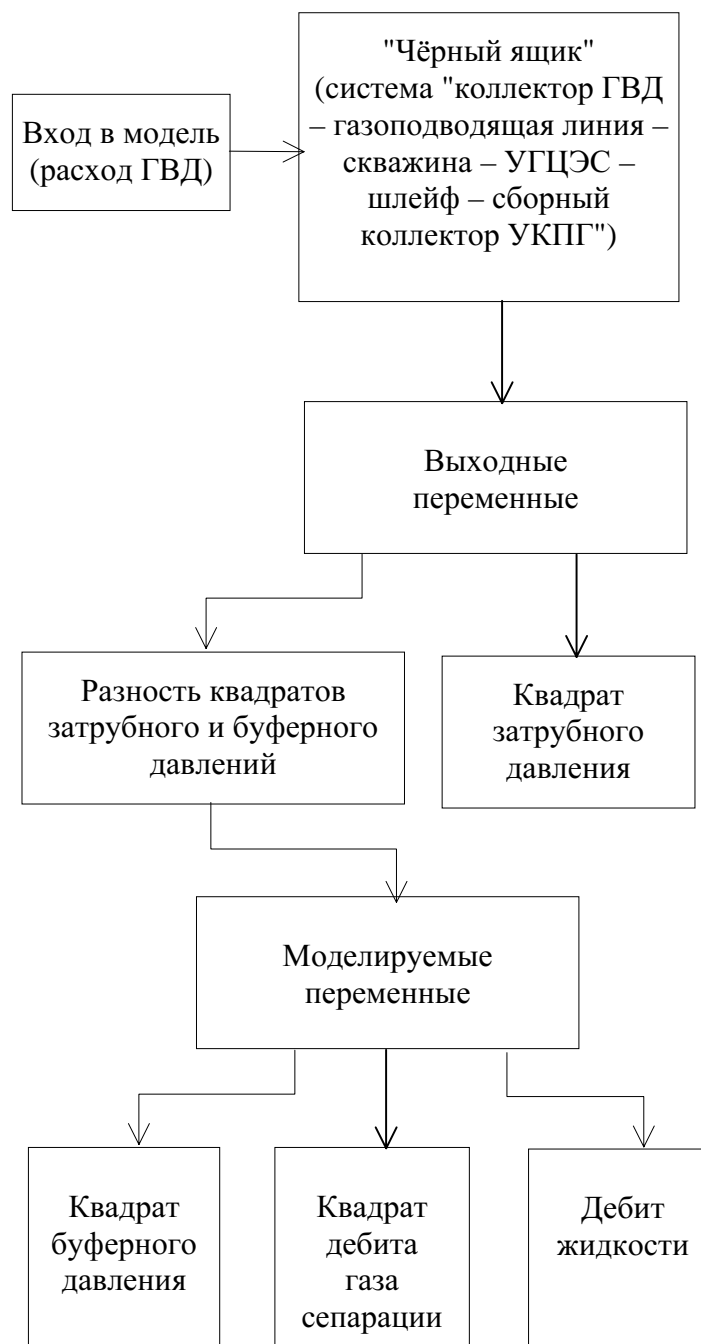


Рисунок 4. Схема имитационного моделирования динамики во времени параметров режима работы системы циклического газлифта с вынужденными колебаниями

динамика подачи ГВД на скважину. А из рис. 2-3 видно, что при работе системы циклического газлифта на режиме вынужденных колебаний во времени генерируются характерные импульсы расхода и давления рабочего газа. Поскольку параметры расхода ГВД связаны между собой, то в качестве входной переменной для отыскания другого параметра ГВД, а также других основных (выходных) параметров работы системы циклического газлифта, целесообразно использовать функцию, описывающую динамику расхода ГВД во времени, так как её график имеет более характерный вид, чем график динамики давления ГВД.

В настоящей статье каждая выходная переменная моделируется всего одним нелинейным уравнением, на вход которого уже подаётся входное воздействие. При этом, естественно, важны параметры каждого уравнения и начальные условия по выходной переменной, но определяющим является всё же характер входного воздействия.

Оказалось, что такой подход позволяет существенно упростить модель режимов работы установки. Имитационная динамическая модель одного из режимов работы установки циклического газлифта в обводнённой газовой скважине может быть записана в виде системы из пяти нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, имеющих следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = 0,016f(t)x + 20f(t) - 66x + 30, \\ \frac{dy}{dt} = 0,15f(t)y + 17f(t) - 60y, \\ \frac{dz}{dt} = 0,15xz + 6x - 104z, \\ \frac{dv}{dt} = 24,5xv + 100505x - 890v, \\ \frac{dw}{dt} = 79xw + 38x - 1595w - 100, \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \\ (5) \end{array}$$

где x – разность квадратов затрубного и буферного давлений (Δp^2); y – квадрат затрубного давления ($p_{зт}^2$); z – квадрат буферного давления ($p_{буф}^2$); v – квадрат дебита газа сепарации ($Q_{гс}^2$); w – дебит жидкости ($Q_{ж}$), $f(t)$ – алгебраическая функция, моделирующая сложную (импульсную) динамику расхода ГВД во времени. Отметим, что запись в виде системы пяти ОДУ не

принципиальна, а делается лишь для краткости. Каждое из уравнений (1)-(5) этой системы можно решать отдельно, со своим входным воздействием.

