

УДК 691.542

DOI: 10.46698/VNC.2023.58.47.009

Оригинальная статья

Оценка гидродинамического совершенства системы скважина-пласт на этапе вскрытия продуктивного пласта

Э.Р. Гасумов¹, Р.А. Гасумов²

¹Азербайджанский технический университет, Азербайджан, AZ1010,
г. Баку, пр. Азадлыг, 20;

²Северо-Кавказский Федеральный университет, Россия, 355000,
г. Ставрополь, ул. Ленина, 419, e-mail: R.Gasumov@yandex.ru

Статья поступила: 21.06.2023, доработана: 29.11.2023, принята к публикации: 05.12.2023

Резюме: Актуальность работы. В статье рассмотрены вопросы улучшения качества вводимых в эксплуатацию скважин, обеспечивающие гидродинамическое совершенство системы «скважина-пласт». Качество выполнения каждой операции предложено оценивать обобщёнными коэффициентами, на основании которых по предложенному порядку должен рассчитываться показатель качества скважины. Качество скважины предложено оценивать: отличное, хорошее, посредственное и плохое, величину обобщённых коэффициентов предложено рассчитывать в зависимости от значений параметров, косвенно характеризующих качество выполненного этапа работы. Предложено качество освоения пласта оценивать по показателю «оценка продуктивности». Приведен алгоритм расчёта показателя качества. Рассмотрены основные направления определяющие качество вводимых в эксплуатацию скважин, обеспечивающие гидродинамическое совершенство системы «скважина-пласт»: техническое; технологическое; организационное. Изложен механизм оценки качества выполнения каждого этапа строительства скважин посредством определённого количества параметров (элементов качества), характеристик. Изложены подходы определения качества скважины по совокупности факторов, характеризующих результаты последовательных операций при ее строительстве в комплексе. Приведен перечень контролируемых критериев оценки соответствия строительства скважины, а также представлены формулы для вычисления величин их отклонений от требований проектной документации. **Цель исследований.** Разработка методики и механизма оценки гидродинамического совершенства системы «скважина-пласт», формируемой на этапе строительства скважин. **Методы исследования.** Сбор, обобщение и обработка промысловых и экспертных материалов, результатов наблюдений, расчёты полученных теоретических зависимостей и их анализ с использованием методов математической статистики с помощью современных технических и программных средств. Поставленные задачи решались путём проведения теоретических и экспериментальных исследований. **Результаты работы.** Разработана методика оценки гидродинамического совершенства системы «скважина-пласт» позволяющая оценить эффективность строительства вводимых в эксплуатацию скважин и выполнения технологических решений проектной документации.

Ключевые слова: скважина, качество, оценка, конструкция, производительность, гидродинамическое совершенство.

Для цитирования: Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А. Оценка гидродинамического совершенства системы скважина-пласт формируемой на этапе вскрытия продуктивного пласта. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 108-123. DOI: 10.46698/VNC.2023.58.47.009

DOI: 10.46698/VNC.2023.58.47.009

Original paper

Estimation of the hydrodynamic perfection of the well-reservoir system at the stage of opening a productive reservoir

E.R. Gasumov¹, R.A. Gasumov²

¹Azerbaijan State University of Oil and Industry, Azerbaijan Technical University,
20 Azadlig Ave., Baku AZ1010, Azerbaijan;

²North Caucasian Federal University, 419 Lenina Str., Stavropol 355000, Russian Federation,
e-mail: R.Gasumov@yandex.ru

Received: 21.06.2023, revised: 29.11.2023, accepted: 05.12.2023

Abstract: Relevance. The article deals with the issues of improving the quality of well completion, which ensures the hydrodynamic perfection of the “well-reservoir” system. The quality of each operation is proposed to be assessed by generalized coefficients, on the basis of which, according to the proposed procedure, the well quality indicator should be calculated. It is proposed to evaluate the quality of the well: excellent, good, mediocre and poor, the values of the generalized coefficients are proposed to be calculated depending on the values of the parameters that indirectly characterize the quality of the completed work stage. It is stated that the quality of reservoir development is proposed to be assessed by the indicator “productivity assessment”. An algorithm for calculating the quality index is given. The main directions that determine the quality of well completion and ensure the hydrodynamic perfection of the “well-reservoir” system are considered: technical; technological; organizational. The mechanism for assessing the quality of each stage of well construction by a certain number of parameters (quality elements) and characteristics is outlined. Approaches for determining the quality of a well by a set of factors characterizing the results of successive operations during its construction in a complex are outlined. A list of controlled criteria for assessing the conformity of well construction, as well as formulas for calculating the values of their deviations from the requirements of project documentation, is given.

Aim. Development of methodology and mechanisms for assessing the hydrodynamic perfection of the “well-reservoir” system formed at the stage of wells. **Methods.** Collection, generalization and processing of field and expert materials, observation results, calculations of the obtained theoretical dependencies and their analysis using methods of mathematical statistics with the help of modern hardware and software. The tasks were solved by carrying out theoretical and experimental studies. **Results.** A methodology for assessing the hydrodynamic perfection of the “well-reservoir” system, which makes it possible to evaluate the efficiency of well construction and completion and the implementation of technological solutions for design documentation.

Keywords: well, quality, evaluation, design, productivity, hydrodynamic perfection.

For citation: Gasumov E.R., Gasumov R.A. Estimation of the hydrodynamic perfection of the “well-reservoir” system formed at the stage of opening a productive reservoir. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(4): 108-123. DOI: 10.46698/VNC.2023.58.47.009

Введение

В связи с большим объёмом разведочного бурения в осложнённых горно-геологических условиях особое значение приобретает обеспечение гидродинамического совершенства системы «скважина-пласт», формируемой на этапе вскрытия продуктивного пласта. Повышение эффективности и качества строительства скважин

остаётся важной научно-технической задачей и становится все более актуальной при освоении новых месторождений УВ.

Анализ состояния развития добычи углеводородов (УВ) показывает, что значительное количество введенных в эксплуатацию скважин построено неудовлетворительно, имеет низкие дебиты, для него не достигнуто гидродинамическое совершенство системы «скважина-пласт», в связи чем, возникает необходимость проведения дополнительных мероприятий по интенсификации продуктивных пластов (ПЗП) для устранения последствий, вызванных некачественным завершением их строительства.

