

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии
наук (УФИЦ РАН)

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленное структурное
подразделение Федерального государственного бюджетного научного
учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской
академии наук
(ИМех УФИЦ РАН)

На правах рукописи

Сидоров Сергей Павлович

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКВАЖИННЫМ КЛАПАНОМ

27.06.01. Управление в технических системах

05.13.01. Системный анализ, управление и обработка информации

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Уфа – 2022

Работа выполнена в Институте механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Научный руководитель:

Даринцев Олег Владимирович,

доктор технических наук, заведующий лабораторией «Робототехника и управление в технических системах» Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Рецензенты:

Арьков Валерий Юльевич

д.т.н., профессор кафедры автоматизированных систем управления федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Уфимский государственный авиационный технический университет"

Насибуллаев Ильдар Шамилович кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Робототехника и управление в технических системах» Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы состоит в том, что все больше запасов углеводородов переходит в разряд трудноизвлекаемых, к которым относится, также месторождений с риском раннего прорыва подошвенной воды или газовой шапки. Горизонтальные скважины (ГС) позволяют производить разработку подобных месторождений, но не решают всех проблем, связанных с рисками раннего прорыва воды или газа. Преждевременный прорыв воды или газа происходит вследствие неоднородности профилей потока вдоль длины горизонтального ствола, изменении пластового давления на различных участках, а также при разработке контактных месторождений, особенно по мере истощения скважин. Данные проблемы частично могут решаться путем надлежащего проектирования траектории ствола скважины, что объективно является сложным во время проектирования и бурения скважины. Особое значение имеет значительная разница в депрессии на пласт в зоне пятки и носка ГС так называемый эффект *heel-toe* вследствие перепада пластового давления в стволе ГС, за счет трения вдоль горизонтального ствола скважины. Эффект *heel-toe* особенно выражен при большой длине горизонтального участка и значительных дебетах.

Практическим решением указанных проблем могут служить устройства контроля притока (УКП) активные *Interval Control Valve (ICV)* или пассивные *Inflow Control Device (ICD)*. Устройства *ICD* способны выровнять приток вдоль ГС, за счет создания дополнительного сопротивления потоку жидкости, зависящее от величины притока на данном горизонтальном участке. Недостатком современных *ICD* заключается в том, что они не имеют возможности регулирования и приведения их в действие после их установки в стволе скважины. Это создает определенные риски, связанные с неопределенностью в описании свойств пласта, которые присутствуют на всех стадиях разработки месторождения. Системы *ICV* приводятся в действие дистанционно с поверхности скважины, но не способны определять характер поступающего флюида (нефть, газ, вода) в скважину и принимать решение в автоматическом режиме. Выше сказанное дает стимул для совершенствования данных технологий, и их конструкций.

Целью научно - квалификационной работы является разработка новой конструктивной схемы устройства контроля притока, позволяющего реализовать возможность непрерывного мониторинга характера поступающей жидкости, а также разработка комплекса моделей, на базе которого может быть реализовано специфическое программное обеспечение управления устройства контроля притока с поверхности скважины.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие **задачи**:

- анализ существующих устройств контроля притока, их конструктивных особенностей и специфики работы;
- разработка конструктивной схемы устройства контроля притока, реализующего возможность непрерывного мониторинга характер поступающей жидкости;
- синтез комплекса математических моделей предлагаемого устройства;

Научная новизна работы

Разработана новая конструктивная схема УКП, реализующая возможность непрерывного мониторинга параметров поступающей жидкости. Синтезировано математическое описание работы клапана, выполнен синтез модели клапана.

Практическая значимость

С практической точки интерес представляет новая конструкция устройства контроля притока и методика его применения, с помощью которой возможно осуществить контроль притока с нескольких перфораций скважины в автоматическом режиме.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новая конструктивная схема устройства контроля притока, которая позволяет определять характер и параметры поступающей жидкости (нефть, газ, вода).
2. Комплекс математических моделей, описывающих работу предлагаемой конструкции клапана.
3. Результаты имитационного моделирования работы клапана в среде Matlab/Simulink.

