

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2026.1.284-302>

EDN YFDBMC

УДК 622.245

Физико-математическое моделирование турбулентного течения жидкости в устройстве контроля притока, как в основном узле системы интеллектуального заканчивания скважин

Газизов Р.Р., Исмаков Р.А., Чижов А.П.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Physical and mathematical modeling of turbulent fluid flow in an inflow control device as a key component of an intelligent well completion system

R.R. Gazizov, R.A. Ismakov, A.P. Chizhov

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

E-mail: ga3i3ov.renat@yandex.ru

Аннотация. Решение проблемы преждевременного обводнения скважин с протяженным горизонтальным окончанием остается актуальным, а повышение эффективности добычи углеводородов из подобных скважин применением устройств контроля притока (УКП) ограничено, в том числе санкциями и высокой стоимостью зарубежных решений. Разработка отечественных аналогов с учетом известных недостатков зарубежных устройств и обладающих рядом преимуществ, например, возможностью оценки характера состава поступающего флюида в сегмент ствола скважины, позволит обеспечить долговременную добычу из горизонтальных скважин и будет способствовать расширению применения УКП.

В работе рассматриваются вопросы физико-математического моделирования турбулентного течения жидкости в одном из элементов нижнего заканчивания скважин с исследованием влияния основных параметров движения жидкости в дроссельном пакете разработанного оригинального УКП с использованием программного продукта Comsol.

Ключевые слова: устройство контроля притока (УКП), интеллектуальное заканчивание скважин, физико-математическое моделирование, турбулентное течение,

двухфазная смесь (многофазный поток), цифровой двойник устройства, дроссельный пакет

Для цитирования: Газизов Р.Р., Исмаков Р.А., Чижов А.П. Физико-математическое моделирование турбулентного течения жидкости в устройстве контроля притока, как в основном узле системы интеллектуального заканчивания скважин // Нефтяная провинция.-2026.-№1(45).-С. 284-302. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2026.1.284-302>. - EDN YFDBMC

Abstract. Solving the problem of premature flooding of wells with extended horizontal completions remains a pressing issue, and improving the efficiency of hydrocarbon production from such wells through the application of Inflow Control Devices (ICDs) is limited, among other factors, by sanctions and the high cost of foreign solutions. The development of domestic analogues, which take into account the known shortcomings of foreign devices and possess a number of advantages—such as the ability to assess the composition of the incoming fluid in a wellbore segment—will ensure long-term production from horizontal wells and promote the wider application of ICDs. The paper addresses issues of physical and mathematical simulation of turbulent fluid flow in one of the elements of lower well completion, investigating the influence of key fluid motion parameters within the throttle package of the developed original ICD using the COMSOL software.

Key words: *Inflow Control Device (ICD), intelligent well completion, physical and mathematical modeling, turbulent flow, two-phase mixture (multiphase flow), digital twin of the device, throttle package*

For citation: R.R. Gazizov, R.A. Ismakov, A.P. Chizhov Fiziko-matematicheskoe modelirovanie turbulentsnogo techeniya zhidkosti v ustroystve kontrolya pritoka kak v osnovnom uzle sistemy intellektualnogo zakanchivaniya skvazhin [Physical and mathematical modeling of turbulent fluid flow in an inflow control device as a key component of an intelligent well completion system]. Neftyanaya Provintsiya, No. 1(45), 2026. pp. 284-302. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2026.1.284-302>. EDN YFDBMC (in Russian)

Поддержание уровня добычи углеводородов в РФ диктует новые условия по обеспечению эффективности строительства, заканчивания и освоения скважин для добычи нефти и газа на существующих месторождениях без значительных капитальных затрат. Поиск технологий, повышающих эффективность извлечения углеводородов, и их адаптация под геолого-промысловые условия различных месторождений становится одной из важнейших задач отечественной нефтегазовой отрасли в рамках парадигмы энергетической стратегии.

Развитие технологий по высокоточному изготовлению и обработке материалов, применение информационных технологий открывают перспективы повышения конечных показателей извлечения углеводородов сохраняя стоимость добычи на прежнем уровне. Значительные объемы добычи попутно добываемой воды, проблемы с ее последующей утилизацией, подготовкой и обезвоживанием продукции скважин, борьба с коррозией оборудования вызывают рост капиталовложений. К примеру, часто добыча воды превышает добычу нефти в десятки раз, что сопутствует росту затрат на подъём, энергопотребление и снижению коэффициента извлечения продукции скважин [1–4].

Для решения этих проблем за рубежом появились различные инновационные технологии, такие как устройства контроля притока флюида в скважины, включая различные варианты: устройства регулирования притока (ICD), клапаны регулирования притока (ICV), автономные устройства регулирования притока (AICD) и автономные клапаны регулирования притока (AICV). Эти устройства, как правило, применяются как составные части интеллектуальных систем заканчивания скважин, предполагая их установку вдоль ствола горизонтальной скважины для регулирования притока флюидов и выравнивания депрессии.

Основная цель применения УКП — обеспечить равномерный приток флюида по длине горизонтального участка ствола с минимизацией добычи воды, что позволяет повысить эффективность добычи нефти в целом и снизить затраты на последующее обезвоживание продукции [4, 5].

Принципы работы этих устройств подробно описаны во многих публикациях для широкого спектра конструкционных решений. Например, пассивные системы регулирования описаны в публикациях [6-11, 14]. В них используются каналы и отверстия для управления перепадом давления и притоком флюидов. Более сложные варианты, такие как AICD, с подвижными элементами, применяются для управления потоком в реальном времени и

способны подстраиваться под скважинные условия, позволяя более тонко контролировать процесс добычи из каждого сегмента скважин.

Примеры конструкций без подвижных частей включают диодные конфигурации [12-15], а с подвижными компонентами — диски и заслонки, например, клапаны типа RCP [16], регулирующие поток за счёт перемещения деталей в зависимости от плотности и вязкости протекающей через устройство жидкости. Наконец, новейшее поколение AICV демонстрирует более высокую эффективность по сравнению с AICD и включает автономные подвижные части, такие как диски, способные дросселировать приток флюида до 90% [16-19].

Однако существуют и проблемы при их применении, что существенно снижает эффективность скважин, причём наиболее критичным является оптимизация проектирования систем заканчивания с установкой подобного оборудования стволов. Это включает такие аспекты, как моделирование работы УКП и флюидодинамику в них, расчет количества клапанов вдоль продуктивной зоны ствола и порядка их размещения, геометрические параметры и другие факторы [19, 20,22].