Решение задачи улучшения качества на заключительном этапе строительства скважин обеспечивающее гидродинамическое совершенство системы «скважина-пласт» включает в себя в основном следующие направления: техническое (повышение обоснованности выбора буровых установок, мощности наземного оборудования и т.п.); технологическое (выбор режима бурения, программ промывки скважин, совершенствование составов буровых и тампонажных растворов, предупреждение горно-геологических осложнений при завершении строительства скважин, обеспечение контроля за технологическими процессами и т.д.); организационное (включает комплекс мероприятий по совершенствованию буровой техники и технологии, внедрению новых материалов и реагентов, геофизических и контрольно-измерительных средств, совершенствованию организации производства и т.п.).

Особое влияние на качество строительства скважин оказывает правильность составления проектно-сметной документации (ПСД), которая должна определять архитектурные, функционально-технологические, конструктивные и инженерно-технические решения для обеспечения сооружения объекта, с использованием инновационных технологий. Под качеством строительства скважины принято понимать выполнение требований ПСД и безаварийную проводку её трассы; отсутствие межколонных давлений (МКД) и межпластовых перетоков (что обеспечивается качеством крепления); отсутствие загрязнения продуктивного пласта фильтрами бурового и цементного растворов, а самое главное обеспечение гидродинамического совершенства системы «скважина-пласт» для получения притока пластового флюида на проектном уровне. Гидродинамически совершенной скважина является тогда, когда при завершении строительства характер и качество вскрытия продуктивного пласта соответствуют проектным решениям и достигнута основная цель – получен полноценный приток пластового флюида.

Разработка методики оценки гидродинамического совершенства системы «скважина-пласт», формируемой на этапе завершения строительства (вскрытия продуктивного пласта, крепления и освоения) позволяет оценить качество строительства скважин, обосновать выбор технологий по повышению (восстановлению) продуктивности скважин с учётом геологических особенностей, включая дополнительные методы интенсификации пластового флюида.

Большое значение имеет возможность явно отражать совершенство скважины по характеру вскрытия пласта, уменьшенному радиусу скважины на основе использования исключительно реальных характеристик ствола скважины, непроницаемой ПЗП, состоянию и формированию каналов в интервале перфорации, системе размещения фильтра и др., поскольку скважина считается несовершенной с точки зрения качества вскрытия продуктивных пластов в том случае, когда проницаемость в интервале продуктивного горизонта снижена по сравнению с естественной породой-коллектором.

Методы исследований

Для достижения поставленных целей в работе проведены обработка промысловых и экспертных материалов, результатов наблюдений, расчёты полученных теоретических зависимостей и их анализ с использованием методов математической статистики с помощью современных технических и программных средств. Поставленные задачи решались путём проведения теоретических и экспериментальных исследований. Используются показатели, полученные в результате вычислительного эксперимента, рассчитываемые для различных численных значений определяющих факторов.

Результаты работы и их обсуждение

Для освоения месторождений УВ необходимо установление гидродинамической связи между продуктивной залежью и скважиной, которая служит каналом для транспортировки пластового флюида на поверхность земли.

При строительстве скважин важным этапом является процесс завершения, который включает в себя набор технологических процессов обеспечивающих гидродинамическое совершенство системы “скважина-пласт”: первичное и вторичное вскрытие продуктивных пластов; формирование надёжного канала (ствола скважины) соединяющего залежи УВ с устьем скважины; обеспечение герметичности созданного канала (обсаживание и крепление); испытания пласта; вызов пластового флюида; освоение скважины; интенсификация притока (при необходимости) [Хвастунов и др., 2002; Suleymanov et al., 2016].

Важным этапом завершения строительства скважин является первичное вскрытие продуктивных пластов бурением, так как от этого во многом зависит изменение фильтрационно-ёмкостных свойств (ФЕС) пласта-коллектора. В связи с чем, полнота проводимых работ на данном этапе в скважинах определяет, она совершенна или нет по качеству вскрытия продуктивного горизонта. Несовершенство скважин имеет несколько видов (рис. 1).

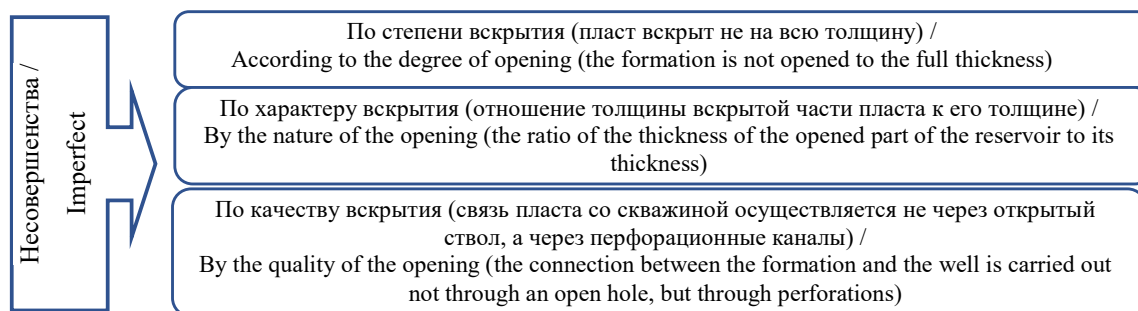


Рис. 1. Виды несовершенства скважин /

Fig. 1. Types of well imperfections

Скважины считаются несовершенными по качеству вскрытия продуктивного горизонта, когда при бурении снижена естественная проницаемость пласта-коллектора. А гидродинамически совершенной скважина считается тогда, когда характер и качество вскрытия являются совершенными по степени, то есть сохранены фильтрационно-ёмкостные свойства (ФЕС) продуктивного пласта, с учётом скин-эффекта (1). Для оценки данного показателя используется коэффициент гидрога-

зодинамического совершенства и «скин-эффект» [Мордвинов и др., 2001]. Скин-эффект определяется по формуле:

$$S_k = \ln \frac{R_3}{R_c} \left(\frac{k_{пл}}{k_3} - 1 \right), \quad (1)$$

где R_3 – радиус загрязнённой зоны пласта; R_c – радиус скважины, $k_{пл}$ – проницаемость пласт-коллектора, k_3 – проницаемость загрязненной зоны пласта. Если $S_k > 0$, то это означает, что проницаемость вскрытой части пласта уменьшилась, если $S_k = 0$, то проницаемость ПЗП осталась неизменной, если $S_k < 0$, то проницаемость ПЗП стала выше проницаемости пласта.

Кроме технико-технологических факторов, на качество строительства (в том числе завершения) скважин существенное влияние оказывают горно-геологические параметры вскрываемого продуктивного горизонта, и связанные с ними осложнения и возможные аварии. Наиболее пагубные последствия для продуктивных пластов возникают при поглощении бурового и тампонажного растворов, обусловленном репрессией на ПЗП на этапе завершения строительства скважин [Гасумов, 2015; Мусаев, 2020; Rahmanifard, Plaksina, 2019].