Достоверность полученных результатов обеспечена построением физико-математических моделей в соответствии с фундаментальными законами механики, корректной постановкой цели и задач, применением апробированных численных методов.

Апробация работы

Основные результаты научно – квалификационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «75 лет нефтяному образованию в Республике Башкортостан» (Уфа, 2018); семинарах по плановой аттестации аспирантов.

Публикации

По результатам проведенных исследований опубликованы 2 работы в изданиях, индексируемых в *WebofScience/Scopus*; 1 тезис по материалам докладов на конференциях. Зарегистрирована 1 полезная модель (Роспатент).

Личный вклад автора

Построение моделей, постановка задач, анализ полученных результатов и написание статей осуществлены совместно с научным руководителем. Численная реализация моделей, выполнение расчетов, обработка, оформление результатов, подготовка части публикаций проведены автором самостоятельно.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 73 страниц, включая 43 рисунков, 4 таблицы и список литературы, состоящий из 49 наименований.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность и благодарность канд. техн. наук Денисовой Екатерине Всеволодовне, своему научному руководителю д.т.н. Даринцеву Олегу Владимировичу за постановку задач, полезные советы, постоянное внимание и поддержку при подготовке диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, дана общая характеристика выполненной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится обзор существующих устройств контроля притока. В настоящее время выделяют пассивные (*Inflow Control Devices*) и активные (*Interval Control Valves*) устройства контроля притока. Пассивные *ICD* не имеют возможности регулирования и приведения их в действие после их установки в стволе скважины. Фактически данные устройства создают дополнительное сопротивление в потоке добываемого флюида, позволяет выравнивать распределения притока вдоль скважины. Принцип действия устройств заключается в создании дополнительного гидравлического сопротивления, величина которого зависит от притока на конкретном участке ствола скважины. Конструкция *ICD* уникальна для каждого производителя, в общем можно выделить *ICD* лабиринтного, трубного, соплового типов.

Активные устройства контроля притока (*ICV*) приводятся в действие дистанционно, по линиям управления или бесконтактно. Различают гидравлические, электрические и электрогидравлические системы. Недостатком систем *ICV* является то, что они не способны определять характер поступающего флюида (нефть, газ, вода) в скважину и принимать решение в автоматическом режиме.

В отдельный класс устройств выделяют автономные устройства контроля притока. Они используют динамические свойства жидкости при прохождении жидкости через устройство, чтобы максимизировать добычу полезного флюида. Главной особенностью данных типов устройств является более сложная конструкция сопла или клапана устройства. Автономные устройства устанавливаются один раз при проектировании скважины и не имеют возможности производить изменения, без остановки.

Во второй главе представлена конструктивная схема, названная электрогидравлический клапан контроля притока (рис. 1), математическое описание работы.

Устройство устанавливается совместно со вспомогательным оборудованием, к которым относится противопесочные фильтр и разбухающие пакера на колонне обсадных труб, спущенные в скважину таким образом, чтобы пакера разделили ствол скважины на участки, отличающиеся различным притоком нефти. После временной выдержки пакера увеличиваются в объеме и перекрывают выбранные интервалы. Противопесочные фильтры предназначены для фильтрации добываемого продукта от посторонних

включений, предотвращения разрушения призабойной зоны, выноса песка и других механических примесей из скважин.