Существует четыре основных подхода к математическому моделированию динамики движения флюида (многофазных систем): прямое численное моделирование с отслеживанием границ раздела фаз, модель взаимодействующих континуумов – метод Эйлера-Эйлера, модель отслеживания частиц в потоке – метод Эйлера-Лагранжа и дисперсионная модель. Каждый подход обладает достоинствами и недостатками.

Прямые методы более точны, но применимы только к задачам малых масштабов и используются в основном в микрофлюидике. Подход Эйлера-Эйлера, при котором многофазное течение рассматривается как совокупность взаимодействующих континуумов, широко распространен, но осложняется корректностью описания межфазной границы для рассредоточенных потоков промышленного масштаба.

Применение подхода Эйлера-Лагранжа ограничено слабо-концентрированными системами, где столкновениями частиц и гидродинамическим взаимодействием можно пренебречь и также предполагается односторонняя связь между дисперсной фазой и дисперсионной средой.

В свою очередь применение дисперсных моделей позволяет провести достаточно точные численные расчеты, не требуя при этом привлечения очень мощных вычислительных ресурсов и при этом возможен учет множества факторов: геометрии, объемной доли, относительной фазовой скорости, физико-химических свойств дисперсной фазы и дисперсионной среды.

Рассмотрим изотермическое течение двухфазной смеси, при следующих допущениях:

- плотности дисперсионной среды и дисперсной фазы постоянны;
- давление в дисперсионной среде и дисперсной фазе одинаковое;
- характерное время релаксации частиц, меньше характерного времени макроскопического потока.

Гидродинамика двухфазной несжимаемой смеси при турбулентном течении, без учета химических реакций и массообмена между фазами, описывается системой дифференциальных уравнений. В нее входят: уравнения сохранения массы смеси, уравнения импульса смеси, уравнения переноса турбулентной кинетической энергии и турбулентной скорости диссипации кинетической энергии, уравнения динамики дисперсных частиц, уравнения баланса фаз, и уравнения для расчета диффузионной (относительной) скорости между фазами (для описания была использована формула Рыбчинского – Адамара).

Если плотности дисперсной фазы и дисперсионной среды постоянны и массообмен между фазами можно пренебречь, то система уравнений с использованием понятия объемного потока выглядит следующим образом.

$\nabla \cdot \vec{j}_m = 0,$	(1)
$\frac{\partial \vec{j}_m}{\partial t} + \rho_m (\vec{j}_m \cdot \nabla) \vec{j}_m + (\rho_d - \rho_c) [(\vec{j}_d \cdot \nabla) \vec{j}_m + (\vec{j} \cdot \nabla) \vec{j}_d]$ $= -\nabla p_m +$ $+ \nabla \cdot \left[(\mu_m + \mu_T) (\nabla \vec{j}_m + \nabla \vec{j}_m^T) - \frac{2}{3} (\mu_m + \mu_T) (\nabla \cdot \vec{j}_m) \mathbf{I} \right.$ $\left. - \frac{2}{3} \rho_m k \mathbf{I} \right] -$ $- \nabla \cdot \left[\rho_c \left(1 + \varphi_c \frac{\rho_d - \rho_c}{\rho_c} \right) \vec{u}_d \vec{j}_d^T \right],$	(2)
$\rho_m (\vec{j}_m \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] +$ $+ \mu_T \left[\nabla \vec{j}_m : \left(\nabla \vec{j}_m + \nabla \vec{j}_m^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{j}_m)^2 \right) \right] - \frac{2}{3} \rho_m k \nabla \cdot \vec{j}_m -$ $- \rho_m \varepsilon,$	(3)
$\rho_m (\vec{j}_m \cdot \nabla) \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \times$ $\times \left\{ \mu_T \left[\nabla \vec{j}_m : \left(\nabla \vec{j}_m + \nabla \vec{j}_m^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{j}_m)^2 \right) \right] - \frac{2}{3} \rho_m k \nabla \cdot \vec{j}_m \right\} +$ $+ C_{\varepsilon 2} \rho_m \frac{\varepsilon^2}{k^2},$	(4)
$\frac{\partial \varphi_d}{\partial t} + \vec{j}_m \cdot \nabla \varphi_d - \nabla \cdot (\vec{j}_d) = \nabla \cdot [D_d \nabla \varphi_d],$	(5)
$\vec{u}_d = - \frac{(\rho_m - \rho_d) d_d^2}{18 \mu_m} \left(\frac{1 + \frac{\mu_c}{\mu_d}}{1 + \frac{2}{3} \frac{\mu_c}{\mu_d}} \right) \left(- \frac{\partial \vec{j}_m}{\partial t} - (\vec{j}_m \cdot \nabla) \vec{j}_m \right),$	(6)
$\varphi_c + \varphi_d = 1$	(7)

где:

$\vec{j}_c = \varphi_c \vec{u}_c$ – поток дисперсионной среды м/с;

$\vec{j}_d = \varphi_d \vec{u}_d$ – поток дисперсионной фазы м/с;

$\vec{j} = \vec{j}_c + \vec{j}_d = \varphi_c \vec{u}_c + \varphi_d \vec{u}_d$ – поток смеси м/с;

$\vec{j}_r = \varphi_c \varphi_d \vec{u}_r$ – поток относительной скорости между фазами м/с;

Предположим, что в начальный момент времени в УКП находится только дисперсионная среда без дисперсных частиц в состоянии равновесия, тогда граничные условия можно записать в виде:

$$\vec{j}_m(x, y, z, 0) = 0, \varphi_d(x, y, z, 0) = 0.$$

На границах УКП задавалось условие отсутствия потока для объемной доли дисперсной фазы и условия прилипания для скорости потока смеси:

$$-\vec{n} \cdot (\varphi_d \vec{u}_d) = 0, -\vec{n} \cdot (\varphi_c \vec{u}_c) = 0, \quad \vec{j} = 0,$$

где \vec{n} – вектор нормали к границе.

На входе в УКП задается постоянная скорость потока смеси и постоянная объёмная доля дисперсной фазы:

$$\varphi_d = \varphi_0, \quad \vec{j}_m = -u_0 \cdot \vec{n},$$

где φ_0 – объёмная доля поступающей в УКП дисперсной фазы, u_0 – скорость, поступления смеси. Данное условие рассматривается как прорыв нежелательного флюида в процессе разработки месторождения.