Качество строительства скважины и её качество по завершению строительства, не одно и то же. В первом случае оценивается качество процесса по сооружению объекта, во втором – качество объекта, полученного в результате строительства. При этом качественное строительство скважин это, когда в соответствии с ПСД обеспечены уровень добычи УВ и надёжность подземного геотехнического сооружения [Ибатуллина, 2006; Каюмов, 2016]. Качество строительства скважин определяется качеством выполнения трёх основных составляющих процесса строительства скважин: технологии бурения, крепления и освоения (испытание) пласта [Методика ТатНИПИнефть, 2005; Ибатуллина, 2006].

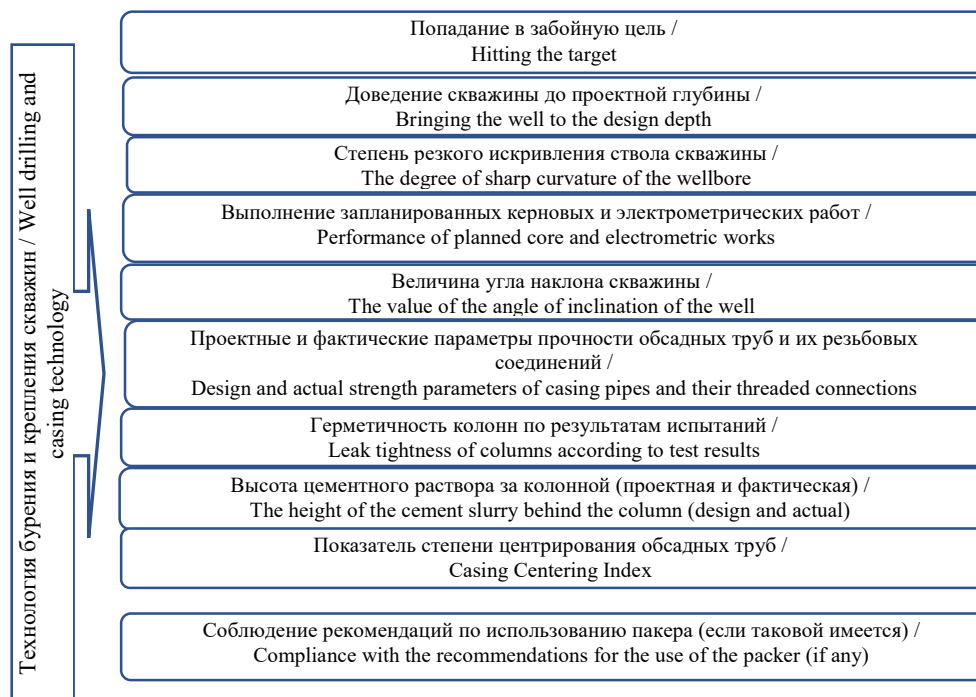


Рис. 2. Показатели качества технологии бурения и крепления скважин /

Fig. 2. Indicators of the quality of drilling and casing technology

Качество выполнения каждой операции предложено оценивать обобщёнными коэффициентами: бурение – K_{σ} ; крепление – K_{κ} и освоение – K_n , на основании которых по определённым правилам должен рассчитываться показатель качества скважины K . Качество скважины предложено оценивать: отличное, хорошее, посредственное и плохое [Повалихин, Берова, 2021].

Отметим, что величины обобщённых коэффициентов K_{σ} , K_{κ} и K_n рассчитываются в зависимости от значений параметров, косвенно характеризующих качество выполненного этапа работы.

По показателям качества технологии бурения и крепления скважин оценивается качество строительства скважин [Балаба, 2006; 2008] (рис. 2).

Качество освоения (испытание) пласта предложено оценивать по показателю «оценка продуктивности», который рассчитывается как отношение фактической продуктивности пласта к потенциальной. Отмечается, что при соблюдении всех условий вскрытия пласта показатель «оценка продуктивности» $K_n \leq 1$, а если пласт вскрывается без соблюдения проектных решений, то $K_n = 0,5$.

Алгоритм расчёта показателя качества следующий (2). Вначале определяются значения обобщённых коэффициентов K_{σ} , K_{κ} и K_n . Для этого (для каждого этапа строительства скважины) рассчитываются количественные значения элементов качества; определяются значения их желательных вероятностей (с использованием специальных таблиц, не приведённых в статье); рассчитываются единичные показатели параметров по трафаретному графику (не приведённому в статье). Коэффициенты K_{σ} , K_{κ} и K_n рассчитываются по формуле:

$$K_{об} = \frac{n}{\left(\frac{1}{d_{(\sigma, \kappa, n)_1}} + \dots + \frac{1}{d_{(\sigma, \kappa, n)_N}} \right)}, \quad (2)$$

где n – количество показателей качества каждого этапа строительства скважины; $d_{(\sigma, \kappa, n)_1} \dots d_{(\sigma, \kappa, n)_N}$ – единичные показатели элементов качества (коэффициентов K_{σ} , K_{κ} и K_n соответственно). Коэффициент качества скважины предложено рассчитывать, как среднее арифметическое значений обобщённых коэффициентов:

$$K = \frac{K_{\sigma} + K_{\kappa} + K_n}{3}. \quad (3)$$

В зависимости от значения коэффициента K скважина (3) получает оценку качества: отлично ($K \geq 0,80$); хорошо ($K \geq 0,63$); посредственно ($0,37 \geq K < 0,63$); плохо ($K < 0,37$). При $K_n = 1$ качество отдельных показателей реализации ПСД соответствует требованиям. Качество выполнения каждого этапа оценивается определённым количеством параметров (элементов качества), характеристиками которых являются: количественные значения (определяемые по данным контроля), желательные вероятности и значения единичных показателей (рис. 3).

Разработана система снижения коэффициентов в случае невыполнения ограничивающих условий (указанных в проекте, действующих нормативных документах и т.д.) [Ибатуллина, 2006; Балаба и др., Рябоконт, 2006].

С учётом полученных значений коэффициентов корректируется стоимость работ, причём снижение составляет не более 10% от стоимости строительства скважины.