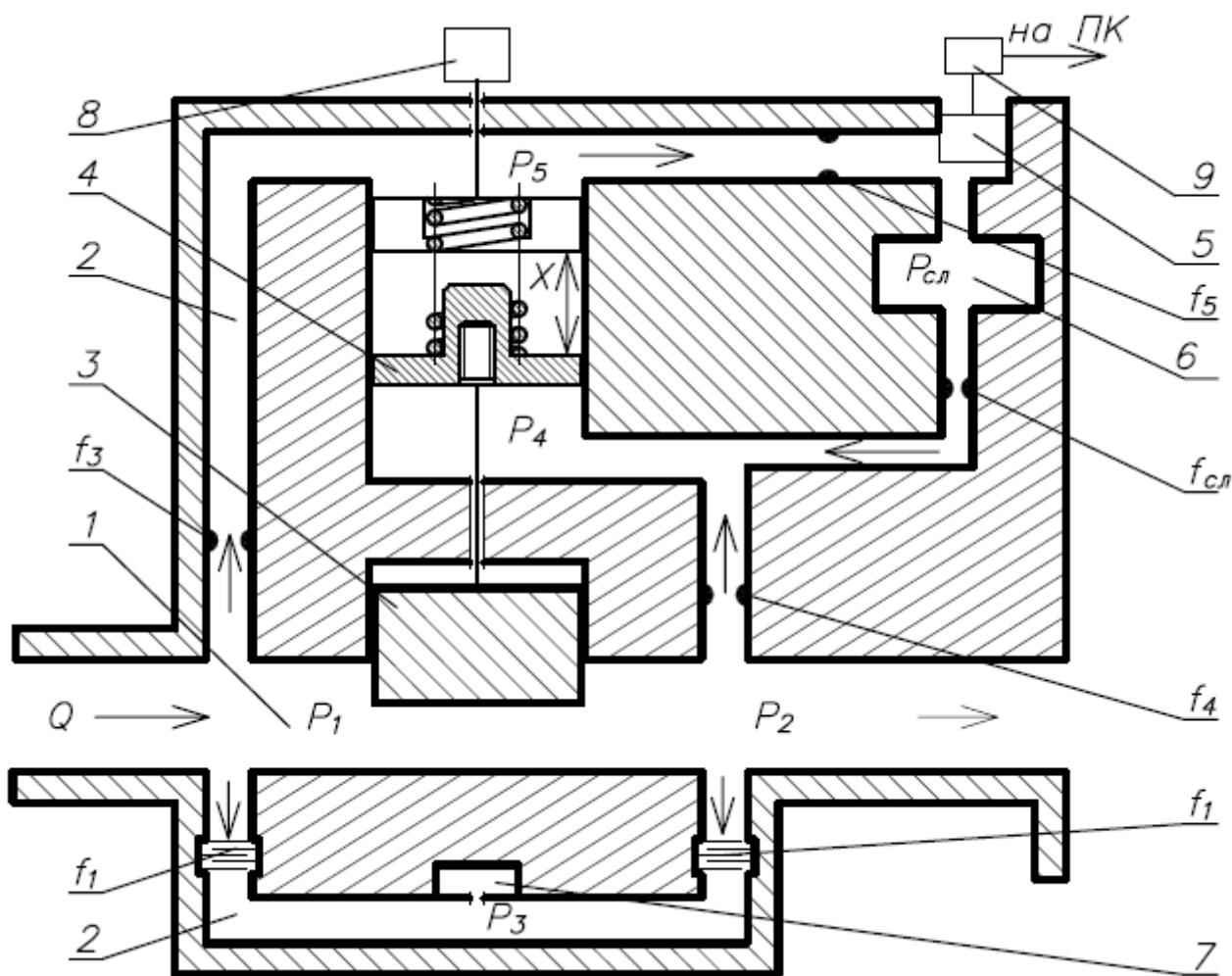


Рис. 1 – Конструктивная схема электрогидравлического клапана контроля
 1 – основной канал, 2 – вторичный канал, 3 – исполнительный механизм, 4 – поршень, 5 – заслонка, 6 – буферная емкость, 7 – датчик давления, 8 – датчик контроля перемещения, 9 – ЭМК, $f_1 \dots f_5$, $f_{сл}$ – ограничители потока.