Система уравнений динамики многофазной смеси с начальными и граничными условиями представляет собой замкнутую математическую модель УКП, решение которой при заданных входных параметрах позволяет определять поля течений и давлений смеси, а также распределение объёмной доли дисперсной фазы и дисперсионной среды в устройстве.

На основе перечисленных выше подходов к дисперсионной модели турбулентной динамики многофазной смеси в программном комплексе COMSOL Multiphysics был разработан цифровой двойник течения флюида в УКП. На рис. 1 приведена геометрия УКП, состоящего из основного цилиндрического канала с двумя отводами к дроссельным пакетам, которые гидродинамически связаны вторичным цилиндрическим каналом.

Поток жидкости, поступающий в УКП, проходя через основной канал, будет поступать в гидродинамически связанный с ним через дроссельные

пакеты вторичный канал, в котором происходит падение давления. Определение величины падения давления в УКП зависит от геометрических параметров жиклеров и объемной доли дисперсной фазы, что позволяет в случае испытаний на физической модели (стенде) по установленным датчикам давления в основном и вторичном каналах УКП определить перепад давления и, как следствие, характер поступающего флюида в скважину [9].

Основной задачей УКП является ограничение притока нежелательной фазы из продуктивного пласта, например, вследствие прорыва подстилающих или контурных вод в скважину, поэтому наибольший интерес представляет задача определения гидродинамических характеристик в зависимости от объемной доли дисперсной фазы.

В качестве дисперсионной среды рассматривался флюид со свойствами обычной нефти $\rho_c = 888 \text{ кг/м}^3$, $\mu_c = 0,79 \text{ Па}\cdot\text{с}$, в качестве дисперсной фазы рассматривалась вода $\rho_d = 998 \text{ кг/м}^3$, $\mu_d = 0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Также проводились расчеты для случая, когда в качестве дисперсионной среды использовалась вода, а дисперсной фазой являлась нефть. Значения объемной доли дисперсной фазы на входе в УКП задавалось в диапазоне от 0 до 0,9 д.ед. с шагом 0,1 д.ед..

Так как в работе для расчетов использовалась дисперсионная модель турбулентного многофазного течения и явного выделения границ раздела фаз не предполагалось, то эффекты, обусловленные силами поверхностного натяжения, не учитывались.

Рассмотрим случай заданного перепада давления в УКП, когда дисперсионная среда – нефть, дисперсная фаза – вода (поступление воды в нефть). С увеличением доли воды увеличивается величина скорости, как в основном, так и во вторичном каналах вследствие уменьшения вязкости смеси. На рис. 1 приведены типовые линии тока при тех же значениях дисперсной фазы – поступление воды 10% и 50%. Из рисунка видно, что в

каналах дроссельных пакетов наблюдаются интенсивные конвективные течения (вихри).

Рассмотрим более детально распределение давлений в дроссельных пакетах, как основного элемента интеллектуальной системы заканчивания.

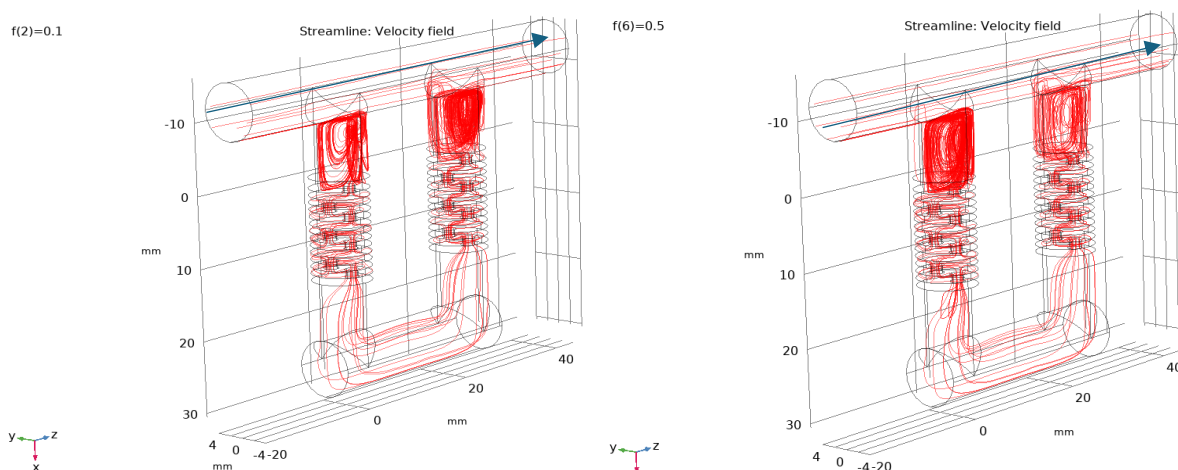


Рис. 1. Геометрия УКП и линии тока в устройстве при различных соотношениях дисперсной фазы - воды («вода в нефти»), $\Delta p=100$ атм., $f=0,1;0,5$

На рис. 2 представлено распределение давления во входном (а) и выходном (б) дроссельных пакетах УКП в зависимости от объемной доли поступающей дисперсной фазы - воды. Видно, что с увеличением объемной доли воды среднее давление в пакетах уменьшается. Также нетрудно заметить ступенчатое снижение давления при прохождении сборок дроссельного пакета.

Сравнивая перепады давлений во входном и выходном дроссельных пакетах для различных значений объемных долей дисперсных фаз, можно сделать вывод, что величина перепада давления определяется зазорами между шайб дроссельных пакетов.

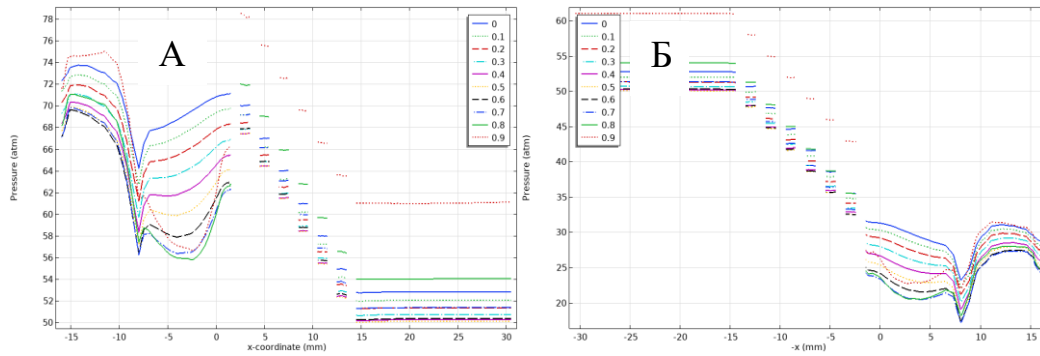


Рис. 2. Распределение давления во входном (а) выходном (б) дроссельном пакете в зависимости от объемной доли поступающей дисперсной фазы («вода в нефти»), $\Delta p=100$ атм.

