Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2023, Том 15, № 4 / 2023, Vol. 15, Iss. 4 https://esj.today/issue-4-2023.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/34NZVN423.pdf

2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Петухов, А. В. Дополнение к закону Арпса для оценки извлекаемых запасов нефти в традиционных и нетрадиционных коллекторах / А. В. Петухов, П. В. Рощин // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 4. — URL: https://esj.today/PDF/34NZVN423.pdf

For citation:
Petuhov A.V., Roshchin P.V. Addendum to Arps' law for estimating recoverable oil reserves in conventional and unconventional reservoirs. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(4): 34NZVN423. Available at: https://esj.today/PDF/34NZVN423.pdf. (In Russ., abstract in Eng.)

Петухов Александр Витальевич
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия
Профессор
Доктор геолого-минералогических наук
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=102470

Рощин Павел Валерьевич
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара, Россия
Доцент
Кандидат технических наук
E-mail: pv.roschin@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=699878

Дополнение к закону Арпса для оценки извлекаемых запасов нефти в традиционных и нетрадиционных коллекторах

Аннотация. В работе представлено описание методик расчета спада дебита добывающих скважин на нефтяных месторождениях. К ним относятся степенная экспоненциальная модель Илка, растянутая экспоненциальная модель Валко, логистическая модель роста Кларка, модель Дуонга и модель масштабированного снижения. Все эти кривые, за исключением модели масштабированного спада, являются чисто эмпирическими и апостериори обоснованными с высокой степенью соответствия и согласования с промысловыми данными. Для того чтобы анализировать кривые падения добычи необходимы только промысловые данные за достаточный период, чтобы зафиксировать особенности поведения скважин. Недостаток метода заключается в том, что промысловые данные могут также отражать и другие факторы, не связанные с особенностями геологического строения и физическими возможностями скважин, такие как недостаточные инвестиции, политика и квоты по добыче. На примере пермокарбоновой залежи Усинского месторождения по накопленной добыче нефти описаны результаты эксплуатации трещинно-карстового и матричного типа коллекторов. Для моделирования процесса разработки и сравнения различных сценариев эксплуатации залежей нефти и газа в традиционных и нетрадиционных коллекторах, содержащих трудноизвлекаемые запасы, возможно использовать полученные уточнения закона Арпса.

Ключевые слова: трудноизвлекаемые запасы; нетрадиционные коллектора; геология; добыча нефти; математическая модель; закон Арпса; Усинское месторождение

В настоящее время в мире все большее количество месторождений переходит на поздние стадии разработки, с неуклонно уменьшающимися дебитами добывающих скважин, в связи с этим значительное внимание уделяется вводу в разработку низкопроницаемых коллекторов с трудноизвлекаемыми запасами [1; 2].

Характерные объемы суммарной добычи углеводородов и конечной нефтегазоотдачи могут быть рассчитаны с помощью анализа кривой падения дебита. Эта методология широко используется на нефтяных и газовых скважинах традиционных коллекторов уже несколько десятилетий для описания и прогнозирования темпов снижения добычи и конечных извлекаемых ресурсов (EUR). Концепции и основы анализа кривой спада добычи на основе математического подхода детально описываются на западе в статьях Хеоока [3–5], а также у многих других авторов, имена которых указаны в опубликованных работах [6; 7]. Преимущество такого подхода заключается в том, что для расчетов требуются менее подробные данные. Простота использования также является одним из важных качеств анализа кривой спада добычи. Однако, следует отметить, что методология не столь надежна в долгосрочных прогнозах, в отличие от детального геологического моделирования и традиционно применяемого в отечественной практике объемного метода подсчета извлекаемых запасов нефти и газа, которые дают более точные цифры.

Экспоненциальные и гиперболические кривые, первоначально предложенные Арпсом еще в 1945 году [8], широко используются для расчетов в обычных нефтяных скважинах и скважинах, работающих на сланцевых месторождениях. Другие методики, такие как предложенные гораздо позже гиперболические кривые, описывающие непостоянные скорости спада, для горизонтальных скважин и скважин с многостадийным гидроразрывом пласта также применяются различными авторами. К ним относятся степенная экспоненциальная модель Илка [9], растянутая экспоненциальная модель Валко [10], логистическая модель роста Кларка [11], модель Дуонга [12] и модель масштабированного снижения [13]. Все эти кривые, за исключением модели масштабированного спада, являются чисто эмпирическими и апостериори обоснованными с высокой степенью соответствия и согласования с промысловыми данными. Необходимо также добавить, что в идеале, в любой модели должны быть и желательны выводы, основанные на происходящих при этом физических и геологических процессах, что явно не достает всем описанным выше подходам.

