

УДК 553.982.2

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-2-93-98

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ВОДОЙ В КОЛЛЕКТОРАХ С ПРЕДЕЛЬНО НИЗКОЙ НАЧАЛЬНОЙ НАСЫЩЕННОСТЬЮ

Сергей Сергеевич Кузовлев¹, Алина Григорьевна Кротова²,
Ксения Александровна Моторова³

¹ ООО «Проектирование и анализ разработки нефтяных и газовых месторождений» (ООО «РАНГ-проект»), Тюмень, Россия; s.kuzovlev@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; krotovaag@my.msu.ru, <https://istina.msu.ru/profile/AKrotova/>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; motorova.ks@yandex.ru, <https://istina.msu.ru/profile/MotorovaKA/>

Аннотация. В статье приводится методика подхода по обоснованию коэффициентов остаточной нефтенасыщенности и вытеснения нефти водой (далее Кон и Квыт). Рекомендована к использованию функциональная зависимость, не вошедшая в руководящий документ «Правила подготовки технических проектов разработки месторождений углеводородного сырья».

Ключевые слова: коэффициент остаточной нефтенасыщенности; коэффициент вытеснения; вид функциональной зависимости; область рабочих значений для корректного решения уравнения; контроль результатов

Для цитирования: Кузовлев С.С., Кротова А.Г., Моторова К.А. Оценка коэффициента вытеснения нефти водой в коллекторах с предельно низкой начальной насыщенностью // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 2. С. 93–98.

ESTIMATION OF THE OIL DISPLACEMENT COEFFICIENT BY WATER IN RESERVOIRS WITH EXTREMELY LOW INITIAL SATURATION

Sergey S. Kuzovlev¹, Alina G. Krotova², Kseniya A. Motorova³

¹ "Designing and analysis of oil and gas fields development" LTD, Tumen, Russia; s.kuzovlev@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia; krotovaag@my.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia; motorova.ks@yandex.ru

Abstract. The article presents the methodology of the approach to substantiate the coefficients of residual oil saturation and displacement of oil by water (hereinafter Kro and Kdis). A functional dependency that is not included in the GD "Rules for the preparation of technical projects for the development of hydrocarbon deposits" is recommended for use.

Keywords: the coefficient of residual oil saturation; the displacement coefficient; the type of functional dependence; the range of operating values for the correct solution of the equation; control of the results

For citation: Kuzovlev S.S., Krotova A.G., Motorova K.A. Estimation of the oil displacement coefficient by water in reservoirs with extremely low initial saturation. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 2; 93–98. (In Rus.).

Введение. Промышленная эксплуатация месторождений углеводородного сырья разрешается в соответствии с Законом Российской Федерации от 21 февраля 1992 г. № 2395-1 «О недрах», нормативными правовыми актами и руководящими документами. Действующим регламентом являются «Правила подготовки технических проектов разработки месторождений углеводородного сырья» (Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, приказ от 20 сентября 2019 г. № 639).

Согласно «Правилам подготовки технических проектов...» обосновываются коэффициенты вытеснения для пластов. Строятся основные графики зависимостей п. 6.7.3:

- 1) остаточной нефтенасыщенности от начальной нефтенасыщенности;
- 2) коэффициента вытеснения от проницаемости;
- 3) коэффициента вытеснения от начальной нефтенасыщенности;
- 4) коэффициента вытеснения от остаточной нефтенасыщенности.

Коэффициент остаточной нефтенасыщенности — это значение нефтенасыщенности, ниже которого нефть становится неподвижной.

Коэффициент вытеснения — это подвижная нефть. Характеризует полноту вытеснения нефти из пустотного пространства пород и определяется

соотношением объема вытесненной из порового пространства нефти к ее начальному объему.

Уравнения рекомендуемых связей (пункты а, б, в, г) подбираются из условия максимального коэффициента корреляции R . Руководящим документом (РД) не предусмотрены виды графиков связей этих параметров и определение рабочих областей полученных графиков.

Предельная величина коэффициента корреляции определяется «Порядком определения показателей проницаемости и эффективной нефтенасыщенной толщины пласта по залежи углеводородного сырья» (Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, приказ от 15 мая 2014 г. № 218): при $R < 0,6$ определение значений по уравнению не производится.