Анализ параметров зависимости давления во вторичном канале от объемной доли поступающей фазы - воды представлен на рис. 3. Так, характер зависимости не монотонный, до значения дисперсной фазы $f=0,6$ величина давления плавно убывает, после резко возрастает, причем точка «инверсии» с уменьшением перепада давления смещается в сторону больших значений объемных долей дисперсной фазы.

На рис. 4 приведена расходная характеристика УКП при различных перепадах давления в устройстве в зависимости от объемной доли поступающей «воды», так как при увеличении доли маловязкой дисперсной фазы расход увеличивается.

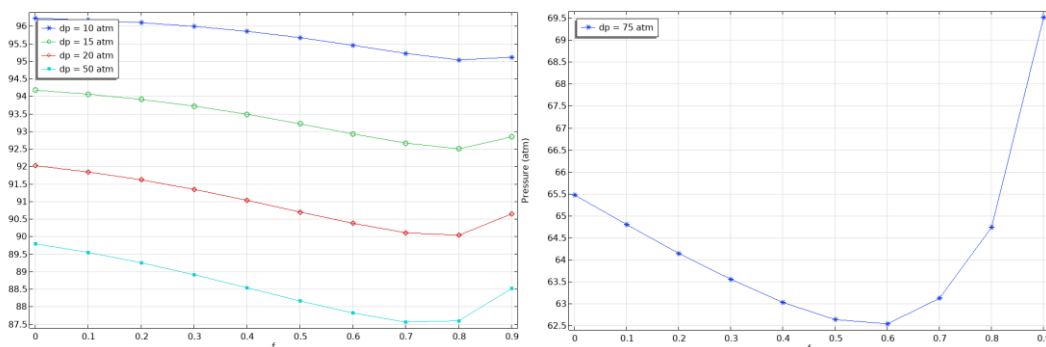


Рис. 3. Среднее давление во вторичном канале УКП в зависимости от объемной доли поступающей дисперсной фазы «воды» («вода в нефти»), $\Delta p=10,15,20,50,75$ атм. f - объемные доли

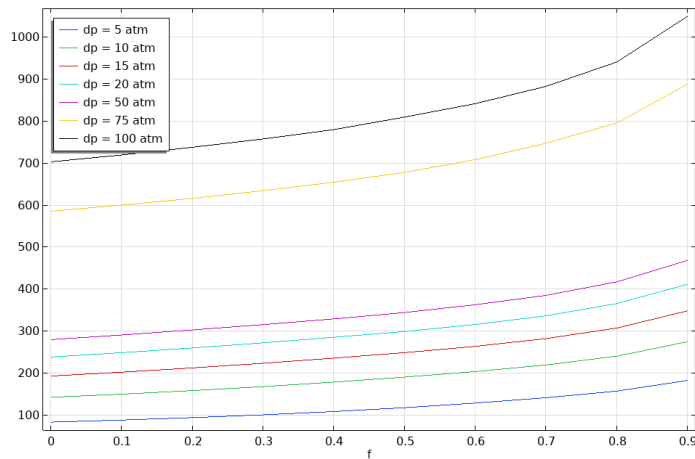


Рис. 4. Расходная характеристика при различных перепадах давления в УКП в зависимости от объемной доли поступающей «воды»

Рассмотрим случай заданного перепада давления в УКП, когда дисперсионная среда – вода, дисперсная фаза – нефть. На рис. 5 представлено распределение давлений во входном (а) и выходном (б) дроссельном пакете УКП в зависимости от объемной доли поступающей дисперсной фазы («нефти»). Видно, что с увеличением объемной доли дисперсной фазы давление уменьшается. Также сохраняется характерная ступенчатость снижения давления при истечении жидкости через дроссельные пакеты.

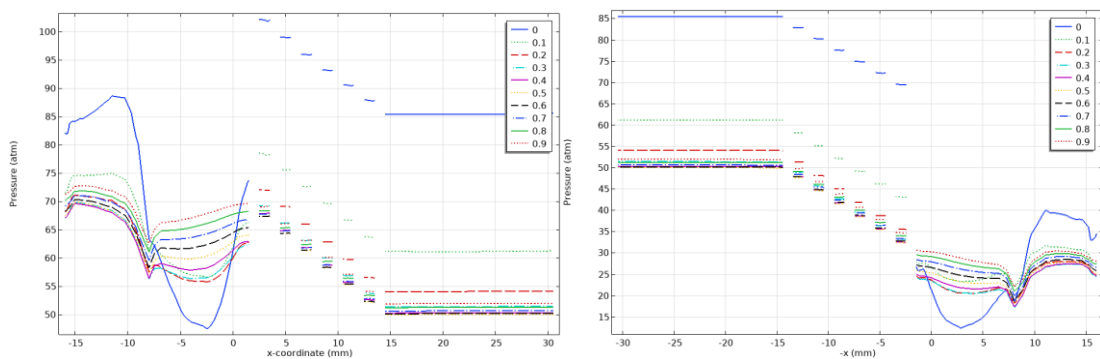


Рис. 5. Распределение давления во входном дроссельном пакете УКП в зависимости от объемной доли поступающей дисперсной фазы «нефти» («нефть в воде»), $\Delta p=100$ атм.

Немонотонная зависимость давления от доли поступающей нефти (дисперсной фазы) наблюдается для перепадов давления $\Delta p=5,10,15,20,50,75$ атм., причем точка «инверсии» с уменьшением

перепада давления смещается в сторону меньших значений объемных долей дисперсной фазы – то есть имеет место обратный характер, в отличие от притока воды – Рис. 6.

Также в работе исследовалось влияние размера дисперсных частиц, плотности жидкости и ее вязкости на распределение давления в системе. Перейдем к основным результатам разработки цифровой модели.