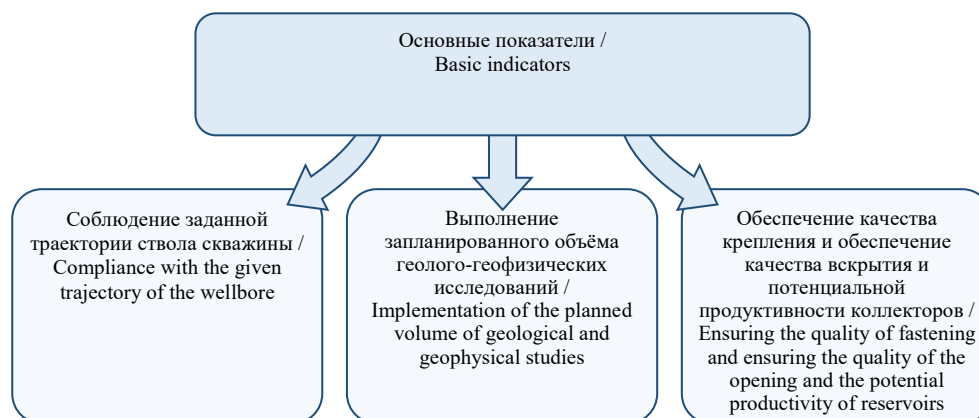


Рис. 3. Основные показатели для оценки качества строительства скважин /

Fig. 3. Key indicators for assessing the quality of well construction

Оценку качества завершённого строительством скважины рациональным представляется выполнять с использованием алгоритма, предложенного в [Пейсигов, 2004], с учётом приоритетности функционального назначения.

Качество скважины, как и любого объекта, определяется историей ее строительства, при котором оценка качества скважины [Белоусов, 1998] определяется как среднее арифметическое оценок качества выполнения отдельных этапов ее строительства. Коэффициент качества скважины, основанный на среднем арифметическом оценок по этапам, сглаживает конечный результат и не учитывает того, что плохие результаты выполненного последующего этапа не могут быть скомпенсированы хорошими результатами выполнения предыдущего. Например, если качество бурения и крепления хорошее ($K_b=0,8$, $K_k=0,7$), а качество вскрытия низкое ($K_n=0,4$), то оценка качества скважины будет равна $K=0,63$, т.е. оценка качества «хорошо», но при этом такая скважина будет нуждаться в дополнительных работах по интенсификации притока.

Качество скважины предлагается определять по совокупности факторов, характеризующих результаты последовательных операций при ее строительстве в комплексе. Оценку качества предложено определять в зависимости от численного значения показателя (коэффициента) качества. Численное значение показателя качества предложено рассчитывать по количественным значениям определяющих факторов с учётом степени их влияния на качество по формуле средневзвешенного значения [Бронштейн, Семендяев, 2010; Гутуров, Никифоров, 2012]:

$$K = \sum_{i=1}^n (m_i \cdot q_i), \quad (4)$$

где n – количество определяющих факторов; q_i – количественная оценка фактора, которая характеризует отдельный результат выполнения какой-либо операции. Количественное значение фактора рассчитывается по данным ГИС или измерений ($0 \leq q_i \leq 1$); m_i – весовой коэффициент фактора (коэффициент значимости) представляет собой ожидаемую вероятность влияния определяющего фактора на качество скважины ($0 \leq m_i \leq 1$). Величины коэффициентов значимости (факторов), не поддаются прямому измерению или вычислению, поэтому их определение проводится экспертным методом (4) [Ахмедов и др., 2009; Хвастунов и др., 2002].

В связи с чем, при разработке методики оценки качества скважины важным является получение набора определяющих факторов, формул для расчёта их количественных значений и алгоритма получения коэффициентов значимости факторов. Выявлено восемь факторов, влияющих на качество завершённого строительством скважины (рис. 4) [Гасумов, 2014; Ахмедов и др., 2009; Балаба, 2008]. Доминирующие факторы (выделены голубым цветом на рис. 4) определяют возможность использования эксплуатационной скважины по функциональному назначению [Suleimanov et al., 2016; Rahmanifard, Plaksina, 2019]:

- если забой скважины вышел за пределы допустимого диапазона, то это может означать, что скважина не вошла в продуктивный пласт, и добыча невозможна, либо скважина будет «отбирать» добычу у соседней скважины, либо выйдет за границы лицензионного участка;

- кавернозность ствола, пробуренного под обсадные колонны, влияет на качество их цементирования и герметичность крепи. Низкое качество цементирования способно привести к появлению МКД, межпластовых перетоков и образованию грифонов;

- проницаемость ПЗП и дебит скважины являются показателями возможности получения продукции в промышленных объёмах.

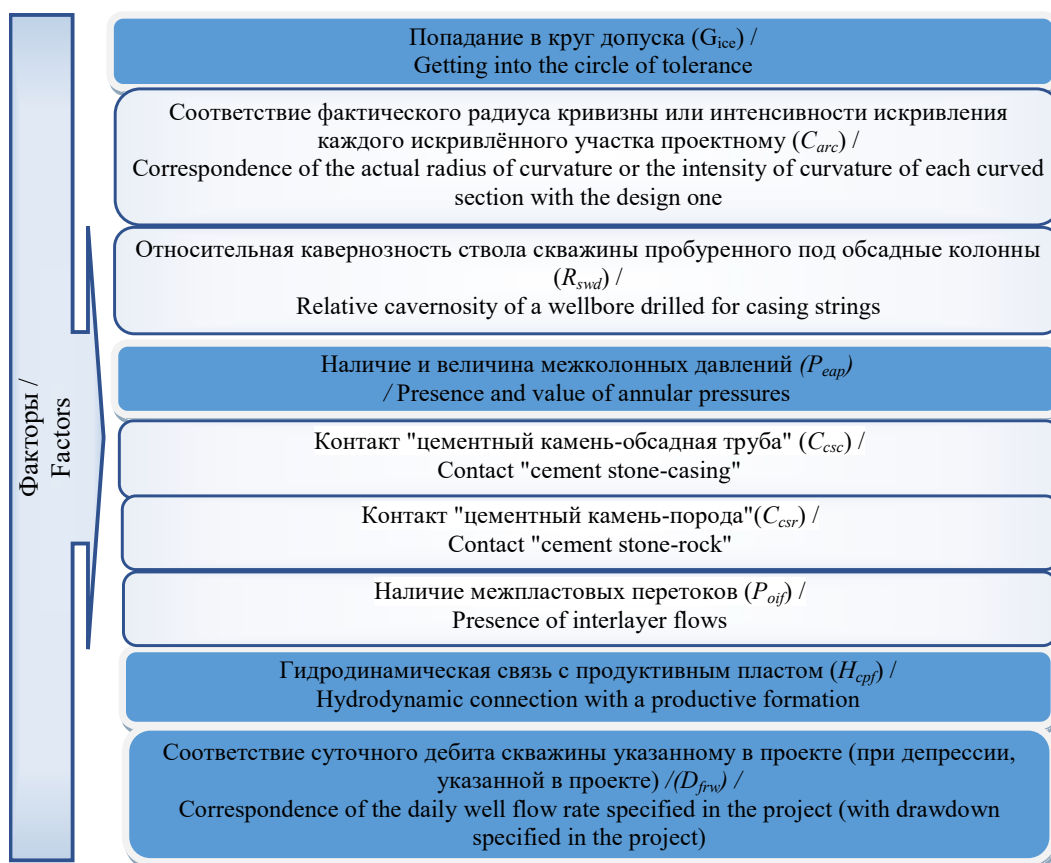


Рис. 4. Факторы, влияющие на качество скважин по результатам их строительства /

Fig. 4. Factors Affecting Well Completion Quality

Формулы для расчёта количественных значений факторов получены с использованием следующих принципов [Пейсиков, 2004] (рис. 5):