Метод кривой падающей добычи основан на допущении, что направление изменения добычи за прошедший период времени с воздействием факторов, непосредственно влияющих на него, будет иметь место и в будущем, и поэтому может быть экстраполировано и описано математическим выражением.

Анализ кривых падающей добычи основан на эмпирической зависимости дебита скважин от времени и может быть описан формулой, предложенной Арпсом:

$$Q_t = \frac{Q_i}{(1+bD_it)^{\frac{1}{b}}},$$

где Q_t — дебит нефти к моменту времени t, м^3/единица времени; Q_i — начальный дебит нефти, м^3/единица времени; t — время, единица времени; D_i — номинальный темп падения добычи, 1/единица времени; b — постоянная Арпса для кривой падающей добычи.

Арпс в своих исследованиях, проведенных на различных месторождениях в США, установил три основных типа падения добычи:

- экспоненциальное падение;
- гармоническое падение;
- гиперболическое падение.

34NZVN423
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Каждая из этих видов кривых падения добычи может быть описана одним из уравнений гиперболического семейства, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

Уравнения зависимости падения добычи от времени, предложенные Арпсом

Тип падения	Зависимость «дебит-время»	b
Экспоненциальное	$Q_t = Q_i \exp(-D_i t)$	b = 0
Гиперболическое	$Q_t = \frac{Q_i}{(1 + bD_i t)^{\frac{1}{b}}}$	0 < b < 1
Гармоническое	$Q_t = \frac{Q_i}{(1 + D_i t)}$	b = 1

На рисунке 1 эти три типа кривых падения добычи изображены графически.

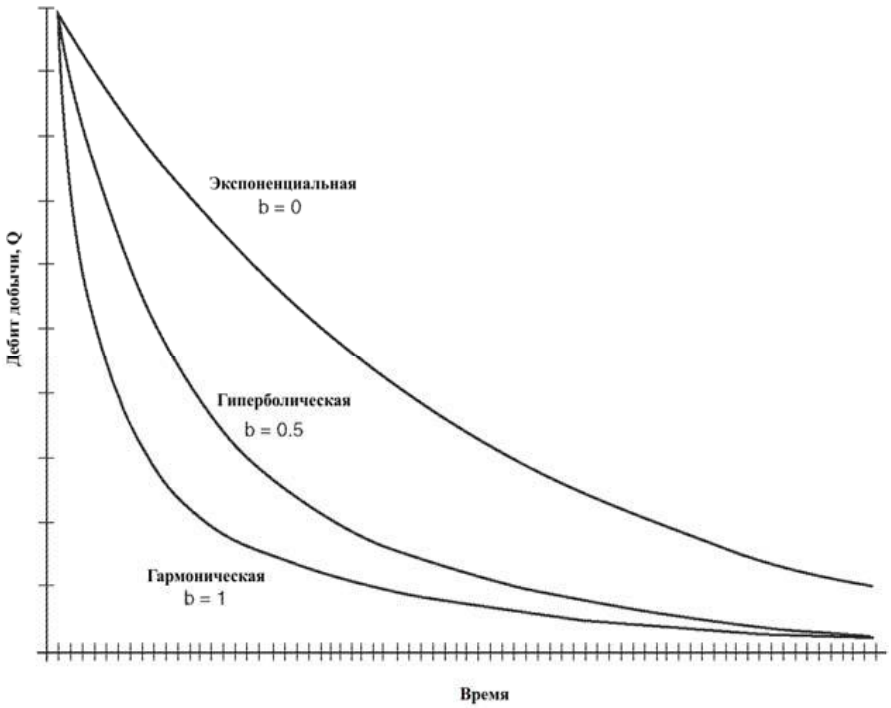

Рисунок 1. *Кривые падения добычи в соответствии с законом Арпса*

Для того чтобы анализировать кривые падения добычи необходимы только промысловые данные за достаточный период, чтобы зафиксировать особенности поведения скважин. Недостаток метода заключается в том, что промысловые данные могут также отражать и другие факторы, не связанные с особенностями геологического строения и физическими возможностями скважин, такие как недостаточные инвестиции, политика и квоты по добыче. Все это необходимо учитывать и нужно быть осторожным при экстраполяции промысловых тенденций на будущее [3; 5].