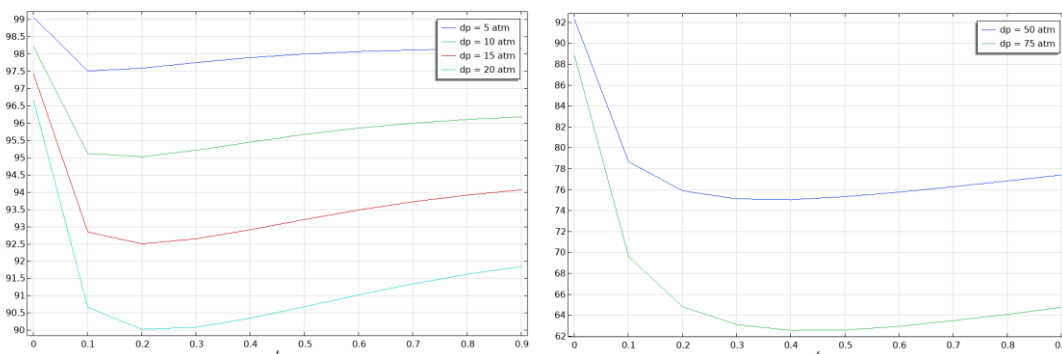


Рис. 6. Среднее давление во вторичном канале УКП в зависимости от объемной доли поступающей дисперсной фазы «нефти» («нефть в воде»), $\Delta p=10,15,20,50,75$ атм.

Оценим влияние размера дисперсных частиц на распределение давления в УКП. Так, на рис. 7–8, приведено распределение давлений в основном канале УКП, вторичном канале УКП, во входном и выходном дроссельных пакетах. Рассмотрены частицы размерами 0,01 мм, 0,1 мм и 1 мм, $\Delta p=10$ атм, $f=0,2$.

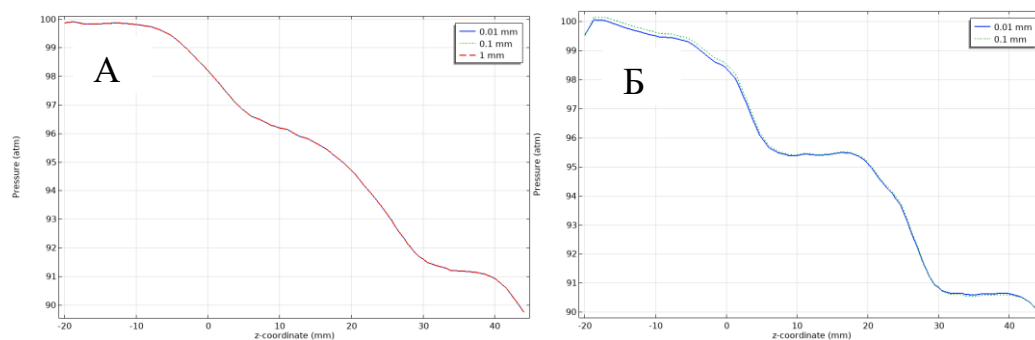


Рис. 7. Распределение давления в основном канале УКП в зависимости от размера частиц дисперсной фазы в средах «нефть в воде» – А, «вода в нефти» – Б

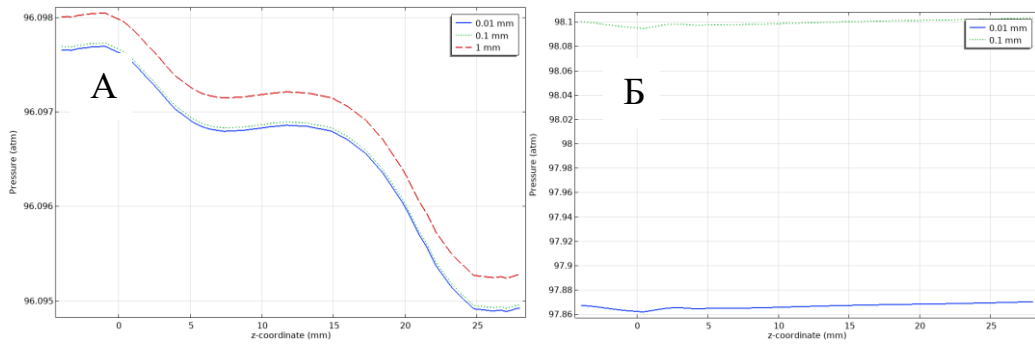


Рис. 8. Распределение давления во вторичном канале УКП в зависимости от размера частиц дисперсной фазы в среде «нефть в воде» – А, «вода в нефти» – Б

Из рисунков видно, что размеры дисперсной фазы влияют на распределение давления в УКП незначительно, что позволяет пренебречь ими.

Оценим влияние плотности нефти на распределение давления в УКП. Так на рис. 9–11, приведено распределение давлений в основном канале УКП, вторичном канале УКП, во входном и выходном дроссельных пакетах при $\Delta p=10$ атм., $f=0,2$.

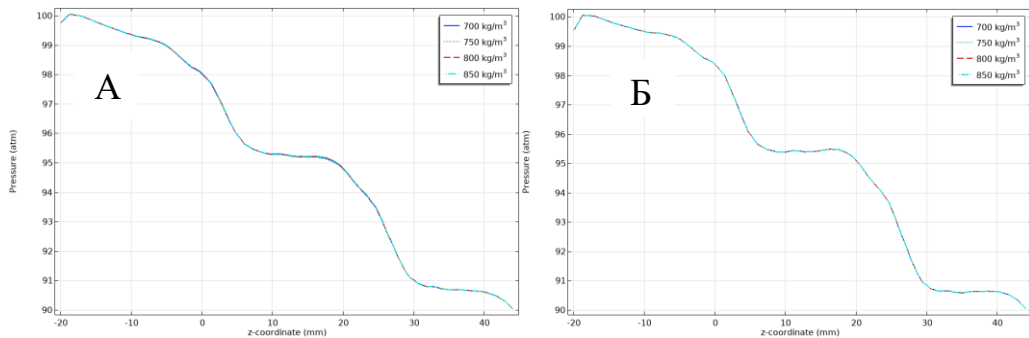


Рис. 9. Распределение давления в основном канале УКП в зависимости от плотности нефти в средах «нефть в воде» – А, «вода в нефти» – Б