Отметим, что при работе в программе «Excel» на уравнениях стандартных графиков отображается коэффициент детерминации (R^2) — это квадрат коэффициента корреляции. Поэтому коэффициент детерминации может быть гораздо ниже предельного значения. Например, при $R^2 = 0,4$, коэффициент корреляции будет $> 0,6$. Иными словами, связь имеется и можно произвести определение значений $K_{он}$ и $K_{выт}$ по уравнению, но понимаем, что индивидуальная изменчивость (дисперсия) предсказана только по 40% исходных данных.

В поисках наилучшего коэффициента корреляции R многие исследователи используют функции отличные от линейной — логарифмические, экспоненциальные и др. Однако манипулирование математическими функциями без определения пределов области корректного решения уравнений ведет к неверно обоснованным $K_{он}$ и $K_{выт}$. Это связано с обратной зависимостью параметров: $K_{выт} = 1 - (K_{он}/K_{нн})$.

Основная цель — продемонстрировать подход по выбору функциональных зависимостей параметров и определения коэффициента остаточной нефтенасыщенности, принимаемого для проектирования нефтяного месторождения.

Материалы и методы исследования. Поставленные задачи решались методами математической статистики при обработке данных результатов специальных лабораторных исследований керна на определение коэффициента вытеснения нефти водой.

Объектом исследования является пласт AC_9 , характеризующийся предельно низкой начальной нефтенасыщенностью — 0,48.

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ данных начнем с области принятия решений о наличии корреляционных связей, установленных РД (рис. 1). Выбираем наиболее показательный график — а.

Использование объемной характеристики — прием умножения осей абсциссы и ординаты на коэффициент пористости позволило значительно улучшить корреляционные связи, коэффициент

детерминации составил 0,77 (рис. 2), что гораздо надежнее, чем обоснование по зависимостям, определенным РД.

Нанесем на график утвержденные протоколами ЦКР Роснедра значения $K_{он}$ по пластам-аналогам и сопоставим с полученной функциональной зависимостью (рис. 2, а) — график имеет уравнение линейного вида $y = 0,3835 \cdot x + 0,0155$.

Отметим, что утвержденные значения ФЕС пласта AC_9 низкие — $K_p = 0,2$, $K_{нн} = 0,48$. Коэффициент начальной насыщенности находится на границе области определения функциональной зависимости по керновым исследованиям. Необходим графический контроль поведения функции $K_{выт} - K_{нн}$ при крайне низких значениях $K_{нн} - 0,4$. Для этого усложним график — по основным осям оставим привычные $K_{выт}$ и $K_{нн}$, а умножение на K_p вынесем на второстепенные оси (рис. 2, б).

По графику определим предел рабочей области значений полученной функции.

При $K_{нн} = 0,48$ расчетное значение коэффициента вытеснения удовлетворяет требованию: $K_{выт} < K_{нн}$. При предельно низких значениях $K_{нн} < 0,4$ коэффициент вытеснения чуть выше $K_{нн}$. График работает в диапазоне критически низких параметров, пределы рабочих значений выделять не требуется.

В условиях крайне низких ФЕС рассматриваемого пласта важной характеристикой является вид функциональной зависимости. *Дополнительно рассмотрим, другие стандартные виды функциональных зависимостей и сравним их поведение с линейной функцией.*

На примере выбранного ранее графика (рис. 2, а) построим дополнительные зависимости $K_{он} \cdot K_p - K_{нн} \cdot K_p$: логарифмическую, экспоненциальную, степенную, которые имеет хорошие корреляционные связи и могли быть рекомендованы к рассмотрению (рис. 3).

Контроль полученного результата проведем по примеру выше с пересчетом этой функции на значения $K_{выт}$:

линейная (зависимость параметров: $K_{он} \cdot K_p - K_{нн} \cdot K_p$) — **рекомендуется**;

логарифмическая ($K_{он} \cdot K_p - K_{нн} \cdot K_p$) — крайне не рекомендуется;

экспоненциальная ($K_{он} \cdot K_p - K_{нн} \cdot K_p$) — занижает $K_{выт}$;

степенная ($K_{он} \cdot K_p - K_{нн} \cdot K_p$) — завышает $K_{выт}$.