Проведенные А.В. Петуховым исследования на многих месторождениях в России и за рубежом показывают, что все породы коллекторы как традиционные (песчаники, известняки, доломиты и др.), так и нетрадиционные (сланцы, породы фундамента, угольные пласты и др.) трещиноваты, и в их пределах всегда существуют локальные участки, занимающие не более 20 % площади, которые дают более половины добычи углеводородов [2; 14–17].

34NZVN423
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Например, статистическое распределение скважин по добыче угольного метана в бассейне Сан-Хуан (США) показывает, что примерно 22,2 % (600) добывающих скважин дали 75 % (12,6 млрд м^3) угольного метана 77,8 % (2 100) добывающих скважин дали 25 % (4,2 млрд м^3) угольного метана.

Статистическое распределение около 50 000 нефтяных скважин, работающих в самом крупном добывающем регионе России — ХМАО (Западная Сибирь) показывает, что 19,86 % (9 524) работающих скважин дают 62,51 % (9,202 млн т) добываемой в ХМАО в месяц нефти 80,13 % (38 433) работающих скважин дают всего 37,49 % (5,519 млн т) добываемой в ХМАО в месяц нефти.

Такое распределение скважин характеризуется степенным поведением сложных систем, известным в науке как закон Парето. Современная статистическая теория эволюции сложных систем показывает, что иерархическая соподчиненность разномасштабных трещин, развитых в угольных пластах и нефтегазовых коллекторах, образующая сложную иерархическую самоподобную фрактальную структуру, геометрическим прообразом которой является дерево Кэйли, приводит к деформации статистической системы и характеризуется распределением Парето:

$$P_i = C \cdot \varepsilon_i^{-\tau}$$

с положительными константами C и τ.

Поведение сложных систем, описываемых степенным законом Парето, называемым упрощенно «20 на 80», характеризует распределение таких величин как богатство различных слоев населения в разных странах, интенсивность землетрясений, количество разномасштабных трещин, образующихся в процессе деформации горных пород, катастрофы финансовых бирж и т. д. [2; 14; 15].

Практика показывает, что иногда на отдельных участках и скважинах наблюдается отклонение от закона Арпса. Можно видеть, что в некоторых случаях возможно наблюдать четвертый тип линейного распределения скважин и снижения суточной и накопленной добычи. Это можно объяснить классификацией нефтегазовых коллекторов другого американского исследователя Рональда Нельсона. В его классификации этот четвертый тип коллекторов обозначен буквой М (рис. 2).

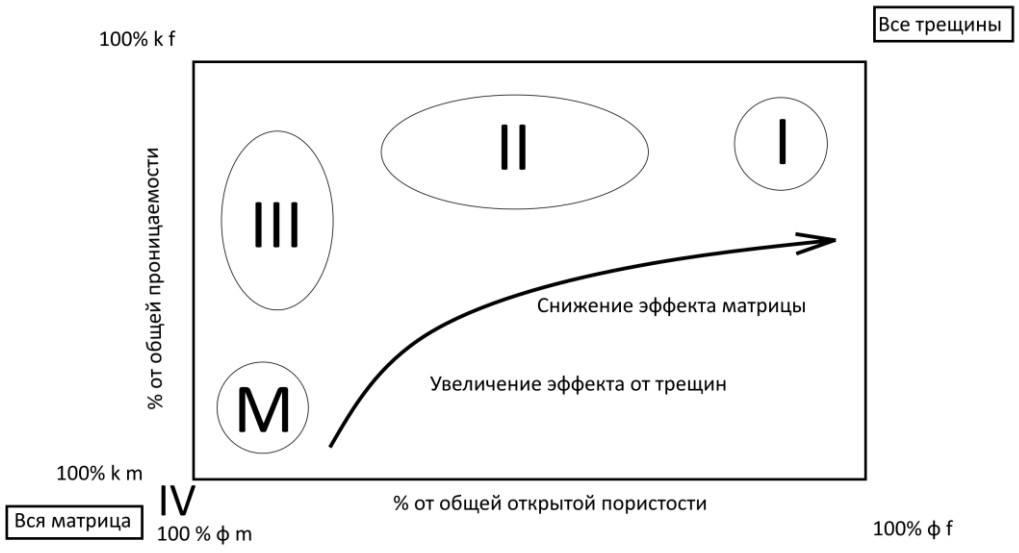

Рисунок 2. *Классификация трещинных коллекторов по Р. Нельсону*

34NZVN423
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

При встрече А.В. Петухова с Р. Нельсоном в 2016 году в Техасе он рассказал, что на его личном опыте скважины с линейным распределением наблюдались в карбонатных коллекторах карстового типа, где имеются крупные пещеристые полости. Такие коллекторы широко развиты в Техасе и в соседней с ним Мексике и отличаются очень высокими дебитами и суммарной добычей.