В качестве исходных данных для получения представленной выше модели были использованы материалы исследований скв. 197-Вуктыльская, полученные в декабре 1998 г., когда в отличие от исследований, записи отдельных параметров по которым приведены на рис. 2-3, дополнительно была зафиксирована с высокой частотой динамика расхода жидкости [3, 7]. Динамика основных параметров работы скв. 197-Вуктыльская на этом режиме циклического газлифта с продолжительность циклов накопления 15 мин и вытеснения 30 мин приведена на рис. 5.

3. Моделирование формы импульсов расхода ГВД во времени

Ранее в работах [3, 4] для описания сложной формы импульсов графика динамики расхода ГВД во времени был разработан следующий подход. Для математического описания изменения величины расхода ГВД было составлено дифференциальное уравнение, правая часть которого зависит только от времени. Вид правой части этого уравнения был подобран таким, чтобы после его интегрирования получалось выражение, графиком которого во времени являются прямоугольные импульсы, имитирующие динамику расхода ГВД при его периодической подаче на скважину. Более подробно реализация такого подхода изложена в публикациях [3, 4]. Однако позднее в связи с высокой математической сложностью его использования от него пришлось отказаться.

Ниже предложен другой менее сложный и более эффективный способ математического описания динамики расхода ГВД. Она описывается алгебраической импульсной функцией с использованием тригонометрической функции арктангенс путём комбинирования ступенчатой функции таким образом, чтобы получился прямоугольный импульс. Затем косой срез верхней части прямоугольного профиля импульса моделируется параболой, перемещаемой по оси абсцисс и ординат.

Для сопоставления графики этой функции и фактической динамики ГВД во времени представлены на рис. 6.