Полученная функция логарифмического вида не пригодна к использованию, так как имеет существенное ограничение области значений для корректного применения. Функция не работает не только при низких, но и при утвержденных значениях $K_{нн}$. Экспоненциальная зависимость занижает расчетные значения $K_{выт}$ в области крайне низких ФЕС пласта. Степенная зависимость завышает расчетные значения $K_{выт}$ в области крайне низких ФЕС.

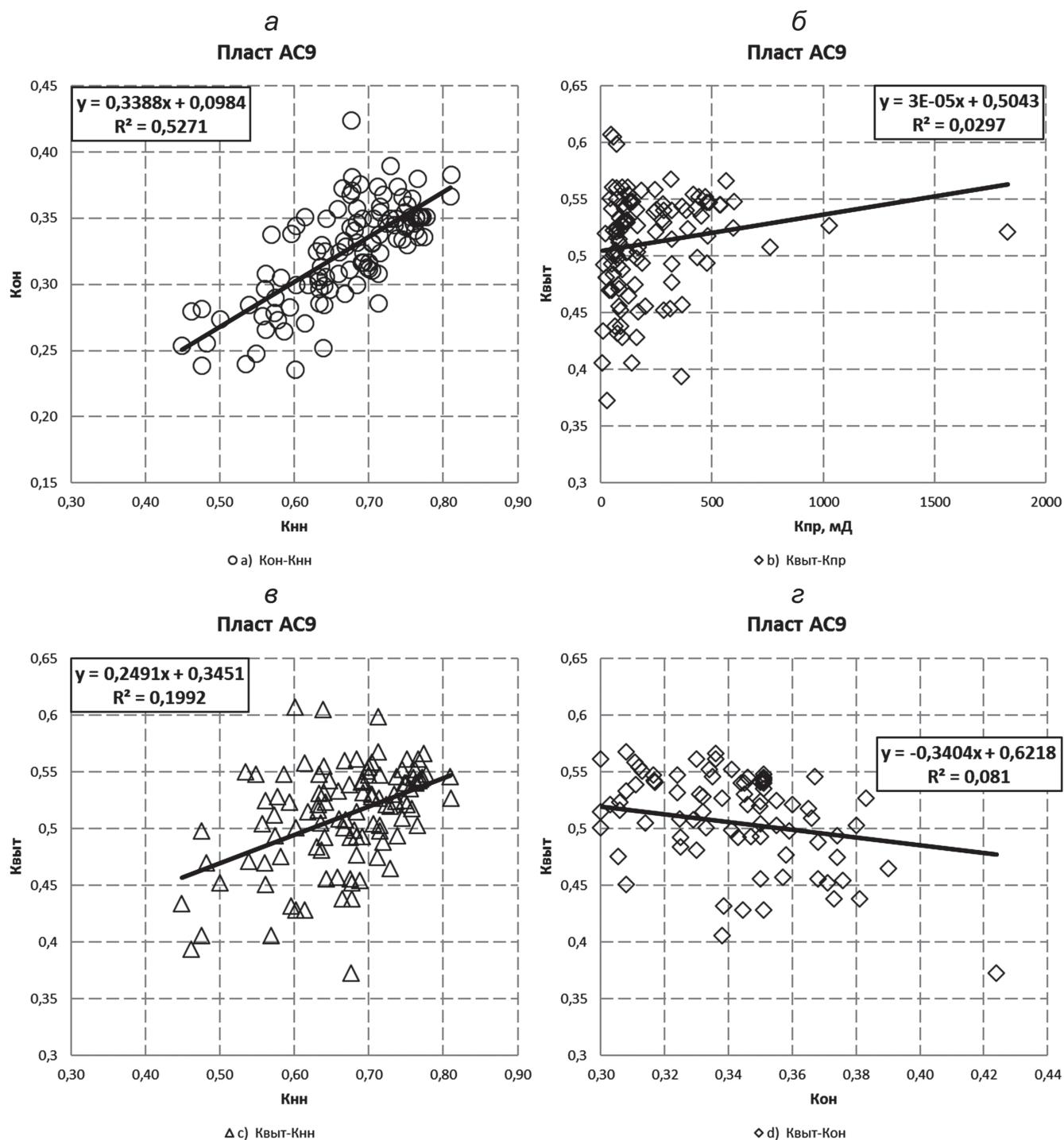


Рис. 1. Основные функциональные зависимости, установленные РД: Кон — Кнн; Квыт — Кпр; Квыт — Кнн; Квыт — Кон