Впоследствии это также подтвердилось на примере Усинского месторождения (Российская Федерация), где в массивном карбонатном резервуаре, вмещающем самую большую на Европейском Севере России залежь тяжелой нефти, широко развит карст. Карст обеспечивает уникальные фильтрационно-емкостные свойства карбонатных коллекторов этого месторождения и значительную продуктивность скважин. На рисунке ниже можно видеть, что в пределах опытных участков E_1 и E_2, на которых уже с начала разработки месторождения столкнулись с карстовыми коллекторами, наблюдается линейное распределение скважин по накопленной добыче нефти. В то же время все остальные скважины пермокарбоновой залежи по величине накопленной добычи распределяются по степенной функции (рис. 3).

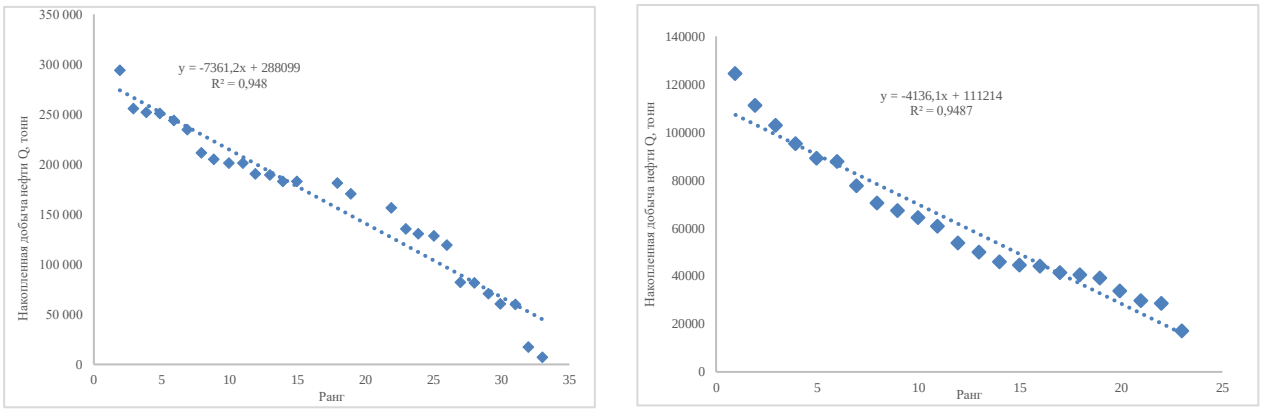

Рисунок 3. *Линейное распределение скважин пермокарбоновой залежи Усинского месторождения по накопленной добыче на участке E_1 слева и на участке E_2 справа*

Таким образом, сравнивая распределение скважин по накопленной добыче нефти в порово-трещинных коллекторах (рис. 4) и в трещиноватых карстовых коллекторах (рис. 5), возможно заполнить заштрихованный серым цветом пробел (рис. 6) и определить объем крупных каверн и пещеристых полостей, заполненных нефтью (рис. 4–6).