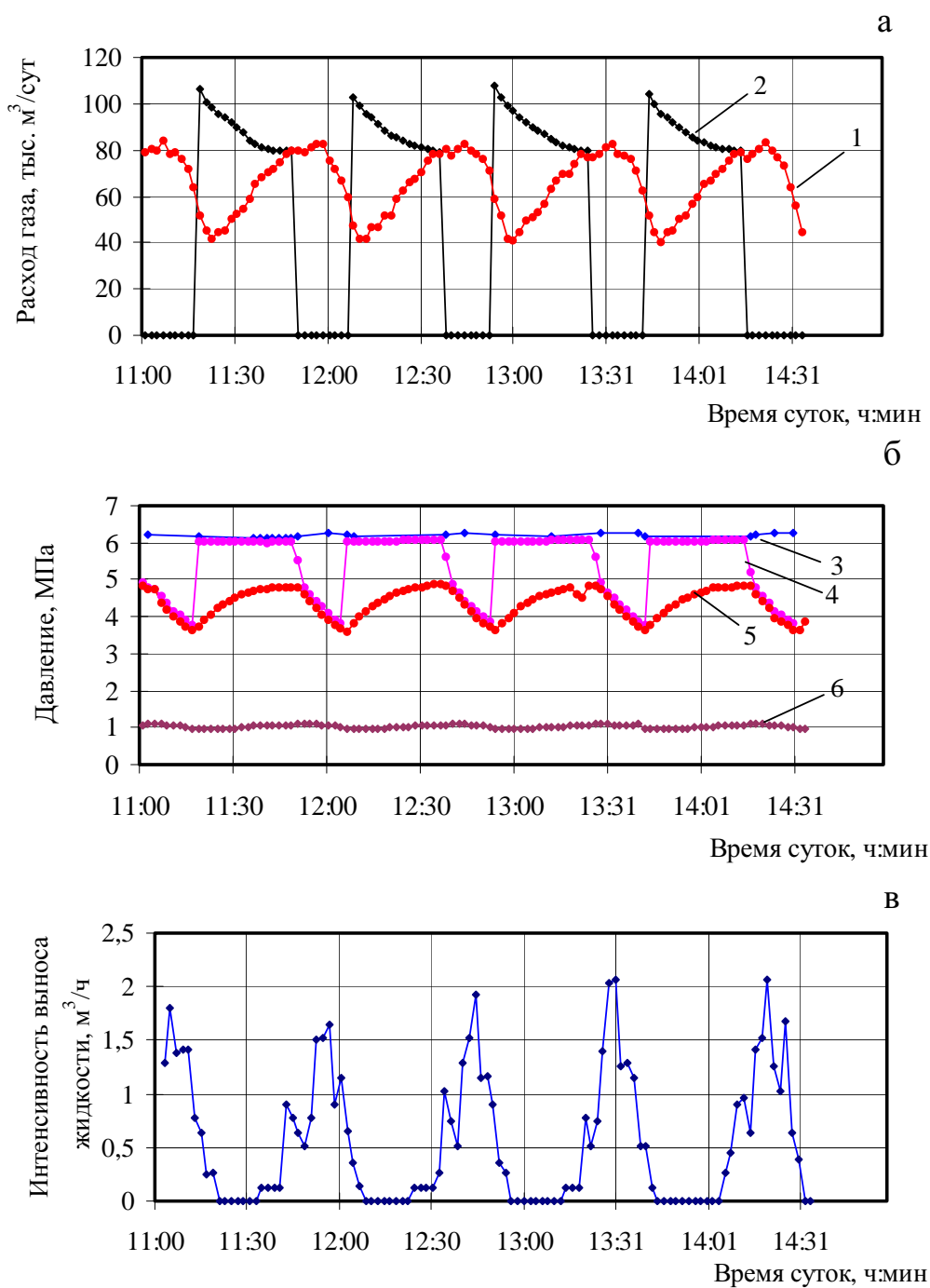


Рисунок 5. Динамика расхода газов (а), давлений (б) и интенсивности выноса жидкости (в) по скв. 197- Вуктыльская при работе установки циклического газлифта 08.10.98 г. с продолжительностью циклов: накопления 15 мин, вытеснения 30 мин [3, 7]:

расход газа:

1 - сепарации; 2 - рабочего; *давление:*

3 - в коллекторе ГВД; 4 - в газоподводящем трубопроводе;

5 - в затрубном пространстве; 6 - в буферном пространстве

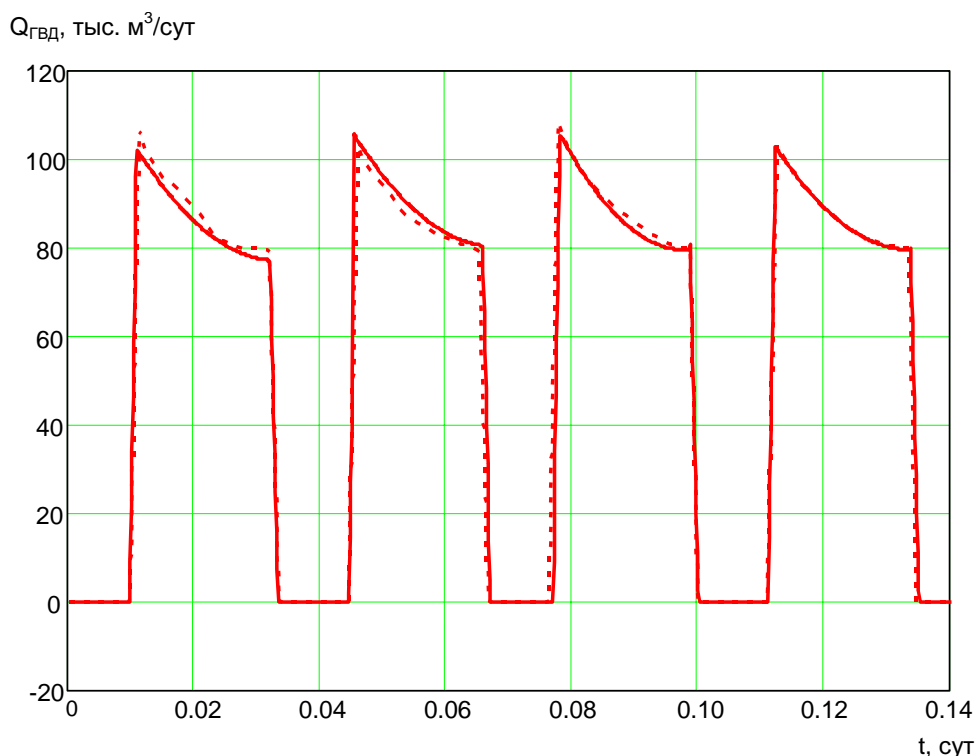


Рисунок 6. Сравнение результатов имитации импульсов ГВД алгебраической функцией $f(t)$ (сплошная линия) с фактической динамикой ГВД (пунктир) во времени

4. Моделирование разности квадратов затрубного и буферного давлений и квадрата затрубного давления

Приведенная на рис. 6 динамика ГВД является входом для нелинейного неавтономного обыкновенного дифференциального уравнения (1) в приведённой выше системе, решение которого имитирует динамику разности квадратов затрубного и буферного давлений $\Delta p^2 = p_{зт}^2 - p_{буф}^2$ (переменная x). Начальное условие по этой переменной равно 21,26 МПа². График решения этого ОДУ в сопоставлении с графиком фактической динамики разности квадратов затрубного и буферного давлений приведён на рис. 7.

При подаче этой же динамики ГВД на вход нелинейного неавтономного уравнения (2) системы ОДУ моделируется динамика параметра $p_{зт}^2$. Начальным условием переменной, имитирующей динамику квадрата затрубного давления (y), является значение 22,468 МПа². Сопоставление графиков решения уравнения (2) системы и фактической динамики $p_{зт}^2$ приведено на рис. 8.