Функциональная зависимость параметров (Кнн, Кп, Кон) построена по результатам 108 опытов специальных исследований керна пластов AC₉ Варягского и Лянторского месторождений. При сравнении расчетных и фактических значений Кон в границах отклонений менее $\pm 15\%$ оказались 95% исследований или 103 образца (рис. 4).

Таким образом, для пласта AC₉ параметры коэффициентов начальной насыщенности, пористости и остаточной насыщенности описываются **линейной функциональной зависимостью** с высокими коэф-

фициентами корреляции и дисперсии, без ограничения области решения уравнения.

При обосновании коэффициентов вытеснения у Экспертов ГКЗ появляется вопрос: «Зачем дополнительно к зависимости Кон – Кнн применять объемную характеристику Кон*Кп – Кнн*Кп?». Ведь таким образом искусственно завышается R^2 за счет внесения функциональной зависимости $K_p = f(K_p)$, где $R^2 = 1$ (тезисы Научно-практической конференции имени Е.Г. Коваленко: «Актуальные вопросы

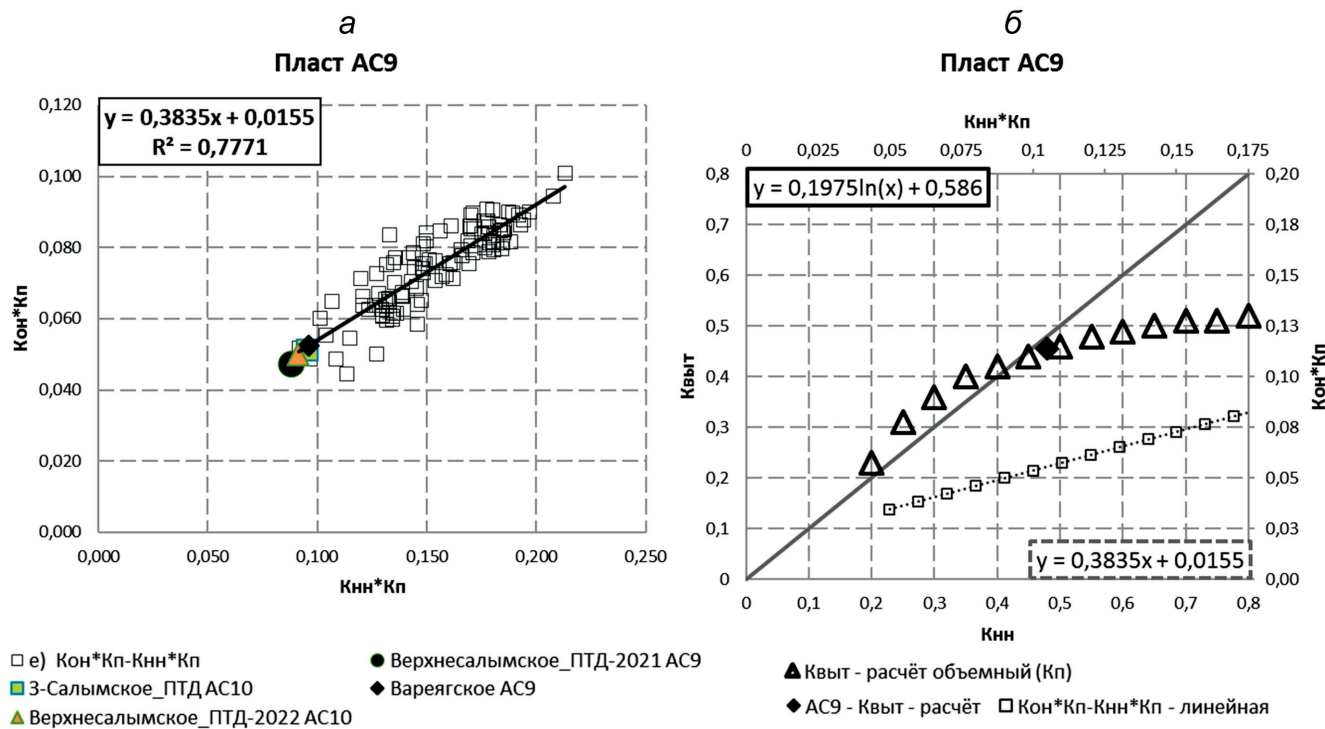


Рис. 2. Линейная корреляционная связь вида Кон*Кп – Кнн*Кп

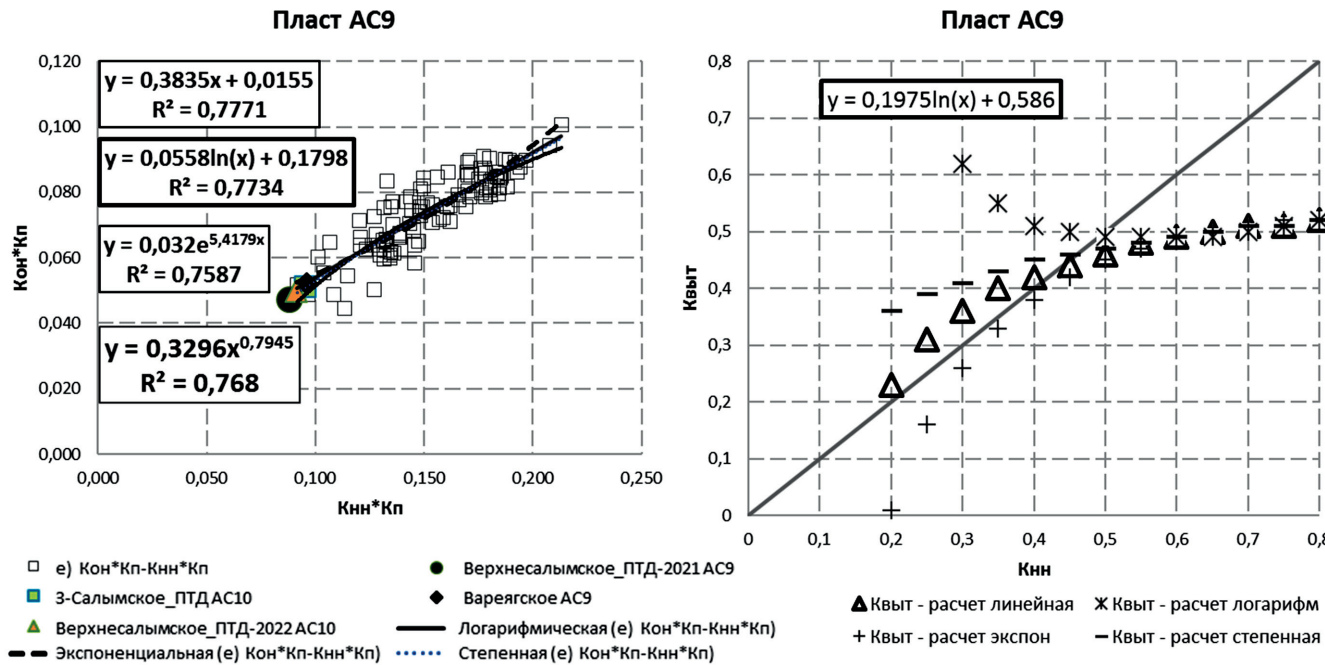


Рис. 3. Различные виды функциональных зависимостей Кон*Кп – Кнн*Кп и поведение рассчитанного Квыт в предельно низких ФЕС пласта АС₉

экспертизы геологических и извлекаемых запасов УВС», г. Москва 11–12 февраля 2021 г).

Рассмотрим более подробно подход в определении функциональной зависимости коэффициента остаточной нефтенасыщенности через параметры Кон*Кп – Кнн*Кп.