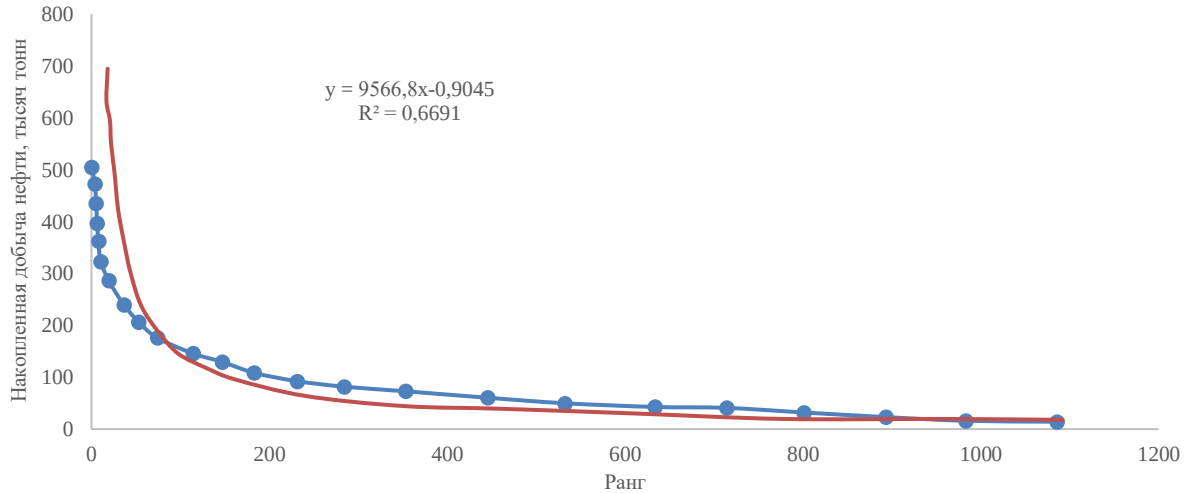

Рисунок 4. *Определение объема крупных карстовых пустот в карбонатных коллекторах путем сравнения и наложения распределения скважин двух типов коллекторов: порово-трещинного и трещинно-карстового*

34NZVN423
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Расчеты показывают, что этот объем может составлять до 38 процентов от объема карстующихся пород. Также очень важно отметить, что в порово-трещинных и трещиноватых коллекторах имеется степенное распределение скважин как по суточной добыче, так и по накопленной добыче нефти (средний график), а в областях развития карста имеется линейное распределение скважин по суточной добыче и накопленной добыче нефти (правый график). Эта особенность может применяться для выявления трещинно-карстовых участков в карбонатных коллекторах путем обработки статистических данных о суточной и совокупной добыче нефти в скважинах, пробуренных на различных месторождениях.

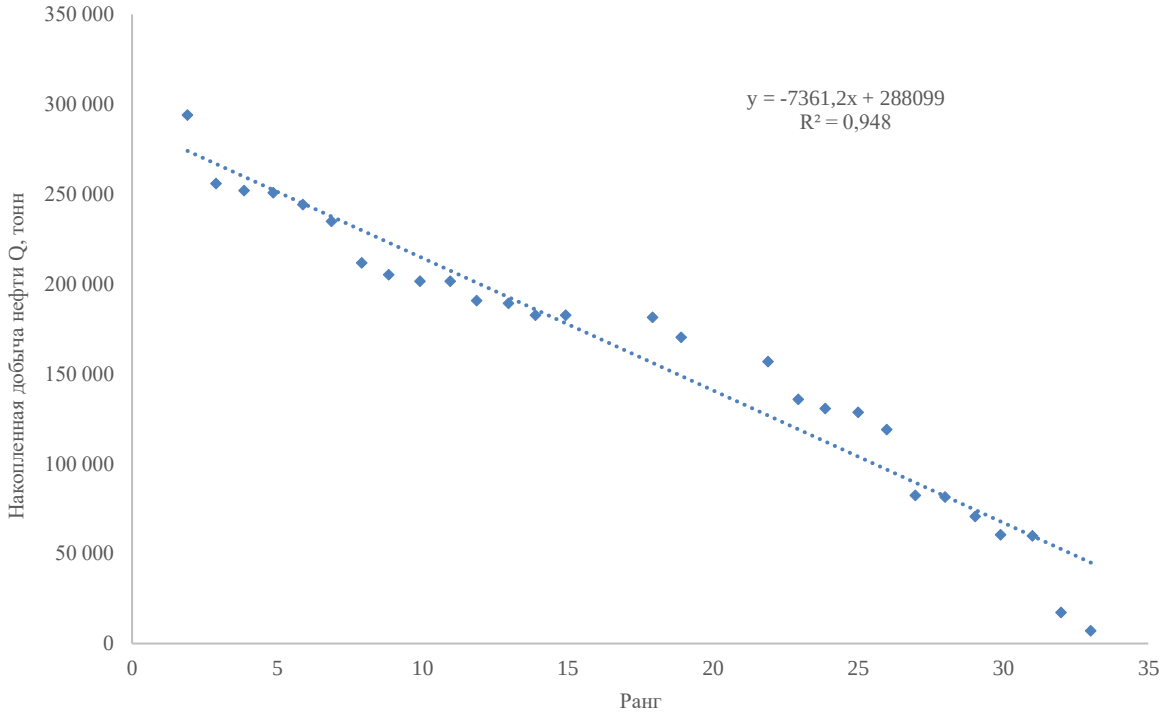

Рисунок 5. *Определение объема крупных карстовых пустот в карбонатных коллекторах путем сравнения и наложения распределения скважин двух типов коллекторов: порово-трещинного и трещинно-карстового*