Электрогидравлический клапан контроля притока содержит корпус, который включает основной канал 1, вторичный канал 2 клапана. Во вторичном канале установлены ограничители потока в виде дроссельных пакетов f_1 , f_2 , и жиклеров f_3 , f_4 , f_5 , 6 – датчик перепада давления. Основной канал содержит исполнительный механизм 3, приводимый в действие поршнем 4, положение которого определяется с помощью датчика перемещения 7. Вторичный канал 2 ограничен заслонкой 5 и электромагнитным клапаном 9, приводимым в действие с поверхности скважины. Излишки, вытесненные в области заслонки, поступают в буферную емкость 6.

Электрогидравлический клапан контроля притока работает следующим

образом. Поток жидкости Q проходит через основной канал 1, попадая из продуктивного пласта в эксплуатационную трубу. Во вторичном канале 2 при прохождении жидкости через дроссельные пакеты f_1, f_2 , происходит падение давления, которое зависит от плотности жидкости и температуры. Падение давления можно настраивать, подбирая количество пластин в пакете и диаметр отверстий. Получается, давление P_3 изменится, если изменятся свойства протекающей среды, при протекании более вязкой жидкости, такой как нефть, клапан находится в открытом состоянии, при течении жидкости с более низкой вязкостью, такой как газ или вода, давление P_3 увеличивается, данное изменение фиксируется датчиком перепада давления 7.

В зависимости от данного перепада изменяется положение исполнительного механизма 3. Изменять положение клапана позволяет заслонка 5, приводимая в действие автоматической системой регулирования скважины. В случае факта изменения текучей жидкости, зафиксированного датчиком 7, заслонка 5 закрывается или открывается. При движении заслонки в закрытое состояние давление P_5 над поршнем возрастает, тем самым перемещая поршень вниз на величину X . Контролировать положение исполнительного механизма позволяет датчик перемещения 8 на поршне.

Контролировать положение исполнительного механизма позволяет датчик перемещения 8 на поршне. Таким образом, зная перепад давления и температуру, возможно косвенным путем определить, какая среда протекает через клапан нефть, газ или вода.

Приведем математическое описание работы клапана.

Падение давления зависит от плотности и температуры и скорости поступающего флюида. Расход жидкости Q_1 при прохождении через ограничителя потока f_1 можно определить по формуле

$$Q_1 = a\mu f_1 \sqrt{P_1 - P_3}, \quad (1)$$

где $a = \sqrt{\frac{2g}{\rho}}$; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; ρ – плотность или удельный вес потока жидкости, kg/m^3 ; μ – коэффициент истечения; f_1 – площадь ограничителя потока, m^2 ; P_1 – давление на входе, Па; P_3 – давление после ограничителя потока f_1 , Па.

Таким образом зная перепад давления и температуру протекающей жидкости, можно определить характер протекающего флюида в скважине, при заданном расходе.

Теперь опишем уравнения управления клапаном. Запишем силы,

действующие на поршень

$$m_{\Sigma}\ddot{x} + C_{\text{пр}}\dot{x} + R_{\text{пр}} = F_n(P_5 - P_4), \quad (2)$$

где m_{Σ} – суммарная масса исполнительного механизма и поршня, кг; x – перемещение поршня, м; $C_{\text{пр}}$ – коэффициент жесткости пружины, $\frac{H}{m}$; $R_{\text{пр}}$ – сила предварительной затяжки на поршне, Н; F_n – площадь под поршнем, m^2 ; P_5 – давление над поршнем, Па; P_4 – давление под поршнем, Па.

Проведем линеаризацию уравнений относительно малого перемещения поршня X . Согласно выражению (3) имеем:

$$m_{\Sigma}\Delta\ddot{x} + C_{\text{пр}}\Delta\dot{x} = F_n(\Delta P_5 - \Delta P_4), \quad (3)$$

Запишем уравнение расхода (1):

$$\Delta Q_1 = \alpha_1(\Delta P_1 - \Delta P_3), \quad (4)$$

где $\alpha_1 = \frac{a\mu f_1}{2\sqrt{P_1 - P_3}}$ – есть коэффициент линеаризации.