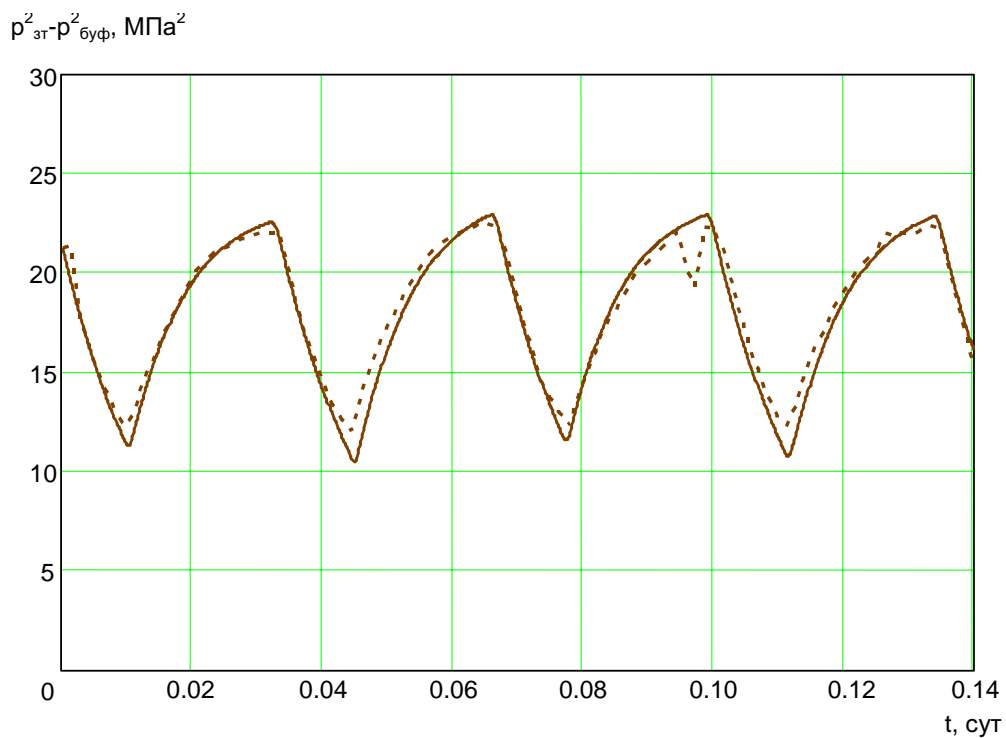


Рисунок 7. График решения ОДУ (сплошная линия) и фактическая динамика разности квадратов затрубного и буферного давлений (пунктир)

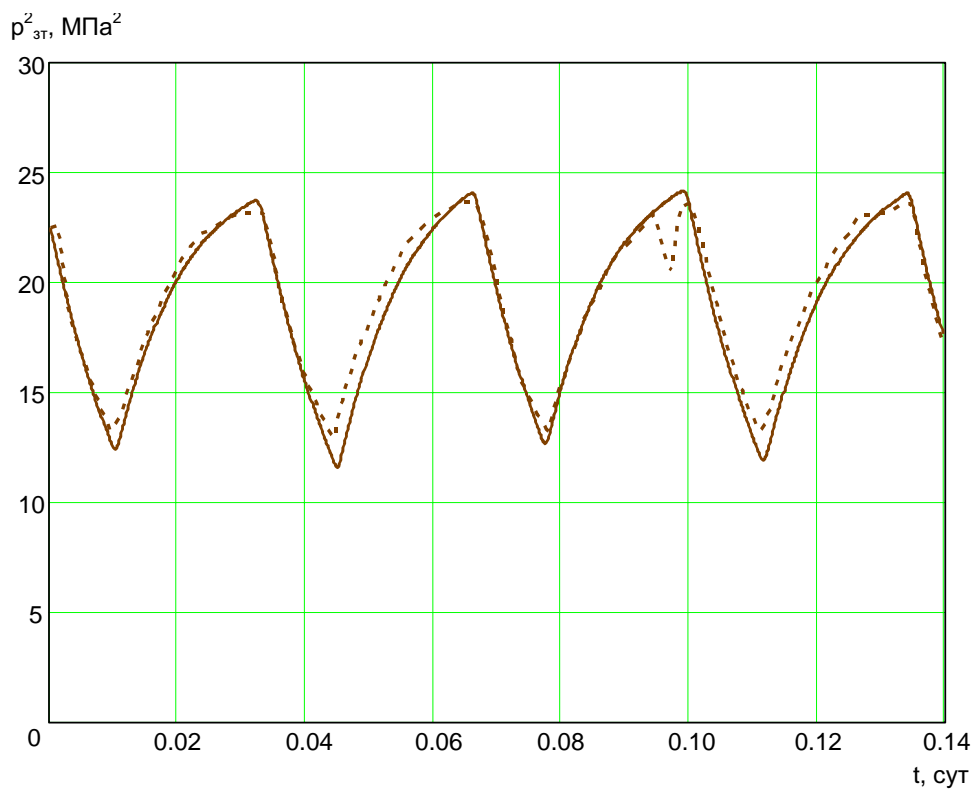


Рисунок 8. График решения ОДУ (сплошная линия) и фактическая динамика во времени квадрата затрубного давления (пунктир)

5. Моделирование динамики буферного давления, расходов газа сепарации и жидкости

В дальнейшем динамика ГВД для имитации остальных параметров не используется, а на вход уравнений (3)-(5) системы, моделирующих динамику буферного давления в квадрате, расходов газа сепарации в квадрате и жидкости, подаётся динамика разности квадратов затрубного и буферного давлений во времени (то есть, динамика переменной x).