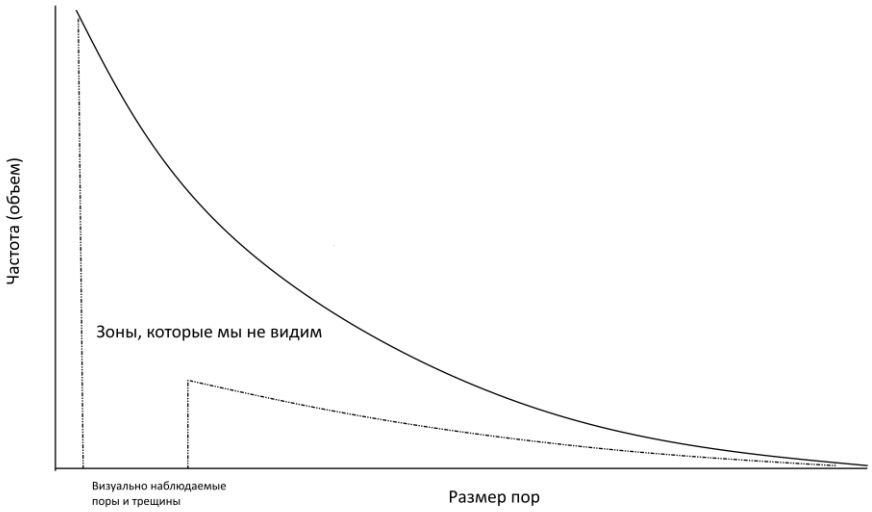

Рисунок 6. *Определение объема крупных карстовых пустот в карбонатных коллекторах путем сравнения и наложения распределения скважин двух типов коллекторов: порово-трещинного и трещинно-карстового*

34NZVN423
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Выявленные закономерности позволили уточнить и дополнить закон Арпса четвертой линейной зависимостью (предельные значение) при b = -1. Четыре зависимости теперь хорошо вписываются в классификацию коллекторов Р. Нельсона. При этом линейной зависимости в уравнении Арпса, соответствует тип коллектора М в классификации Р. Нельсона, экспоненциальной — III тип коллектора, гиперболической — II тип коллектора, а гармонической — I тип коллектора (рис. 7). Важно также отметить, что как подчеркивает Р. Нельсон, роль трещиноватости от М типа коллектора к I типу увеличивается, а роль пор — уменьшается.

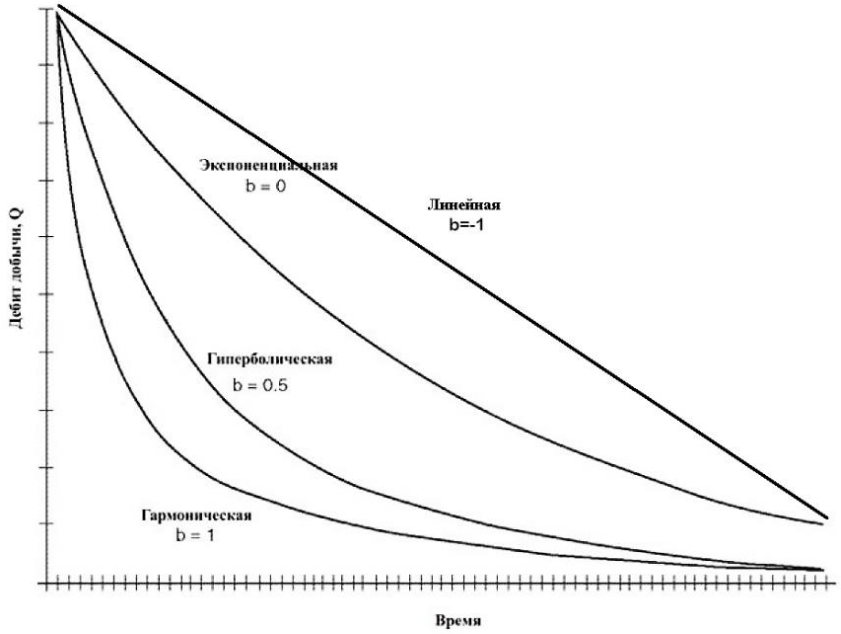

Рисунок 7. *Кривые падения добычи в скважинах в соответствии с уточненным законом Арпса*

В таблице 2 представлены функции зависимостей «дебит-время» согласно уточненному и дополненному закону Арпса.