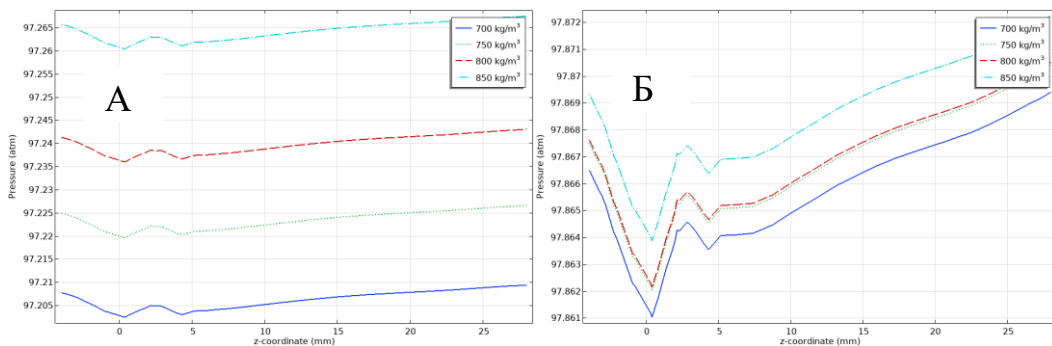


Рис. 10. Распределение давления во вторичном канале УКП в зависимости от плотности нефти в средах «нефть в воде» – А, «вода в нефти» – Б

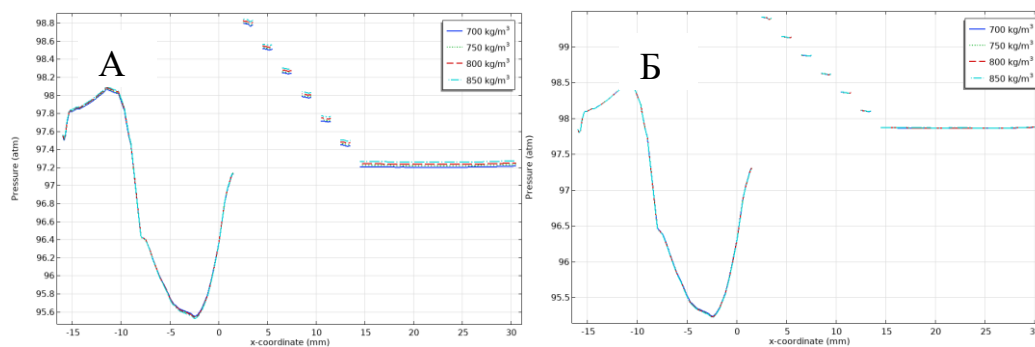


Рис. 11. Распределение давления во входном дроссельном пакете в зависимости от плотности нефти «нефть в воде» – график А, «вода в нефти» – график Б

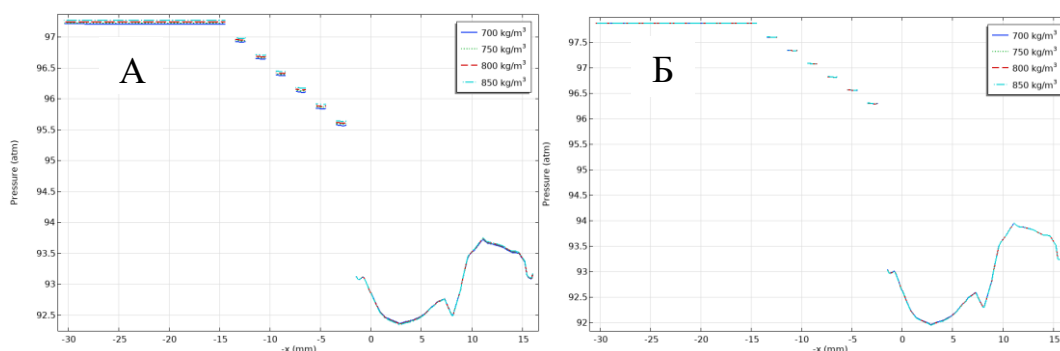


Рис. 12. Распределение давления в выходном дроссельном пакете в зависимости от плотности нефти «нефть в воде» – график А, «вода в нефти» – график Б

Из рисунков видно, что плотность нефти незначительно влияет на распределение давления во вторичном канале УКП.

В продолжение дальнейших исследований предполагается сконцентрироваться на анализе данных по параметрам расхода жидкости через устройство контроля притока, а также рассмотреть процесс фильтрации эмульсионных сред через систему жиклеров на физической модели (стенде).

Заключение

В рамках исследования разработана математическая модель турбулентного течения жидкости (дисперсной системы) в канале устройства контроля притока (УКП). Модель основана на системе уравнений диффузионного приближения течения двухфазных сред, учитывающая межфазное скольжение и турбулентный массообмен.

Создан и верифицирован цифровой двойник УКП, представляющий собой конечно-элементную реализацию указанной математической модели. Проведён параметрический анализ модели - оценена зависимость статического давления во вторичном (измерительном) канале УКП от перепада давления на устройстве и объёмной доли поступающей дисперсной фазы. Данная зависимость необходима для алгоритмов подбора и настройки контрольно-измерительной аппаратуры при исследованиях на физической модели (стенде).

Результаты моделирования подтвердили существенное влияние турбулентной диффузии и диссипации на интегральные гидродинамические характеристики течения многофазной смеси в УКП.

Установлен принципиально важный немонотонный характер зависимости давления во вторичном канале от объёмной доли дисперсной фазы. Выявлено два качественно различных режима. Для системы «нефть (среда) – вода (дисперсная фаза)» давление плавно убывает с ростом обводнённости до некоторой критической точки («точки инверсии»), после которой наблюдается его резкий рост. Для системы «вода (среда) – нефть (дисперсная фаза)» характер зависимости обратный: давление резко падает до точки инверсии, после которой следует его плавное повышение.

Показано, что положение точки инверсии является функцией перепада давления во вторичном канале: в системе «нефть в воде» с уменьшением перепада давления точка инверсии смещается в область бóльших значений объёмной доли воды. В системе «вода в нефти» с уменьшением перепада давления точка инверсии смещается в область мёньших значений объёмной доли нефти.

Дополнительно выполнен анализ влияния физических свойств дисперсной фазы - установлено, что изменение медианного размера дисперсных частиц в исследуемом диапазоне не оказывает статистически значимого влияния на распределение давления в УКП. Показано, что динамическая

вязкость нефтяной фазы является ключевым параметром, оказывающим значимое влияние на величину давления в измерительном канале. Установлена слабая корреляция между плотностью нефтяной фазы и распределением давления в УКП в рамках принятой модели.

Результаты исследования планируется применить при проектировании элементов интеллектуального заканчивания скважин, оценке ограничивающих способностей готовых устройств к компоновке и обосновании их размещения в горизонтальном участке скважин.