Расход жидкости при прохождении других ограничителей потока аналогичен (4).

$$\Delta Q_3 = \alpha_3(\Delta P_1 - \Delta P_5) = \alpha_3 \cdot \Delta P_5 + F_n\Delta\dot{x}, \quad (5)$$

$$\Delta Q_4 = \alpha_4(\Delta P_2 - \Delta P_4), \quad (6)$$

$$\Delta Q_4 + \Delta Q_{\text{сл}} = F_n\Delta\dot{x}, \quad (7)$$

Если сделать допущение что $P_{\text{сл}} \approx P_4$, то

$$\Delta Q_{\text{сл}} = \alpha_{\text{сл}}\Delta P_4, \quad (8)$$

Решая уравнения 6 и 7 с учетом допущения 8

$$\alpha_4\Delta P_2 + (\alpha_{\text{сл}} - \alpha_4)\Delta P_4 = F_n\Delta\dot{x}, \quad (9)$$

Поскольку можно считать $\Delta P_2 \approx 0$, находим

$$\Delta P_4 = \frac{F_n}{\alpha_{\text{сл}} - \alpha_4} \cdot \Delta\dot{x}, \quad (10)$$

Из уравнения 5 находим ΔP_5 , считая $\Delta P_1 \approx 0$

$$\Delta P_5 = \frac{F_n}{\alpha_{32} - \alpha_{31}} \cdot (-\Delta\dot{x}) \quad (11)$$

Полученные зависимости подставляем в уравнение (3), получаем баланс сил (уравнение Ньютона).

$$m_{\Sigma}\Delta\ddot{x} + \left(\frac{F_n^2}{\alpha_{32} - \alpha_{31}} + \frac{F_n^2}{\alpha_{\text{сл}} - \alpha_4} \right) \Delta\dot{x} + C_{\text{пр}}\Delta x = 0, \quad (12)$$

Полученное уравнение соответствует динамике клапана, как уравнению колебательного звена:

$$W(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}, \quad (13)$$

где $T = \sqrt{\frac{m}{C_{\text{пр}}}}$, – время переходного процесса, K – коэффициент передачи,
 $K = \frac{\Delta x}{\Delta P_3}, \xi$ – степень затухания.

В третьей главе проведено моделирование работы клапана в среде имитационного моделирования *Simulink* для оценки работоспособности математической модели.

Для построения модели, охватывающий весь диапазон возможных значений трех параметров, воспользуемся методом матричного представления ДХ. Матричный метод заключается в фиксации параметров ДХ в виде матриц. В зависимости от решаемой задачи и известных параметров, выбирается матрица по одному из параметров, расчет проводится как в физических, так и в приведенных значениях. В нашем случае воспользуемся матрицей по перепаду давления, которая имеет вид:

$$A_{\overline{\Delta P}} = (\overline{\Delta P} \quad \overline{T} \quad \overline{\rho})$$

На рис. 2 представлена модель клапана, построенная в *Simulink*.