Таблица 2

Уравнения зависимости падения добычи от времени в соответствии с уточненным и дополненным законом Арпса

Тип падения	Зависимость «дебит — время»	b
Экспоненциальное	$q(t) = q_i e^{-D_i t}$	b = 0
Гиперболическое	$q(t) = \frac{q_i}{(1 + bD_i t)^{1/b}}$	0 < b < 1
Гармоническое	$q(t) = \frac{q_i}{1 + D_i t}$	b = 1
Линейное	$q(t) = q_i(1 + D_i t)$	b = -1

Выводы

1. Опыт разработки месторождений нефти и газа в различных регионах мира показывает, что все пластовые образования, включая как традиционные (песчаники, известняки, доломиты и др.), так и нетрадиционные (сланцы и плотные карбонаты, породы фундамента, угольные пласты и др.), являются трещиноватыми и всегда имеют локальные

34NZVN423
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

участки, занимающие не более 20 % площади и дающие более половины объема добычи углеводородов. Эти особенности можно объяснить степенными функциями падения дебита скважин и их распределения по суточной и суммарной добыче, а также законами Арпса и Парето.

2. В соответствии с существующими понятиями и классификацией Р. Нельсона при разработке залежей нефти и газа можно выделить четыре основных типа коллекторов: трещинные (I), порово-трещинные (II), трещинно-поровые (III) и чисто поровые (М).

3. Исходя из полученных уточнений закона Арпса: трещинным коллекторам соответствует гармоническое падение дебита (b = 1), порово-трещинным — гиперболическое (0 < b < 1), трещинно-поровым — экспоненциальное (b = 0) и поровым коллекторам — линейное (b = -1). Линейное распределение в природе встречается довольно редко, так как обычно все продуктивные породы литифицированы, они являются достаточно плотными, хрупкими и подвержены растрескиванию под действием изменяющихся напряжений в земной коре. К такому типу коллекторов можно отнести несцементированные хорошо отсортированные крупнозернистые пески и конгломераты, что на практике можно увидеть не часто (битуминозные пески и др.). Также к такому типу коллекторов можно отнести карстовые коллекторы с крупными пещеристыми полостями, которые значительно чаще встречаются в природе и широко описаны в литературе в разных нефтегазоносных бассейнах.

4. Для моделирования процесса разработки и сравнения различных сценариев эксплуатации залежей нефти и газа в традиционных и нетрадиционных коллекторах, содержащих трудноизвлекаемые запасы, необходимо использовать полученные уточнения закона Арпса при проведении технико-экономических расчетов и расчетов дебитов скважин и суммарной накопленной добычи на различных месторождениях и отдельных участках залежей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kozhin V.N., Nikitin A.V., Kireev I.I., Roshchin P.V., Pchela K.V. Identification of technological indicators' correlation dependences of projects for field development with low-permeability reservoirs. Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 4. С. 9.
2. Petukhov A.V. Key Factors for Hard-to-Recover Hydrocarbon Resources Development on Land and the Arctic Shelf: Smart Technologies vs. Smart Specialists. — 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 539 012157 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/539/1/012157.
3. Höök M. et al. Decline and depletion rates of oil production: a comprehensive investigation // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2014. — Т. 372. — № 2006. — С. 20120448.
4. Höök M., Hirsch R., Aleklett K. Giant oil field decline rates and their influence on world oil production // Energy policy. — 2009. — Т. 37. — № 6. — С. 2262–2272.
5. Höök M. Depletion rate analysis of fields and regions: A methodological foundation // Fuel. — 2014. — Т. 121. — С. 95–108.
6. Литвин А.Т., Никитин А.В., Малышев В.Б. Применение метода аналогии в концептуальном проектировании разработки месторождений с трещинно-поровыми коллекторами. EurasiaScience. сборник статей VII международной научно-практической конференции. Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». 2017. С. 211–217.

34NZVN423
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

7. Литвин А.Т., Никитин А.В., Кочетова Т.Н. Современные представления о математическом описании фильтрации жидкостей в трещиноватых коллекторах. EurasiaScience. сборник статей VII международной научно-практической конференции. Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». 2017. С. 158–163.

8. Arps, J.J. (1945). "Analysis of Decline Curves" Paid subscription required. Transactions of the AIME. Society of Petroleum Engineers. 160 (01).