Список литературы

1. Daneshy, A.A. Selection and Execution Criteria for Water-Control Treatments. In Proceedings of the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, LA, USA, 15–17 February 2006.
2. Farajzadeh, R.; Zaal, C.; Van den Hoek, P.; Bruining, J. Life-cycle assessment of water injection into hydrocarbon reservoirs using the exergy concept. *J. Clean. Prod.* 2019, 235, 812–821.
3. Farajzadeh, R.; Kahrobaei, S.; Eftekhari, A.A.; Mjeni, R.A.; Boersma, D.; Bruining, J. Chemical enhanced oil recovery and the dilemma of more and cleaner energy. *Sci. Rep.* 2021, 11, 829.
4. Исмаков, Р.А. К вопросу о применении устройств контроля притока в горизонтальных и многоствольных скважинах / Р.А. Исмаков, Р.Р. Газизов, Н.А. Носов // *Бурение и нефть*. – 2022. – № 10. – С. 20-24. – EDN BMZSYJ.
5. Pinilla, A.; Asuaje, M.; Ratkovich, N. Comparison Between AICV, ICD, and Liner Completions in the Displacement Front and Production Efficiency in Heavy Oil Horizontal Wells. *Processes* 2025, 13, 1576. <https://doi.org/10.3390/pr13051576>.
6. Aadnoy, B.S.; Hareland, G. Analysis of Inflow Control Devices. In Proceedings of the SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition, Aberdeen, UK, 8–11 September 2009.
7. Halvorsen, M.; Elseth, G.; Naevdal, O.M. Increased oil production at Troll is achieved through autonomous inflow control with RCP valves. In Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, USA, 8–10 October 2012.
8. Ашин М.С., Нигматуллин Ф.Н., Муслимов Б.Ш., Трифонов А.И., Исбир Ф.А. К проблеме выбора оптимальной технологии заканчивания горизонтальных скважин с устройствами контроля притока в условиях карбонатных коллекторов // *Экспозиция Нефть Газ*. 2022. № 5. С. 30–34. DOI: 10.24412/2076-6785-2022-5-30-34.
9. Газизов, Р. Р. Стендовые испытания работы устройства контроля притока для интеллектуального заканчивания скважин / Р. Р. Газизов, Р. А. Исмаков, А. П. Чижов // *Вестник Ассоциации буровых подрядчиков*. – 2025. – № 4. – С. 24-30. – EDN MROAQA.
10. Cui, X.; Li, Y.; Li, H.; Luo, H.; Zhang, J.; Liu, Q. A Novel Automatic Inflow-Regulating Valve for Water Control in Horizontal Wells. *ACS Omega* 2020, 5, 28056–28072.

11. Fripp, M.; Zhao, L.; Least, B. The Theory of a Fluidic Diode Autonomous Inflow Control Device. In Proceedings of the SPE Middle East Intelligent Energy Conference and Exhibition, Manama, Bahrain, 28–30 October 2013.
12. Dong L., Zhang Y., Zhang Y. Analysis and experimental study on resistance-increasing behavior of composite high efficiency autonomous inflow control device // *Petroleum Science*. 2024. Vol. 21. No. 2. pp. 1290-1304. P.A.
13. Исмаков, Е.В. Денисова, С.П. Сидоров, М.А. Черникова, Исследование устройств контроля притока для оценки применения в интеллектуальной скважине // *SOCAR Proceedings Special Issue No. 2 (2021)* 201-209.
14. Pinilla, A.; Stanko, M.; Asuaje, M.; Ratkovich, N. In-Depth Understanding of ICD Completion Technology Working Principle. *Processes* 2022, 10, 1493. <https://doi.org/10.3390/pr10081493>.
15. Visosky, Jason M., Clem, Nicholas J., Coronado, Martin P., and Elmer R. Peterson. "Examining Erosion Potential of Various Inflow Control Devices to Determine Duration of Performance." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, U.S.A., November 2007. doi: <https://doi.org/10.2118/110667-MS>.
16. Mathiesen, Vidar. "The Autonomous RCP Valve - New Technology for Inflow Control In Horizontal Wells." All Days, 2011. doi:10.2118/145737-MS.
17. Исмаков, Р.А. Расчет предельно допустимых давлений методом конечно-элементного моделирования в системах интеллектуального заканчивания скважин / Р.А. Исмаков, Р.Р. Газизов, А.П. Чижов // *Экспозиция Нефть Газ*. – 2025. – № 2(112). – С. 74-77. – DOI 10.24412/2076-6785-2025-2-74-77. – EDN JVDHIM.
18. Halvorsen, Martin , Madsen, Martin, Vikøren Mo, Mathias, Isma Mohd, Ismail, and Annabel Green. "Enhanced Oil Recovery On Troll Field By Implementing Autonomous Inflow Control Device." Paper presented at the SPE Bergen One Day Seminar, Grieghallen, Bergen, Norway, April 2016. doi: <https://doi.org/10.2118/180037-MS>.
19. Ranjith, Rahul & Suhag, Anuj & Balaji, Karthik & Putra, Dike & Dhannoon, Diyar & Saracoglu, Onder & Hendroyono, Arief & Temizel, Cenk. (2017). Production Optimization Through Utilization of Smart Wells in Intelligent Fields. 10.2118/185709-MS.
20. Росляков К.С., Абдуллин А.А., Муслимов Б.Ш., Исламов Р.Р. Обоснование оптимального количества и размера проходного сечения устройств контроля притока для эффективной разработки нефтегазовых залежей // *Экспозиция Нефть Газ*. 2024. № 3. С. 30–34. DOI: 10.24412/2076-6785-2024-3-30-34.
21. Alzahabi, Ahmed & Trindade, A. & Kamel, Ahmed. (2023) Horizontal well completions using data analytics. *Results in Engineering*. 18. 101143. 10.1016/j.rineng.2023.101143.