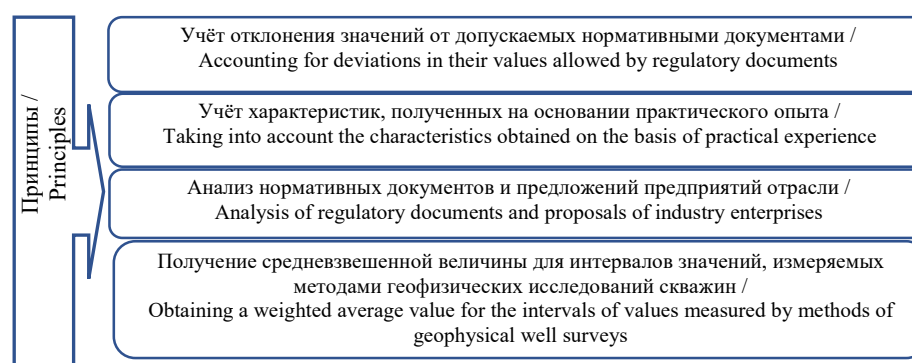


Рис. 5. Принципы, используемые для расчёта количественных значений факторов /
Fig. 5. Principles used to calculate the quantitative values of factors

В таблице 1 приведён перечень определяющих факторов и формулы для расчёта их количественных значений [Балаба, 2006; Повалихин, Берова, 2021].

Таблица 1 / Table 1

**Определяющие факторы и формулы для расчёта их количественных значений /
Determining factors and formulas for calculating their quantitative values**

Факторы / Factors	Количественное значение фактора q_i / The quantitative value of the factor
G_{ice}	$q_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{при } R_\phi \leq R_{np} \\ 0 & \text{при } R_m > R_{np} \end{cases}$
C_{arc} Для наклонно-направленных скважин / For directional wells	$q_2 = \begin{cases} \frac{X_\phi}{X_{np}} & \text{при } X_\phi < X_{np} \\ \frac{X_{np}}{X_\phi} & \text{при } X_\phi > X_{np} \end{cases}$
R_{swd} Для каждой обсадной колонны / For each casing string	$q_3 = \begin{cases} \frac{k_{np}}{k_\phi} & \text{при } k_{np} \leq k_\phi \\ 1 & \text{при } k_{np} > k_\phi \end{cases}$
P_{cap} Учитывается максимальная величина МКД (AP) / The maximum annular pressure (AP) is taken into account	$q_4 = \begin{cases} 1,0 & \text{при МКД} = 0,0 \\ 0,8 & \text{при } 0 < \text{МКД} \leq 0,1 \cdot P_{\text{прогн.}} \\ 0,6 & \text{при } 0,1 \cdot P_{\text{прогн.}} < \text{МКД} \leq P_{\text{прогн.}} \\ 0 & \text{при } P_{\text{прогн.}} < \text{МКД} \end{cases}$
C_{esc} Для каждой обсадной колонны / For each casing string	$q_5 = \begin{cases} 0 & \text{при } q_4 = 0 \\ \frac{r_0 l_0 + r_1 l_1 + r_2 l_2}{l_0 + l_1 + l_2} & \text{при } 0 < q_4 \leq 1 \end{cases}$ Отсутствует $r_0 = 0$; частичный $r_1 = 0,6$; сплошной (жесткий) $r_2 = 1$. / Missing $r_0 = 0$; partial $r_1 = 0,6$; solid (hard) $r_2 = 1$.
C_{csr} Для каждой обсадной колонны / For each casing string	$q_6 = \begin{cases} 0 & \text{при наличии МПП} \\ \frac{r_0 l_0 + r_1 l_1 + r_2 l_2}{l_0 + l_1 + l_2} & \text{при отсутствии МПП} \end{cases}$ Отсутствует $r_0 = 0$; частичный $r_1 = 0,6$; сплошной (жесткий) $r_2 = 1$. / Missing $r_0 = 0$; partial $r_1 = 0,6$; solid (hard) $r_2 = 1$.
P_{oif} Для каждой обсадной колонны / For each casing string	$q_7 = \begin{cases} 0 & \text{при } q_4 = 0 \\ 1 - \frac{\sum \varepsilon_i \cdot l_i}{L_\phi} & \text{при } 0 < q_4 \leq 1 \end{cases}$
H_{cpf}	$q_8 = \begin{cases} 1 & \text{при } k_{np} \leq k_\phi \\ \frac{k_\phi}{k_{np}} & \text{при } k_{np} > k_\phi \end{cases}$
D_{frw}	$q_9 = \begin{cases} 1 & \text{при } Q_{np} \leq Q_\phi \\ \frac{Q_\phi}{Q_{np}} & \text{при } Q_{np} > Q_\phi \end{cases}$

где $P_{\text{прогн.}}$ – прогнозная величина МКД, при которой допускается эксплуатация скважин; R – радиус круга (ствола скважины) допуска; X – радиус кривизны (м) или интенсивность искривления (град/10 м); ε_i – эксцентриситет i -го интервала колонны; l_i – длина i -го интервала, м; l_0, l_1, l_2 – суммарные длины интервалов, характеризующиеся оценками r_0, r_1, r_2 соответственно;

Значения коэффициентов значимости не универсальны, а их величины определяются при выполнении оценки качества каждой конкретной скважины. Для разных регионов и типов скважин значения коэффициентов значимости отличаются и могут быть установлены экспертным путём, в баллах влияния каждого фактора на качество скважины, на основе промысловых данных [Методика ТатНИПИнефть, 2005; Белоусов, 2008].