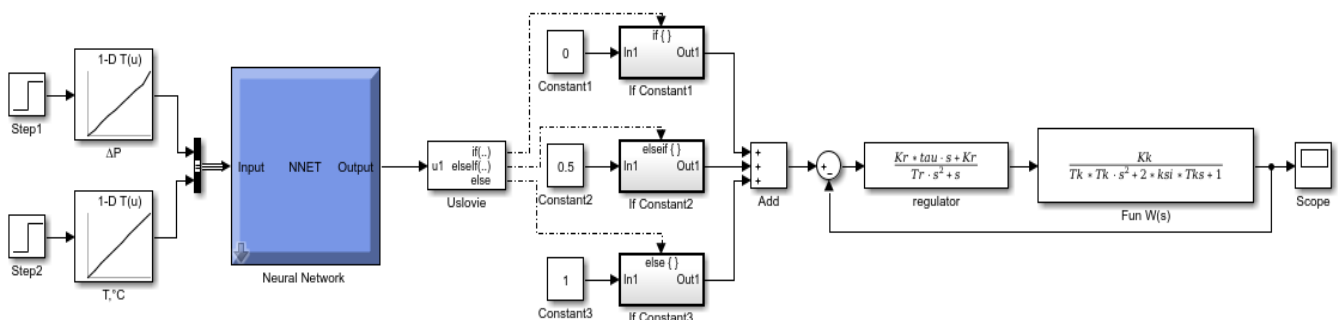


Рис. 2 – Модель клапана в *Simulink*

Опишем логику работы блока модели. На вход модели поступает два значения параметров: перепад давления, после дроссельного пакета $f1$, температура. С помощью блока (*step*) генерируется ступенчатый сигнал, посредством блоков одномерной таблицы (ΔP) и ($T, ^\circ C$) формируются значения входных параметров. Нейронная сеть (*Neural Network*) обучена для поиска входных значений соответствующих и отличающихся от матричных, что позволяет оценивать все полученные результаты измерений.

Для аппроксимации сложных нелинейных функциональных зависимостей часто используют нейронные сети. Существуют различные подходы для аппроксимации заданного набора входных-выходных данных. Нейронные сети позволяют не искать явный вид функциональной зависимости.

Для решения поставленной задачи выберем многослойный персептрон, обучаемый согласно алгоритму обратного распространения ошибки, так как доказана применимость теоремы об универсальной аппроксимации к многослойному персептрон.

Число нейронов во входном и выходном слоях соответствует числу входных и выходных параметров: во входном слое – 2, в выходном – 1.

В структуре сети (рис. 3) существует один скрытый слой, так как теорема об универсальной аппроксимации утверждает, что многослойного персептрона с одним скрытым слоем достаточно для построения равномерной аппроксимации с точностью ε для любого обучающего множества, представленного набором входов и откликов.

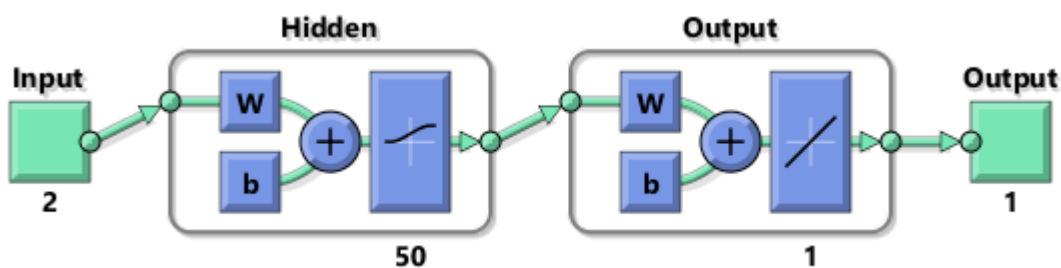


Рис. 3 – Структура нейронной сети

Количество нейронов в скрытом слое примем 50. Как показали представленные далее результаты, такое количество нейронов обеспечивает необходимую точность аппроксимации и низкие затраты на время обучения нейронной сети. Во входном слое используем сигмоидальную функцию активации, в выходном – линейную, что обусловлено простотой применения, обучения и статистического анализа. На рис. 4 представлен результат аппроксимации исходных данных нейронной сетью, где «.» показаны экспериментальные данные, «Δ» – выход нейронной сети.