References

1. Daneshy, A.A. Selection and Execution Criteria for Water-Control Treatments. In Proceedings of the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, LA, USA, 15–17 February 2006.
2. Farajzadeh, R.; Zaal, C.; Van den Hoek, P.; Bruining, J. Life-cycle assessment of water injection into hydrocarbon reservoirs using the exergy concept. *J. Clean. Prod.* 2019, 235, 812–821.
3. Farajzadeh, R.; Kahrobaei, S.; Eftekhari, A.A.; Mjeni, R.A.; Boersma, D.; Bruining, J. Chemical enhanced oil recovery and the dilemma of more and cleaner energy. *Sci. Rep.* 2021, 11, 829.
4. Ismakov, R.A.; Gazizov, R.R.; Nosov, N.A. On the Issue of Applying Inflow Control Devices in Horizontal and Multilateral Wells. **Burenie i Neft* [Drilling and Oil]*. 2022, No. 10, pp. 20–24. EDN BMZSYJ. (in Russian)

5. Pinilla, A.; Asuaje, M.; Ratkovich, N. Comparison Between AICV, ICD, and Liner Completions in the Displacement Front and Production Efficiency in Heavy Oil Horizontal Wells. *Processes* 2025, 13, 1576. <https://doi.org/10.3390/pr13051576>.
6. Aadnoy, B.S.; Hareland, G. Analysis of Inflow Control Devices. In Proceedings of the SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition, Aberdeen, UK, 8–11 September 2009.
7. Halvorsen, M.; Elseth, G.; Naevdal, O.M. Increased oil production at Troll is achieved through autonomous inflow control with RCP valves. In Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, USA, 8–10 October 2012.
8. Ashin, M.S.; Nigmatullin, F.N.; Muslimov, B.Sh.; Trifonov, A.I.; Isbir, F.A. On the Problem of Choosing the Optimal Completion Technology for Horizontal Wells with Inflow Control Devices in Carbonate Reservoir Conditions. **Expozitsiya Neft' Gaz** [Exposition Oil & Gas]. 2022, No. 5, pp. 30–34. DOI: 10.24412/2076-6785-2022-5-30-34. (in Russian)
9. Gazizov, R.R.; Ismakov, R.A.; Chizhov, A.P. Bench Tests of the Operation of an Inflow Control Device for Intelligent Well Completion. **Vestnik Assotsiatsii Burovykh Podryadchikov** [Bulletin of the Association of Drilling Contractors]. 2025, No. 4, pp. 24–30. EDN MROAQA. (in Russian)
10. Cui, X.; Li, Y.; Li, H.; Luo, H.; Zhang, J.; Liu, Q. A Novel Automatic Inflow-Regulating Valve for Water Control in Horizontal Wells. *ACS Omega* 2020, 5, 28056–28072.
11. Fripp, M.; Zhao, L.; Least, B. The Theory of a Fluidic Diode Autonomous Inflow Control Device. In Proceedings of the SPE Middle East Intelligent Energy Conference and Exhibition, Manama, Bahrain, 28–30 October 2013.
12. Dong L., Zhang Y., Zhang Y. Analysis and experimental study on resistance-increasing behavior of composite high efficiency autonomous inflow control device. *Petroleum Science*. 2024, Vol. 21, No. 2, pp. 1290-1304.
13. Ismakov, E.V.; Denisova, S.P.; Sidorov, S.P.; Chernikova, M.A. Investigation of Inflow Control Devices to Assess Application in an Intelligent Well. *SOCAR Proceedings*. 2021, Special Issue No. 2, pp. 201-209. (in Russian)
14. Pinilla, A.; Stanko, M.; Asuaje, M.; Ratkovich, N. In-Depth Understanding of ICD Completion Technology Working Principle. *Processes* 2022, 10, 1493. <https://doi.org/10.3390/pr10081493>.
15. Visosky, Jason M., Clem, Nicholas J., Coronado, Martin P., and Elmer R. Peterson. "Examining Erosion Potential of Various Inflow Control Devices to Determine Duration of Performance." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, U.S.A., November 2007. doi: <https://doi.org/10.2118/110667-MS>
16. Mathiesen, Vidar. "The Autonomous RCP Valve - New Technology for Inflow Control In Horizontal Wells." All Days, 2011. doi:10.2118/145737-MS.
17. Ismakov, R.A.; Gazizov, R.R.; Chizhov, A.P. Calculation of Limiting Allowable Pressures by the Finite Element Modeling Method in Intelligent Well Completion Systems. **Expozitsiya Neft' Gaz** [Exposition Oil & Gas]. 2025, No. 2(112), pp. 74–77. DOI: 10.24412/2076-6785-2025-2-74-77. EDN JVDHIM. (in Russian)
18. Halvorsen, Martin, Madsen, Martin, Vikøren Mo, Mathias, Isma Mohd, Ismail, and Annabel Green. "Enhanced Oil Recovery On Troll Field By Implementing Autonomous Inflow Control Device." Paper presented at the SPE Bergen One Day Seminar, Grieghallen, Bergen, Norway, April 2016. doi: <https://doi.org/10.2118/180037-MS>.
19. Ranjith, Rahul & Suhag, Anuj & Balaji, Karthik & Putra, Dike & Dhannoon, Diyar & Saracoglu, Onder & Hendroyono, Arief & Temizel, Cenk. (2017). Production Optimization Through Utilization of Smart Wells in Intelligent Fields. 10.2118/185709-MS.
20. Roslyakov, K.S.; Abdullin, A.A.; Muslimov, B.Sh.; Islamov, R.R. Justification of the Optimal Quantity and Size of the Flow Area of Inflow Control Devices for the Effective

- Development of Oil and Gas Deposits. *Expozitsiya Neft' Gaz* [Exposition Oil & Gas]. 2024, No. 3, pp. 30–34. DOI: 10.24412/2076-6785-2024-3-30-34. (in Russian)
21. Alzahabi, Ahmed & Trindade, A. & Kamel, Ahmed. (2023) Horizontal well completions using data analytics. Results in Engineering. 18. 101143. 10.1016/j.rineng.2023.101143.

Сведения об авторах

Газизов Ренат Рустамович, ассистент кафедры БНГС, Уфимский государственный нефтяной технический университет
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
E-mail: ga3i3ov.renat@yandex.ru

Исмаков Рустэм Адипович, д.т.н., профессор кафедры БНГС, Уфимский государственный нефтяной технический университет
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
E-mail: ismakovrustem@gmail.com

Чижов Александр Петрович, к.т.н., доцент кафедры ГиРНГМ, Уфимский государственный нефтяной технический университет
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
E-mail: 4ap@list.ru

Authors

R.R. Gazizov, Assistant of the Department of Oil and Gas Well Drilling, Ufa State Petroleum Technological University
1 Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation
E-mail: ga3i3ov.renat@yandex.ru

R.A. Ismakov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Oil and Gas Well Drilling, Ufa State Petroleum Technological University
1 Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation
E-mail: ismakovrustem@gmail.com

A.P. Chizhov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geology and Development of Oil and Gas Fields, Ufa State Petroleum Technological University
1 Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation
E-mail: 4ap@list.ru

Статья поступила в редакцию 03.02.2026
Принята к публикации 27.03.2026
Опубликована 30.03.2026