Согласованность экспертных оценок в таком случае определяется значением коэффициента вариации k_r и обобщённым значением точечных экспертных оценок – медианой Me [Пейсиков, 2004; Хвастунов и др., 2002; Ахмедов и др., 2009]:

$$k_r = \frac{qrt_3 - qrt_1}{2 eM} \quad (5)$$

Согласованность оценок считается слабой, если $k_r > 0,5$, (5). Оценки можно считать хорошо согласованными, если $k_r < 0,2$. Если по какому-либо фактору или коэффициенту оценки экспертов оказались рассогласованными (т. е. $k_r > 0,2$), то рекомендуется выполнить дополнительное оценивание. Эксперты, получая в ходе обмена мнениями дополнительную информацию, могут изменить свою оценку в сторону приближения к истине. Если не удалось достичь сходимости оценок, то предлагаются обобщённые оценки [Efendiyev et al., 2018; Kuang et al., 2021].

Свойства медианы, которые обуславливают ее выбор в качестве характеристики среднего, следующие:

- медиана ближе к истине, чем не менее половины всех индивидуальных экспертных оценок;
- сумма абсолютных значений отклонений экспертных оценок от медианы минимальна по сравнению с суммой любой другой характеристики среднего.

Коэффициент значимости i -го фактора m_i рассчитывается по формуле (6):

$$m_i = \frac{eM_i}{\sum_{i=1}^n eM_i} \quad (6)$$

Качество скважины, завершённой строительством, и соответствие нормативным документам при строительстве, оценивается приёмочной комиссией и оценки оформляются в виде акта. Оценки качества законченной строительством скважины следующие: отлично, если $0,9 < K \leq 1,0$; хорошо, если $0,8 < K \leq 0,9$; удовлетворительно, если $0,6 \leq K \leq 0,8$. Оценка «плохо» не применяется, так как методология разрабатывается для добывающих скважин. Значение коэффициента K определяется вычислительным экспериментом. Изменяя количественные значения факторов, которые характеризуют отдельный результат выполнения какой-либо операции так, чтобы их наборы соответствовали уровню “отлично”, “хорошо” и “удовлетворительно” при оценке качества скважин, рассчитывают соответствующий диапазон значений K . Конечно, в выборе численных значений факторов присутствует элемент субъективности, поэтому окончательные значения диапазонов K (для разных регионов имеют различные значения), соответствующие отличной, хорошей и удовлетворительной

оценкам качества скважины, могут быть скорректированы [Пейсиков, 2004; Ахмедов и др., 2009].

По определению, соответствие – это выполнение требований строительства скважин по ПСД. Отмечается, что основным содержанием бурового супервайзинга является прямое или косвенное определение соответствия требованиям [Балаба, 2006, 2008].

В связи с вышеизложенным, показатель выполненных разделов ПСД (S) при строительстве скважины рассчитывается в предположении равнозначности разделов проекта по степени исполнения и предложено определять его по формуле:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i, \quad (7)$$

где s_i – отношение количества подразделов i -го раздела, выполненного в соответствии с требованиями рабочего проекта на строительство скважины g_i , к общему количеству подразделов n_i i -го раздела [Балаба, 2006]:

$$s_i = \frac{g_i}{n_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

Оценка соответствия выполняется в зависимости от величины показателя соответствия (8): $S=1,0$ – соответствует; $0,8 \leq S < 1,0$ – соответствует с допусаемым отклонением; $S < 0,8$ – имеются серьёзные отклонения.

Качество скважины, с учётом её функционального назначения, определяется как совокупность свойств и соответствующей им комплексной ресурсоёмкости [Гасумов, 2015; Балаба и др., 2006].

Оценка качества строительства скважин путём определения комплексного показателя качества ($K_{кк}$), зависит от степени выполнения различных этапов проектных решений, и определяется путём сравнения показателей по фактически выполненным работам с показателями, заложенными в проектных решениях [Гасумов, 2014, 2015; Голик и др., 2019].

Формулы для расчёта показателей эффективности по каждому разделу ПСД представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Перечень технических решений проектной документации и оценки их выполнения /
List of technical solutions for design documentation and assessment of their
implementation**

Показатели по проекту (K_i) / Project indicators	Разделы- проекта / Stripped project	Оценки выполнения технических решений, соблюдение технических решений проекта / выполнены: / Evaluation of the implementation of technical solutions, compliance with the technical solutions of the project / completed:		
		В полном объёме / In full	С отклонениями, не отразившимися на качестве скважины / With deviations that did not affect the quality of the well	С отклонениями, отразившимися на качестве скважины / With deviations, affecting well quality
Конструкция скважины $K_{кн}$ / Well design	4	1	0,5	0
Профиль ствола скважины $K_{сп}$ / Wellbore profile	2	1	0,5	0

Буровые растворы $K_{бр}$ / Drilling fluids	2	1	0,5	0
Углубление скважины K_{yc} / Well deepening	5	1	0,5	0
Крепление скважины $K_{кр}$ / Well fixing	9	1	0,5	0
Вторичное вскрытие про- дуктивных пластов $K_{вв}$ / Secondary opening of pro- ductive layers	6	1	0,5	0
Освоение скважины $K_{ос}$ / Well development	2	1	0,5	0
Соблюдение природоохран- ных мероприятий при стро- ительстве скважины $K_{пм}$ / Compliance with environ- mental measures during well construction	8	1	0,5	0
Продолжительность стро- ительства скважины $K_{пс}$ / Well construction time		1	0,5	0

Если техническое решение по ПСД выполнено в полном объёме, то это означает, что качество строительства скважин можно оценить: высокое $K_{кч}=0,8-1,0$; среднее $K_{кч}=0,5-0,8$; низкое $K_{кч}<0,5$. $K_{ин}$ определяется как среднее арифметическое значение показателей выполнения разделов (n) ПСД ($n \leq 8$) [Белоусов, 1998; Гасумов, 2015]:

$$K_n = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i^n)}{n}, \tag{9}$$

где $K_{ин}$ – комплексный показатель качества строительства скважины (9); K_i – показатель выполнения разделов проектной документации (рассчитывается как среднее арифметическое оценок реализации технических решений, составляющих данный раздел); i – порядковый номер раздела проектной документации.

Оценка соответствия строительства скважин заключается в определении степени выполнения требований ПСД на строительство скважин (рис. 6) [Белоусов, 1998; Гасумов, 2015; Поваляхин, Беров, 2021; Балаба, 2008].



Рис. 6. Факторы, влияющие на качество завершения строительства скважин /

Fig. 6. Factors Affecting Well Completion Quality

Для оценки соответствия строительства скважин обязательным является соблюдение контролируемых критериев процесса строительства скважин, при бурении и креплении каждого интервала [Аветов и др., 2008].