Сравним полученные результаты в определении Кон: по РД (Кон=0,3388*Кнн + 0,0984) и объемным методом (Кон*Кп=0,3835*Кнн*Кп + 0,0155) (рис. 5).

Определим через эти уравнения значения Квыт. Поведение графиков близко по своей природе. Имеет место корректировка угла наклона (в нашем случае незначительная, ±5% в пределах рабочей области крайне низких и высоких значений коэффициента начальной нефтенасыщенности).

Таким образом, при несущественном отличии графиков на рис. 5, подход в определении оценки коэффициента вытеснения нефти водой в коллекто-

Рис. 4. Сравнение расчетных и фактических значений Кон

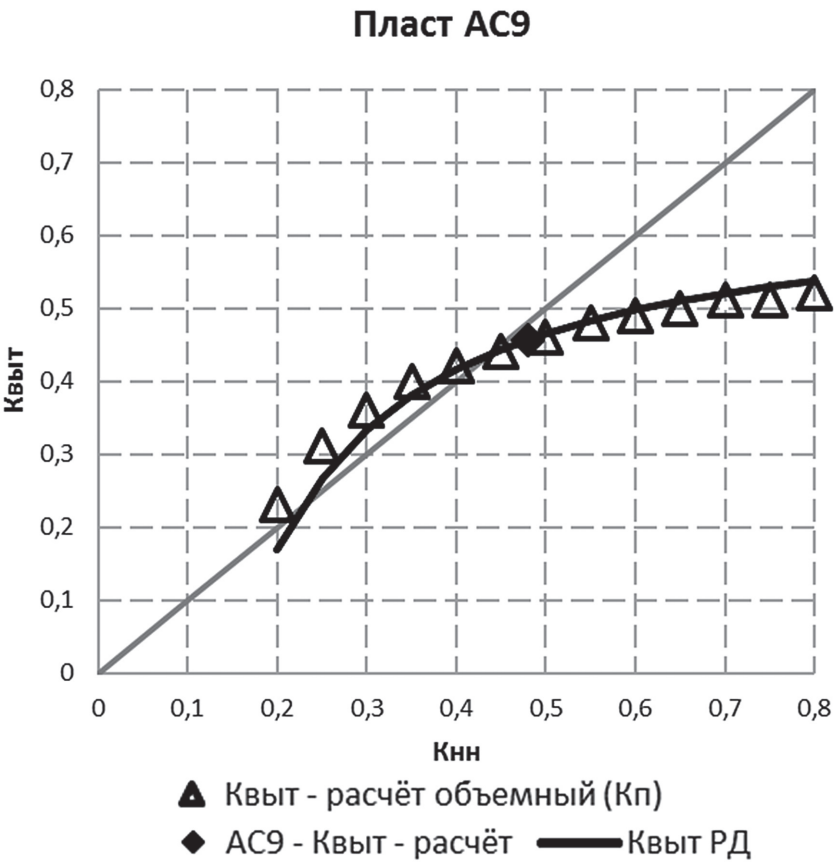
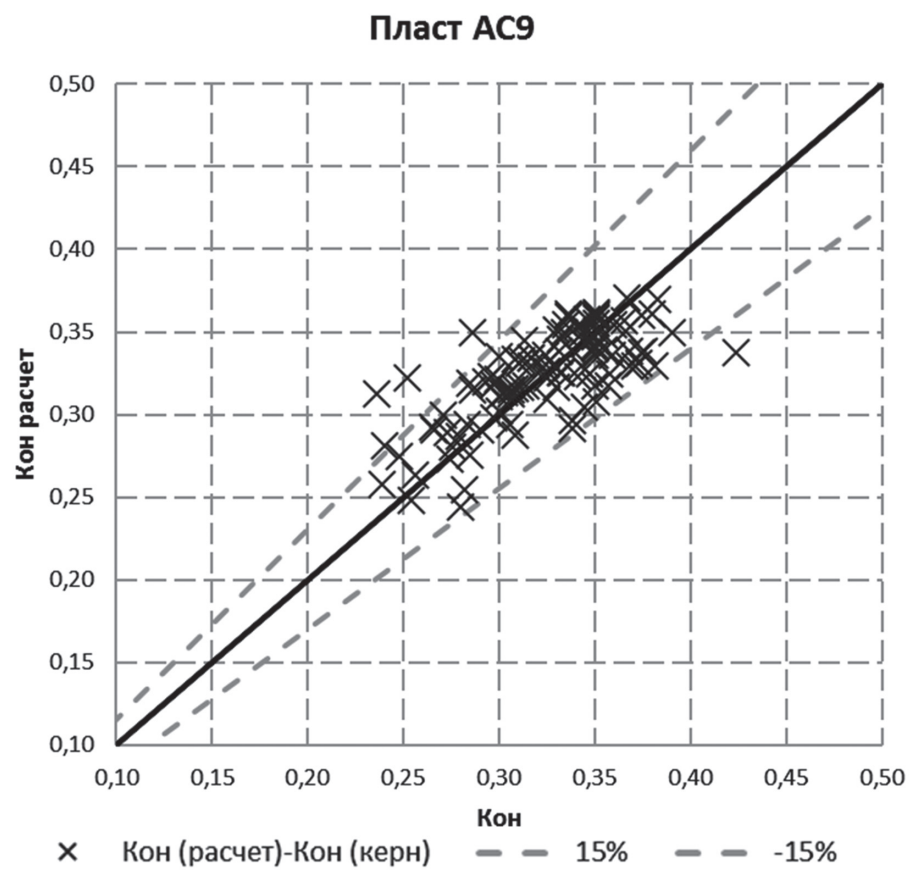