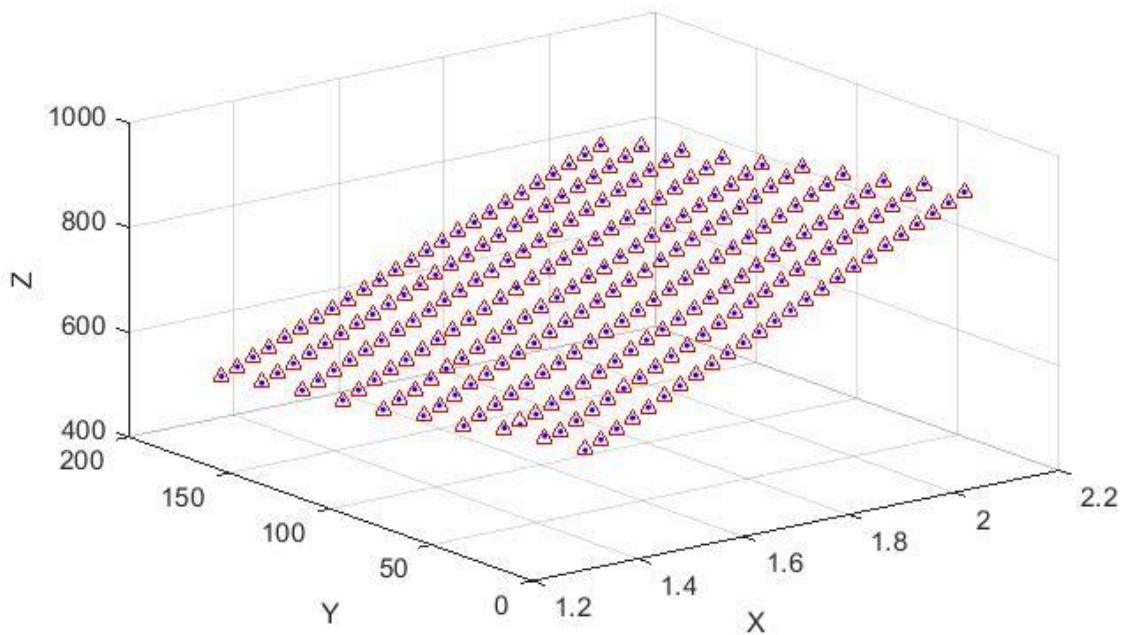


Рис. 4 – Результат аппроксимации

Значение плотности поступает на блок условного оператора (*Uslovie*), совместно с подсистемами (*if Constant*) принимается решение о положение клапана. Данный блок является аналогом оператора *if-else* языка программирования С. На выходе блока (*Uslovie*) формируются значения процента открытия клапана 0, 50, 100 % .

Задав условия работы, зная передаточную функцию $W(s)$ клапана полученную, известными методами синтеза, используемые в *Simulink* находим передаточную функцию регулятора. С помощью блоков передаточной функции (*regulator*) и (*Fun W(s)*) задаем передаточную функцию заслонки и клапана в виде отношения полиномов.

Далее проверяем качество полученных переходных процессов. На рисунке 5 показан конечный результат моделирования на выходе модели. В результате моделирования переходный процесс установился за время $t = 300$, с, что является адекватным значением для подобного рода систем и позволяет сделать вывод о работоспособности системы. Переходный процесс за данный период времени не окажет никакого влияния на само извлечение запасов из скважины, поскольку его время в несколько раз меньше чем процессы, протекающие в самой скважине.