Фиксация соответствия контролируемых критериев включает: сбор и анализ информации о фактических значениях контролируемых критериев; сравнение фактических значений контролируемых критериев со значениями, предусмотренными проектной документацией на строительство скважины; выявление отклонений фактических значений контролируемых критериев от значений, предусмотренных проектной документацией; документальное оформление выявленных отклонений фактических значений контролируемых критериев от значений, предусмотренных проектной документацией.

Перечень критериев, соответствие которым фиксируется при завершении строительства скважин: плотность бурового раствора; фильтрация бурового раствора; режим параметров бурения; компоновка обсадной колонны; технологическая оснастка обсадной колонны; скорость спуска обсадной колонны; компонентный состав буферной жидкости; тип и плотность тампонажного раствора; высота подъема цементного раствора за колонной; продолжительность бурения и крепления интервала продуктивного горизонта.

В результате фиксации соответствия каждому контролируемому критерию дается оценка соответствия, значение которой зависит от величины выявленного отклонения по данному контролируемому критерию (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Контролируемые критерии для оценки /
Controlled criteria for evaluation**

Контролируемые параметры / Controlled parameters	Оценка / Criteria
Если выявленное отклонение от требований проектной документации не превышает нижней границы соответствия / If the identified deviation from the requirements of the design documentation does not exceed the lower limit	1
Если отклонение от требований проектной документации превышает нижнюю границу соответствия, но не превышает верхней границы соответствия / If the deviation from the requirements of the design documentation exceeds the lower limit of compliance, but does not exceed the upper limit of compliance	0,5
Если отклонение от требований проектной документации превышает верхнюю границу соответствия / If the deviation from the requirements of the design documentation exceeds the upper limit of compliance	0

Верхний и нижний пределы соответствия по отклонениям контролируемых критериев устанавливаются ПСД строительства скважины. По установленным значениям показателей соответствия определяется комплексный показатель соответствия строительства скважины по формуле [Балаба, 2008; Гасумов, 2014]:

$$K = \frac{\sum_{m=1}^m K^m + K^c}{m+1}, \quad (10)$$

где m – количество интервалов, перекрываемых отдельной обсадной колонной (начиная от кондуктора и заканчивая эксплуатационной). На основании значения комплексного показателя (10) соответствия определяется оценка соответствия стро-

ительства скважины: отлично ($0,94 \leq K \leq 1,0$); хорошо ($0,84 \leq K < 0,94$); удовлетворительно ($0,70 \leq K < 0,84$); неудовлетворительно ($0 \leq K < 0,70$) и производится оценка соответствия строительства скважины.

Выводы

Определённый перечень критериев, соответствие которым фиксируется при строительстве скважины, где каждому контролируемому критерию даётся оценка соответствия, значение которой зависит от величины выявленного отклонения по данному контролируемому критерию позволяет оценить гидродинамическое совершенство системы «скважина-пласт», формируемой на этапе завершения ее формирования.

Методика оценки гидродинамического совершенства системы «скважина-пласт» позволяет не только оценить эффективность строительства и ввода в эксплуатацию скважины, но и сравнить результаты на разных скважинах, выявить причину различий путем проведения более детального анализа, позволяющего принять управленческое решение для реализации технологических решений ПСД.

Литература

1. Аветов Р.В., Рыжов А.Е., Сутырин А.В. К вопросу о повышении эффективности разработки месторождений за счёт строительства высокопроизводительных и надёжных скважин. // Вопросы строительства, эксплуатации и капитального ремонта скважин: сборник научных трудов. – М.: ВНИИГАЗ, 2008. – С. 3–12.
2. Ахмедов Н.Г., Коршунова К.С., Винниченко Л.Г. Методика оценки качества скважин, завершённых строительством, и их соответствия рабочему проекту. // Газовая промышленность. – 2009. – №8. – С. 70–72.
3. Ибатуллина Р.Р. Актуальные проблемы геологии и разработки нефтяных месторождений Татарстана. // Actual issues of geology and Tatarstan oilfield development: сб. науч. тр. – М.: Закон и порядок, 2006. – 571 с.
4. Балаба В.И. Управление качеством и оценка качества скважин. // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2006. – №2. – С. 7–15.
5. Балаба В.И. Управление качеством в бурении: учебное пособие. – М.: Недра, 2008. – 447 с.
6. Балаба В.И., Гноевых А.Н., Рябоконт А.А. Совершенствование управления качеством строительства скважин в ОАО «Газпром». // Сервисные работы как направление повышения эффективности и качества строительства скважин. Материалы НТС. – М.: ООО «МРЦ Газпром», 2006. – С. 34–50.
7. Белоусов В.О. Впервые создан стандарт на законченную бурением глубокую нефтяную скважину. // Нефтегазовые технологии. – 1998. – №1. – С. 10–12.
8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2010. – 608 с.
9. Гасумов Р.А. Геологические факторы, влияющие на качество крепления скважин (на примере конкретной скважины Прибрежной группы месторождений). // Геология, Геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – №12. – С. 48–53.
10. Гасумов Р.А. Повышение надёжности газовых и газоконденсатных скважин. // Газовая промышленность. – 2015. – №10(729). – С. 94–97.
11. Голик В.И., Кожиев Х.Х., Бурдзиева О.Г., Масленников С.А. Геомеханические факторы взаимодействия природных и технических систем в районах освоения недр. // Геология и Геофизика Юга России. – 2019. – Т.9(3). – С. 179–188. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36481.
12. Гуторов Ю.А., Никифоров А.А. Проблемы управления качеством строительства скважин на основе оценки их эффективности как объектов нефтедобычи. // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2012. – №5. С. 141–152.