Рис. 5. Сравнение расчетных функций Квыт по РД через Кон – Кнн и объемным методом через Кон*Кп – Кнн*Кп

рах с предельно низкой начальной насыщенностью является вполне корректным и с высокой долей успешности применим для обоснований остаточной нефтенасыщенности и коэффициентов вытеснения нефти водой.

Выводы и рекомендации. На примере подхода к обоснованию остаточной нефтенасыщенности для коллекторов пласта АС₉ с низкими ФЕС были рассмотрены различные виды зависимостей, определены области корректного решения уравнений, определен вид зависимости Кон – Кнн для крайне низких значений Кнн, проведена оценка Кон по объемной функциональной зависимости, не вошедшей в «Правила подготовки технических проектов разработки месторождений углеводородного сырья».

По результатам исследования:

1. При обосновании коэффициента остаточной насыщенности, для более точной корректировки угла наклона функциональной зависимости и уве-

личения коэффициентов корреляционных связей, рекомендуется использовать дополнительно к РД зависимость вида: $Кон \cdot Кп — Кнн \cdot Кп$.

2. Коэффициент остаточной насыщенности является обратной величиной коэффициенту вытеснения, поэтому при его обосновании в коллекторах с низкими значениями начальной нефтенасыщенности необходимо пользоваться линейной зависимостью. Иначе появляется необходимость в определении рабочей области решения уравнения.

3. Контроль полученных результатов с пересчетом на коэффициент вытеснения необходимо проводить графическим методом на каждом этапе принятия решения.

4. Для пласта АС₉ по результатам 108 определений предложена функциональная зависимость линейного вида: $Кон \cdot Кп = 0,3835 \cdot Кнн \cdot Кп + 0,0155$ ($R^2 = 0,777$, $R = 0,88$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

«Актуальные вопросы экспертизы геологических и извлекаемых запасов УВС», г. Москва 11–12 февраля 2021 г. («Экспертиза обоснования коэффициентов вытеснения и остаточной нефтенасыщенности в проектных технологических документах», К.С. Харченко заместитель генерального директора по разработке месторождений нефти и газа ООО «НИПИ-Р»).

«Порядок определения показателей проницаемости и эффективной нефтенасыщенной толщины пласта по за-

лежи углеводородного сырья» (Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, приказ от 15 мая 2014 г. № 218).

«Правила подготовки технических проектов разработки месторождений углеводородного сырья» (Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, приказ от 20 сентября 2019 г. № 639).

Статья поступила в редакцию 27.01.2023,
одобрена после рецензирования 22.03.2023,
принята к публикации 22.05.2023