Итак, сначала эта динамика подаётся на вход нелинейного автономного ОДУ (3) системы. Начальным условием переменной z (квадрата буферного давления) является значение $1,21 \text{ МПа}^2$. График решения этого уравнения вместе с графиком фактической динамики $p_{\text{буф}}^2$ представлен на рис. 9.

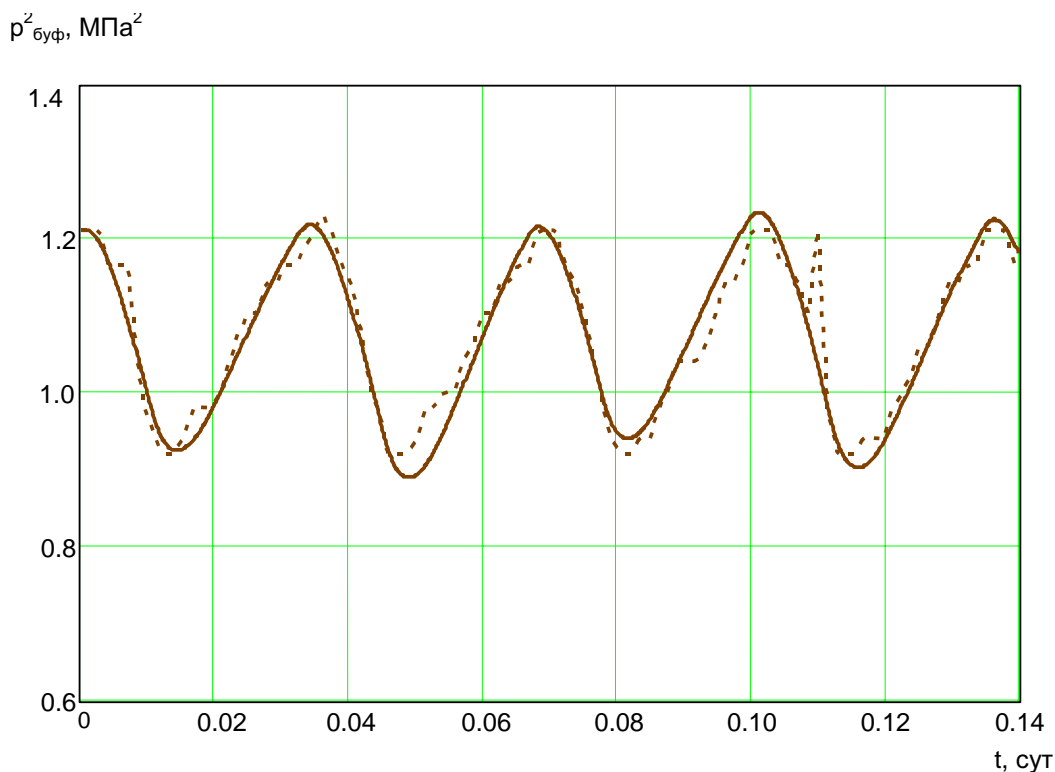


Рисунок 9. График решения ОДУ (сплошная линия) и фактическая динамика квадрата буферного давления (пунктир)

Далее динамика x подаётся на вход уравнения (4) системы ОДУ. Начальным условием переменной v (квадрата расхода газа сепарации) является значение $6448 \text{ (тыс. м}^3/\text{сут)}^2$. График решения этого ОДУ вместе с фактической динамикой $Q_{\text{гс}}^2$ приведён на рис. 10.

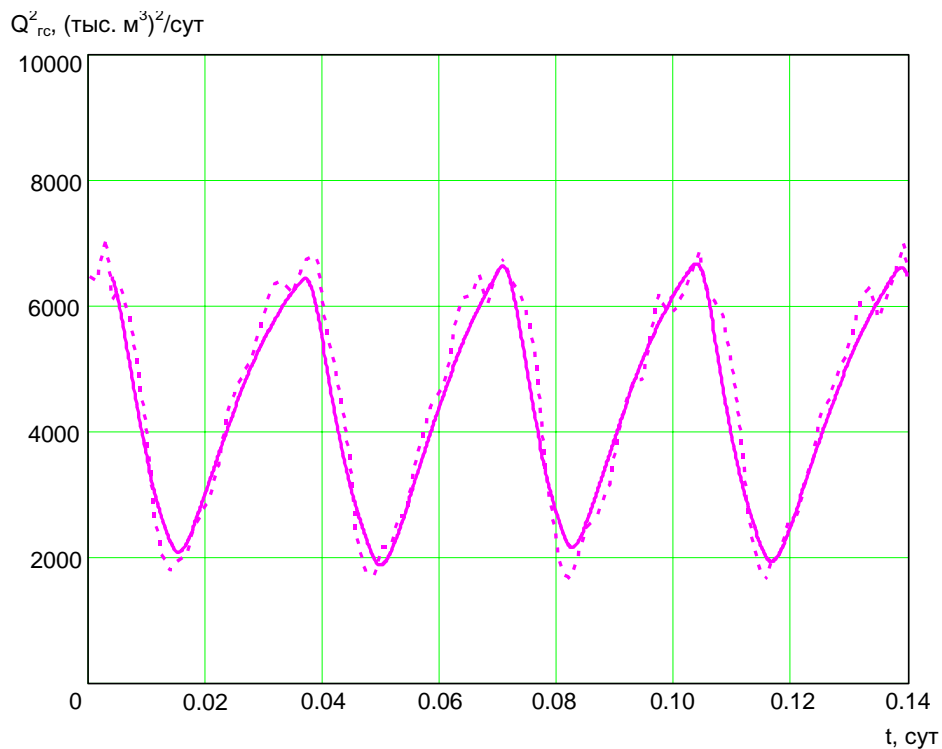


Рисунок 10. График решения ОДУ (сплошная линия) и фактическая динамика (пунктир) квадрата расхода газа сепарации во времени
График решения, имитирующий переменную v ($Q_{гс}^2$), смещён вправо на 0,004 сут