13. Каюмов Э.Ф. Графические методы сравнения технологических объектов и процессов бурения. // Современная наука: Актуальные проблемы и пути их решения. – 2016. – №1(23). – С. 24–27.
14. Методика оценки качества строительства скважин ОАО «Татнефть». // РД 153-39.0-349-05. – Бугульма: ТатНИПИнефть, 2005. – 37 с.
15. Мордвинов А.А., Воронина Н.В., Каракчиев Э.И. Лабораторно-экспериментальные и практические методы исследования нефтегазопромысловых процессов: Учебное пособие. – Ухта: УГТУ, 2001. – 114 с.
16. Мусаев В.К. Математическое моделирование нестационарных упругих волн напряжений (переходной процесс) при воздействии (вертикальное сосредоточенное в виде треугольного импульса) на поверхность полуплоскости (задача Лэмба). – Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т.10(4). С. 164–174. DOI: 10.46698/VNC.2020.32.87.010.
17. Пейсиков Ю.В. Оценка качества строительства скважин на нефть. // Нефтяное хозяйство. – 2004. – №6. – С. 56–58.
18. Повалихин А.С., Берова И.Г. Оценка качества строительства скважин. // Инженер-нефтяник. – 2021. – №3. – С. 12–17.
19. Хвастунов Р.М., Ягелло О.И., Корнеева В.М. Экспертные оценки в квалиметрии машиностроения. – М.: АНО «Технонефтегаз». – 2002. – 130 с.
20. Efendiyev G., Mammadov P., Piriverdiyev I., Mammadov V. Estimation of the lost circulation rate using fuzzy clustering of geological objects by petrophysical properties. // Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology. – 2018. – No.2(81). – pp. 28–33.
21. Kuang L., He L.I.U., Yili R.E.N., et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development. // Petroleum Exploration and Development. – 2021. – No. 48(1). – pp. 1-14.
22. Mukhametshin V.V. Improving the efficiency of oil production facilities management using the analogy method. // SOCAR Proceedings. – 2020. – No.4. – pp. 42-50.
23. Suleimanov B.A., Ismayilov F.S., Dyshin O.A., Veliyev E.F. Selection methodology for screening evaluation of EOR methods. // Petroleum Science and Technology. – 2016. – No.34(10). – pp. 961-970.
24. Rahmanifard H., Plaksina T. Application of artificial intelligence techniques in the petroleum industry: a review. // Artificial Intelligence Review. – 2019. – No.52(4). – pp. 2295-2318.

References

1. Avetov R.V., Ryzhov A.E., Sutyurin A.V. On the issue of increasing the efficiency of field development through the construction of high-performance and reliable wells. Issues of construction, operation and overhaul of wells: a collection of scientific papers. VNIIGAZ. 2008. pp. 3–12. (In Russ.)
2. Akhmedov N.G., Korshunova K.S., Vinnichenko L.G. Methodology for assessing the quality of wells completed by construction and their compliance with the working design. Gas industry. 2009. No. 8. pp.70–72. (In Russ.)
3. Ibatullina R.R. Actual problems of geology and development of oil fields in Tatarstan. In: Proc. Actual issues of geology and Tatarstan oilfield development. Moscow. Law and order. 2006. 571 p. (In Russ.)
4. Balaba V.I., Gnoevykh A.N., Ryabokon A.A. Improvement of well construction quality management in OAO Gazprom. Service work as a way to increase the efficiency and quality of well construction. NTS materials. 2006. pp.34–50. (In Russ.)
5. Balaba V.I. Quality management in drilling: textbook. Moscow. Nedra. 2008. 447 p. (In Russ.)
6. Balaba V.I. Quality management and well quality assessment. Quality management in the oil and gas complex. 2006. No. 2. pp. 7–15. (In Russ.)

7. Belousov V.O. For the first time, a standard has been created for a deep oil well completed by drilling. *Oil and gas technologies*. 1998. No 1. pp. 10–12. (In Russ.)
8. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. *Handbook of Mathematics for Engineers and Students of Higher Educational Institutions: Textbook*. Saint Petersburg. LAN. 2010. 608 pp. (In Russ.)
9. Gasumov R.A. Geological factors affecting the quality of well casing (on the example of a specific well of the Coastal group of fields). *Geology, Geophysics and development of oil and gas fields*. 2014. No. 12. pp. 48–53. (In Russ.)
10. Gasumov R.A. Improving the reliability of gas and gas condensate wells. *Gas industry*. 2015. . No. 10. Issue 729. pp. 94–97. (In Russ.)
11. Golik V. I., Kozhiev Kh. Kh., Burdzieva O. G., Maslennikov S. A. Interaction of Natural and Technical Systems in the Subsoil Development Areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 179–188. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36481. (In Russ.)
12. Gutorov Yu.A., Nikiforov A.A. Problems of well construction quality management based on the assessment of their effectiveness as oil production facilities. *Electronic scientific journal Oil and gas business*. 2012. No. 5. (In Russ.)
13. Kayumov E.F. Graphic methods for comparing technological objects and drilling processes. *Modern science: Actual problems and ways to solve them*. 2016. No. 1. Issue 23. pp. 24–27. (In Russ.)
14. Methodology for assessing the quality of construction of wells of OAO TATNEFT. RD 153–39.0-349-05. Bugulma, TatNIPIneft. 2005. 37 p. (In Russ.)
15. Mordvinov A.A., Voronina N.V., Karakchiev E.I. Laboratory-experimental and practical methods for studying oil and gas field processes, *Textbook*. Ukhta: USTU. 2001. 114 p. (In Russ.)
16. Musayev V. K. Mathematical modeling of non-stationary elastic stress waves (transient process) under load (vertical concentrated as a triangular pulse) applied at the surface of a half-plane (Lamb’s problem). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 164–174. DOI: 10.46698/VNC.2020.32.87.010. (In Russ.)
17. Peisikov Yu.V. Evaluation of the quality of construction of oil wells. *Oil industry*. 2004. No 6. pp. 56–58. (In Russ.)
18. Povalikhin A.S., Berova I.G. Evaluation of the quality of well construction. *Petroleum engineer*. 2021. No. 3. pp.12–17. (In Russ.)
19. Khvastunov R.M., Yagello O.I., Korneeva V.M. Expert assessments in mechanical engineering qualimetry. Moscow. ANO Technoneftegaz. 2002. 130 p. (In Russ.)
20. Efendiyev G., Mammadov P., Piriverdiyev I., Mammadov V. Estimation of the lost circulation rate using fuzzy clustering of geological objects by petrophysical properties. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. 2018. Vol. 2. No. 81. pp. 28–33.
21. Kuang L., He L.I.U., Yili R.E.N., et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development. *Petroleum Exploration and Development*. 2021. Vol. 48. Issue 1. pp. 1–14.
22. Mukhametshin V.V. Improving the efficiency of oil production facilities management using the analogy method. *SOCAR Proceedings*. 2020. No. 4. pp. 42–50.
23. Suleimanov B.A., Ismayilov F.S., Dyshin O.A., Veliyev E. F. Selection methodology for screening evaluation of EOR methods. *Petroleum Science and Technology*. 2016. Vol. 34. No. 10. pp. 961–970.
24. Rahmanifard H., Plaksina T. Application of artificial intelligence techniques in the petroleum industry: a review. *Artificial Intelligence Review*. 2019. Vol. 52. No. 4. pp. 2295–2318.