9. Ilk D. et al. Exponential vs. Hyperbolic Decline in Tight Gas Sands — Understanding the Origin and Implications for Reserve Estimates Using Arps' Decline Curves // SPE Annual Technical Conference and Exhibition? — SPE, 2008. — С. SPE-116731-MS.

10. Valkó P.P. Assigning value to stimulation in the Barnett Shale: a simultaneous analysis of 7000 plus production hystories and well completion records // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. — SPE, 2009. — С. SPE-119369-MS.

11. Clark A.J., Lake L.W., Patzek T.W. Production forecasting with logistic growth models // SPE annual technical conference and exhibition. — OnePetro, 2011. URL: https://blasingame.engr.tamu.edu/z_zCourse_Archive/P648_19A/P648_19A_Lectures_(working_lectures)/20190227_P648_19A_Lec_17_SPE_144790_[PDF].pdf.

12. Duong A.N. Rate-decline analysis for fracture-dominated shale reservoirs: part 2 // SPE/CSUR Unconventional Resources Conference–Canada. — OnePetro, 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/254552649_Rate-Decline_Analysis_For_Fracture-Dominated_Shale_Reservoirs_Part_2.

13. Patzek T.W., Saputra W., Kirati W. A Simple Physics-Based Model Predicts Oil Production from Thousands of Horizontal Wells in Shales // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. — OnePetro, 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/320475939_A_Simple_Physics-Based_Model_Predicts_Oil_Production_from_Thousands_of_Horizontal_Wells_in_Shales.

14. Petukhov A.V. «The Concept of Smart Hydrocarbons and Smart Reservoirs in the Development of Oil and Gas Fields in Karst-Fractured Carbonate Reservoirs». — Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 9–12 November, 2020, Abu Dhabi, UAE. OnePetro, SPE-203200-MS. https://doi.org/10.2118/203200-MS.

15. Petukhov A.V. «The Role of Hypogenic Karst in Formation of Carbonate Reservoirs and Development of Oil Deposits». — AAPG Middle East Region GTW, Regional Variations in Charge Systems and their Impact on Petroleum Fluid Properties in Exploration, Dubai, UAE, February 11–13, AAPG Online Journal for E&P Geoscientists — Datapages © 2019. DOI: 10.1306/42361Petukhov2019.

16. Петухов А.В. Степенной закон и принцип самоподобия при изучении трещиноватых нефтегазоносных коллекторов и гидродинамическом моделировании процесса разработки / А.В. Петухов, И.В. Шелепов, А.А. Петухов, А.И. Куклин // Нефтегазовая геология. Теория и практика. — 2012. — Т. 7. — № 2. — URL: http://www.ngtp.ru/rub/3/33_2012.pdf.

17. Петухов А.В. Разработка математической модели сложнопостроенных коллекторов, содержащих нетрадиционные ресурсы нефти и газа / А.В. Петухов, И.В. Шелепов, А.А. Петухов, А.И. Куклин // Газовая промышленность. — 2012. — № 676. — С. 64–70.

Petuhov Alexander Vitalevich
Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=102470

Roshchin Pavel Valerevich
Samara State Technical University, Samara, Russia
E-mail: pv.roschin@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=699878

Addendum to Arps' law for estimating recoverable oil reserves in conventional and unconventional reservoirs

Abstract. The paper presents a description of the methods for calculating the decline in production wells in oil fields. These include Ilk's power-law exponential model, Valko's stretched exponential model, Clarke's logistic growth model, Duong's model, and scaled decline model. All these curves, with the exception of the scaled decline model, are purely empirical and a posteriori validated with a high degree of agreement and agreement with field data. To analyze production decline curves, only field data is needed for a sufficient period to capture the features of well behavior. The disadvantage of the method is that field data may also reflect other factors unrelated to the geological structure and physical capabilities of the wells, such as insufficient investment, policies, and production quotas. Based on the example of the Permian-Carboniferous deposit of the Usinskoye field, the results of exploitation of fractured-karst and matrix type reservoirs are described based on the cumulative oil production. To model the development process and compare various scenarios for the exploitation of oil and gas deposits in traditional and unconventional reservoirs containing hard-to-recover reserves, it is possible to use the obtained refinements of the Arps law.

Keywords: hard-to-recover reserves; unconventional reservoirs; geology; oil production; mathematical model; Arps' law; Usinskoye field

34NZVN423
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com