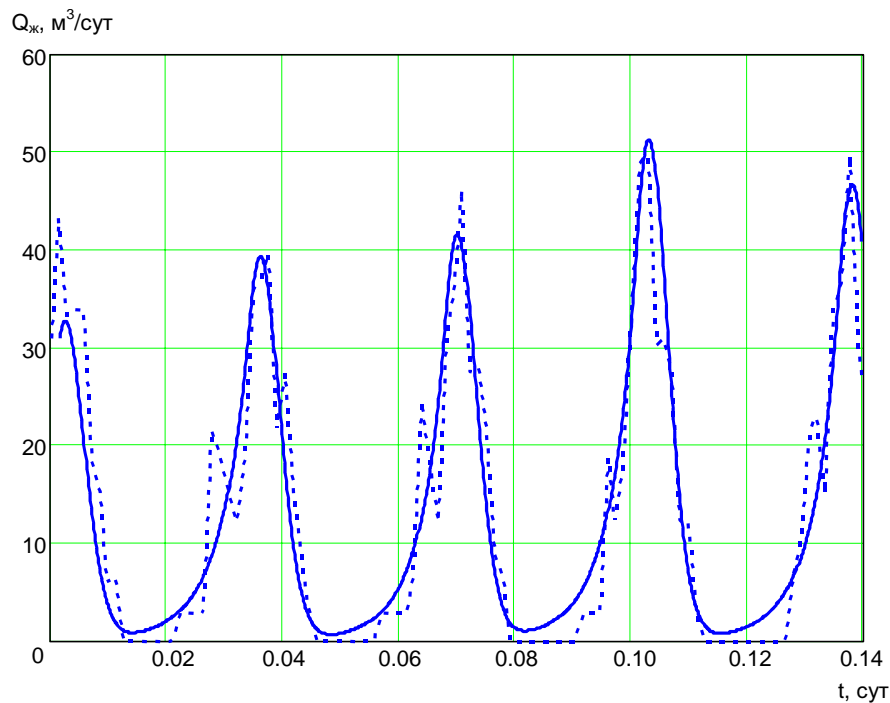


Рисунок 11. График решения ОДУ (сплошная линия) и фактическая динамика (пунктир) дебита жидкости во времени
График решения смещён вправо на 0,0015 сут

И, наконец, динамика переменной x подавалась на последнее, пятое уравнение системы ОДУ. Начальное условие по переменной w (то есть дебиту жидкости) составило $31 \text{ м}^3/\text{сут}$. График решения ОДУ (5) системы в сопоставлении с графиком фактической динамики $Q_{\text{ж}}$ приведён на рис. 11.

Таким образом, вся имитационная динамическая модель работы системы циклического газлифта в режиме вынужденных колебаний представляет собой пять нелинейных ОДУ, которые можно решать численно как отдельно, так и в виде системы уравнений. Отметим, что в этой системе все уравнения имеют одинаковый тип нелинейности.

На рис. 12 в виде графиков динамики четырёх основных параметров представлен общий результат имитации работы системы циклического газлифта на режиме с вынужденными колебаниями. Все представленные на нём переменные, кроме дебита газа сепарации в квадрате, умножены на масштабный коэффициент 100 для более наглядного сопоставления с фактической динамикой параметров анализируемого режима работы системы циклического газлифта.