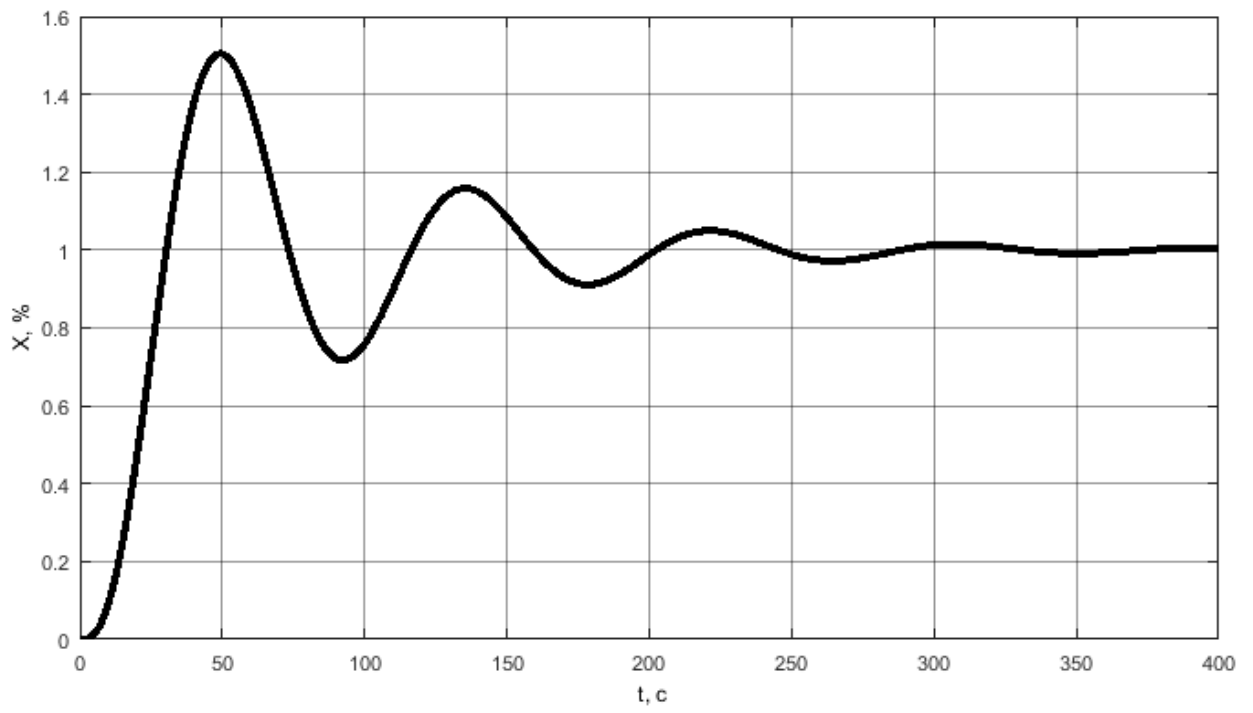


Рисунок 5 – Результат моделирования

ВЫВОДЫ

Проведен анализ существующих УКП, в ходе которого выделены основные их конструктивные особенности, сделаны выводы о положительных и отрицательных сторонах, представлено сравнение применения разных устройств.

Проведенный анализ позволил разработать новую конструктивную схемы УКП реализующая возможность непрерывного мониторинга параметров поступающей жидкости.

Синтезировано математическое описание работы клапана.

Выполнен синтез модели клапана, с использованием матричного подхода и нейронных сетей для построения качественной зависимости положения клапана от значения создаваемого перепада давления. Приведены результаты работы блока нейронной сети и конечный результат моделирования, позволяющий сделать вывод о работоспособности модели.

Основные публикации по теме научно – квалификационной работы:

1. Заявка 2018113357/03(021017) Российская Федерация, МПК E21B 34/06, E21B 43/12, G05D 7/01 Электрогидравлический клапан контроля притока [Текст] / Р.Н. Бахтизин, Р.А. Исмаков, Е.В. Денисова, А.И. Шакирова, С.П. Сидоров. Заявитель ФГБОУ ВО УГНТУ.; пат. поверенный Галковская В.Г – № 2018113357/03; заявл. 12.04.2018. – 8 с;

2. Исмаков Р.А., Денисова Е.В., Черникова М.А., Сидоров С.П. Система управления устройством контроля притока флюида в скважине // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 11. 192-198 с.

3. Исмаков Р.А., Денисова Е.В., Сидоров С.П., Черникова М.А., Исследование устройств контроля притока для оценки применения в интеллектуальной скважине // SOCAR Proceedings Нефтяной Инжиниринг: от науки к технологии. 2021. №2. 201-209 с.

4. Исмаков Р.А., Денисова Е.В., Черникова М.А., Сидоров С.П. Косвенный замер вязкости и устройство для его реализации // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «75 лет нефтяному образованию в Республике Башкортостан», посвященной 70-летию Уфимского государственного нефтяного технического университета. – Уфа: ООО «РН-БашНИПИнефть», 2018. – 94 с.