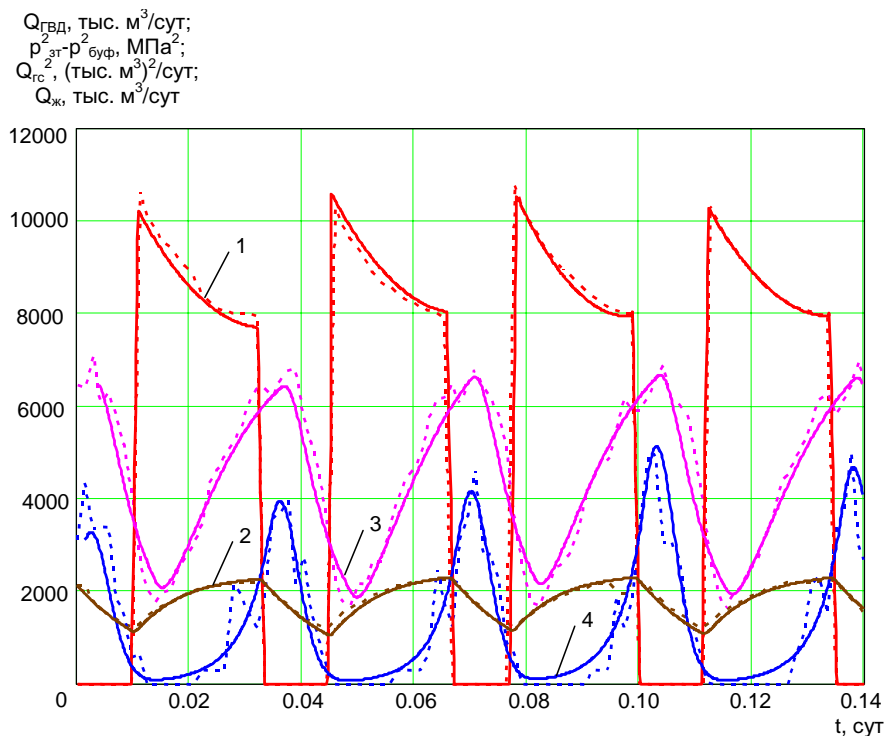


Рисунок 12. Графики решения ОДУ (сплошные линии) и фактические динамики параметров во времени (пунктир)

с учётом указанных выше смещений во времени переменных v и w :
 1 – расход ГВД; 2 – разность квадратов затрубного и буферного давлений;
 3 – квадрат дебита газа сепарации; 4 – дебит жидкости.

Для более полного представления работы системы циклического газлифта скв. 197-Вуктыльская на рис. 13-15 даны её трёхфазные портреты параметров режима.

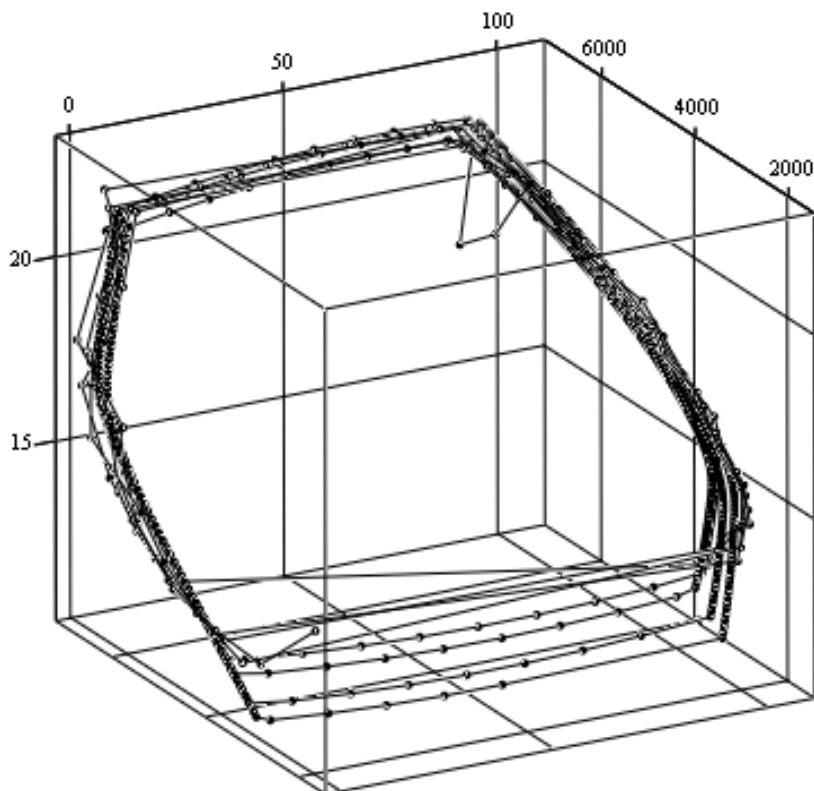


Рисунок 13. Трёхмерный фазовый портрет работы системы циклического газлифта, построенный по фактическим и модельным данным с осями: вертикальной – $p_{нт}^2 - p_{буф}^2$ (МПа²); горизонтальной – $Q_{гвд}$ (тыс. м³/сут) и перпендикулярной к плоскости, образуемой вертикальной и горизонтальной осями $Q_{гс}^2$ (тыс. м³/сут)²

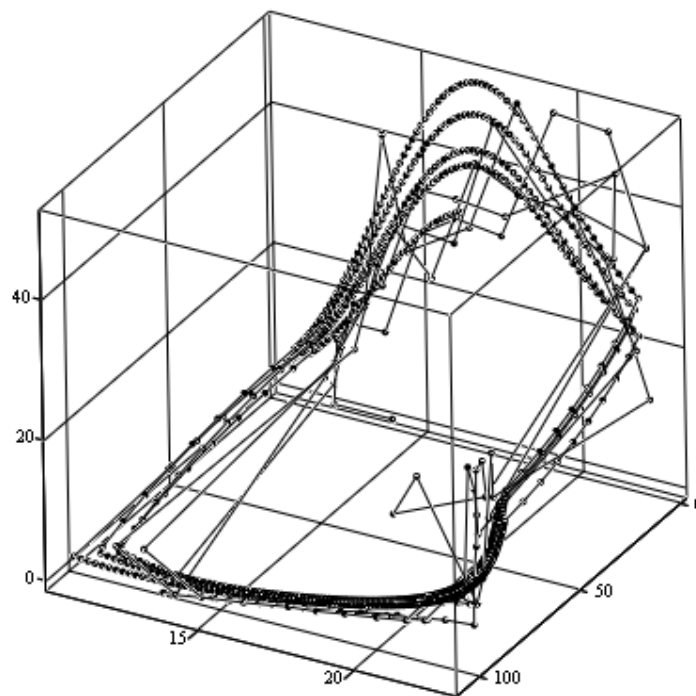


Рисунок 14. Трёхмерный фазовый портрет работы системы циклического газлифта, построенный по фактическим и модельным данным с осями: вертикальной – $Q_{ж}$ ($\text{м}^3/\text{сут}$); перпендикулярной к ней оцифрованной – $p_{зт}^2 - p_{буф}^2$ (МПа^2); перпендикулярной к ней оцифрованной с диапазоном изменения шкалы от 0 до 100 – $Q_{гвд}$ (тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$)

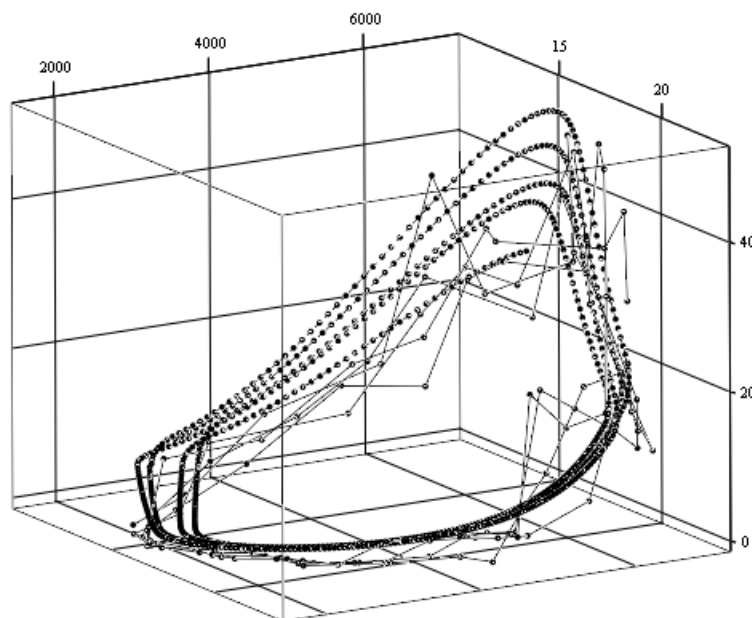


Рисунок 15. Трёхмерный фазовый портрет работы системы циклического газлифта, построенный по фактическим и модельным данным с осями: вертикальной - $Q_{ж}$ ($\text{м}^3/\text{сут}$); горизонтальной – $Q_{гс}^2$ (тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$)²; перпендикулярной к двум первым осям – $p_{зт}^2 - p_{буф}^2$ (МПа^2)

Литература

1. Патент РФ 2114284, МПК Е 21 В 43/00. Способ удаления жидкости из газоконденсатной скважины и установка для его осуществления / Ю.Г. Бураков, А.Г. Минко, В.Л. Вдовенко, В.В. Иванов и др. - № 9613500/03; Заявл. 01.07.96; Оpubл. 27.06.98, бюл. № 18. - С. 303-304.
2. Разработка регламентов и ввод в эксплуатацию простаивающих скважин ВНКМ с применением установки циклического газлифта: Отчет о НИР (заключит.) / филиал ООО "ВНИИГАЗ"-«Севернипигаз»; Руководитель Бураков Ю.Г. - № ГР 01.200.1 14500; Инв. № 03.200.1 04311/3403. - Ухта, 2000. - 195 с.
3. Бураков Ю.Г. Имитационное моделирование работы системы циклического газлифта на режимах с вынужденными колебаниями / Ю.Г. Бураков, В.А. Соколов // Нефтегазовое дело. - 2004. - Том 2. - С. 91-102.
4. Соколов В.А. Нелинейное эволюционное моделирование работы системы циклического газлифта на режимах с вынужденными колебаниями / В.А. Соколов, Ю.Г. Бураков // Новые технологии разработки и повышения нефтеотдачи: Тр. IV Международ. симпоз., 15-17 марта 2005 г., Москва, РАГС при Президенте РФ. - М.: Ин-т нефтегазового бизнеса, 2005. - С. 316-331.
5. Бураков Ю.Г. Обобщение результатов моделирования работы системы циклического газлифта в режиме вынужденных колебаний / Ю.Г. Бураков, В.А. Соколов // Нефтегазовое дело. - 2005. - Том 3. - С. 105-117.
6. Мирзаджанзаде А.Х. Основы технологии добычи газа / А.Х. Мирзаджанзаде, О.Л. Кузнецов, К.С. Басниев, З.С. Алиев. - М.: Недра, 2003. - 880с.
7. Burakov Yu. G. Equipment and Technology of Cyclic Gas Lift for Late Stage Oil and Gas-Condensate Reservoirs Development / Yu. G. Burakov, A.G. Minko // Exploration and Production Operations In Difficult And Sensitive Areas / 2001 AAPG Regional International Conference, St. Petersburg, July 15-18, 2001. - Pp. 12-11.