

Концептуальная модель управляемых процессов добычи газа в месторождениях со сложной геологической структурой

П. А. Мальцев¹,
А. В. Плотников²

Санкт-Петербургский горный
университет императрицы
Екатерины II

¹maltcev-pave@mail.ru,
²apvitarlaeda@gmail.com

К. В. Мартиросян

Северо-Кавказский федеральный
университет

kv1961@live.ru

С. Е. Абрамкин

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

seabramkin@etu.ru

Аннотация. В настоящее время актуальной проблемой становится обеспечение добычи природных ресурсов из месторождений со сложной геологической структурой. Для обеспечения текущего спроса на энергоресурсы необходимо усовершенствовать способы повышения коэффициента извлечения углеводородного сырья. Процесс добычи газа из месторождений со сложной геологической структурой характеризуется некоторыми особенностями, такими как повышенное давление, многослойное строение пласта и другими. В рамках данного исследования ставится задача концептуального моделирования управляемого процесса добычи газа из месторождений со сложной структурой.

Ключевые слова: добыча газа; концептуальная модель; метод экспертных оценок

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основные месторождения нашей страны находятся на стадии падающей добычи. Это значительно влияет на формирование режимов добычи [6]. В последние годы проводятся многочисленные исследования, направленные на оптимизацию (максимизацию) коэффициента извлечения углеводородов. Одним из перспективных направлений является разработка месторождений со сложной геологической структурой [2, 3].

Этот вопрос интересовал отечественных и зарубежных ученых еще с прошлого века. Однако, в связи с некоторыми особенностями таких месторождений, их освоение шло медленными темпами. Существует проблема эффективности разработки сложных геологических пластов. Она связана с их формированием и накоплением, а также с особенностями течения внутрипластовых процессов, которые значительно понижают эффективность добычи углеводородов из месторождений данного типа [5, 10].

В рамках исследования решается задача концептуального моделирования управляемых процессов добычи газа из месторождений со сложной геологической структурой. Данная работа является базисом для дальнейших исследований по управлению добычей газа из таких месторождений.

II. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ДОБЫЧИ ГАЗА ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СО СЛОЖНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Эксплуатация газовой залежи осуществляется посредством пробуренных скважин, через которые реализуется технологический процесс добычи сырья. С точки зрения управления скважины – это информационные каналы связи с пластом. При этом получают данные о параметрах газоносного пласта и призабойной зоны, уровне газодляного контакта. На основе этой информации рассчитывают дебиты скважин и реализуют их регулирование.

Газовую залежь как объект управления представляет собой систему «газоносный пласт – скважина» (рис. 1).

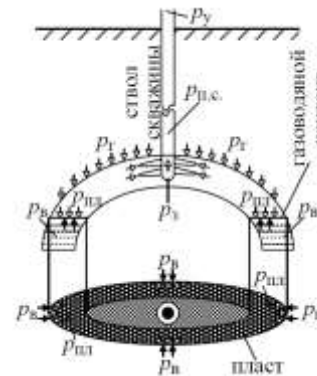


Рис. 1. Система «газоносный пласт – скважина» как объект управления [1]

Обозначения, принятые на рис. 1: $p_{п.с.}$ – переменное давление ствола скважины; p_g – горное давление; $p_{пл}$ – пластовое давление; p_v – давление пластовых вод; p_y – устьевое давление; p_z – забойное давление.

Данная система описывается дифференциальными уравнениями в частных производных (ДУЧП), содержащими функции точек фильтрационной области залежи. С их помощью определяются основные характеристики газового коллектора.

Использование ДУЧП фильтрации направлено на решение не только теоретических, но и практических задач. Например, возможно определить основополагающие силы процесса фильтрации в газодобывающем пласте.

В зависимости от типа решаемой задачи в ходе исследования при составлении ДУЧП учитываются законы сохранения, диффузии компонентов и т. д. Решение ДУЧП реализуется в численном виде с учетом краевых и начальных условий. Это дает возможность построения прогнозов изменения состояния пласта при его длительной эксплуатации и определяет стратегию разработки газодобывающих комплексов.

Движение газа в газоносном пласте характеризуется поддержанием давления на забое меньше пластового. Это обеспечивает поступление газа к скважине. Затем за счет создания аналогичного перепада давления между забоем и устьем скважины газ по ее стволу поступает на устье в область меньшего давления.

Газоносный пласт условно можно разбить на области дренирования, которые при эксплуатации вступают между собой в сложное взаимодействие. Оно заключается в постоянном движении внутрипластовых флюидов из областей высокого давления в области с низким давлением.

Добыча природного газа из месторождений со сложной геологической структурой имеет свои особенности. В частности, сложной геологической структурой обладают Ачимовские отложения [4].

Во-первых, сложность разработки связана со значительной глубиной залегания газовых коллекторов, по сравнению с сеноманскими и валанжинскими залежами. Глубины отложений разного типа представлены на рис. 2 (а – Ачимовские отложения, глубина – 4,0 км; б – Валанжинские залежи, глубина – 1,7...3,2 км; с – Сеноманские залежи, глубина – 1,1...1,7 км).



Рис. 2. Залежи различного типа

Сложность разработки Ачимовских залежей вызвана нестандартным геологическим строением их коллекторов. Они имеют линзовидную форму (иначе, клиноформу). Такой тип коллектора практически не зависит от антиклиналей [7].

Так же для Ачима характерна неоднородность пластов и их разрозненность. Другими словами, строение земной толщи таких залежей переменчивое и характеризуется сменой пластов с различными фильтрационными свойствами [8].

Ачимовским залежам присущи аномально высокие термобарические параметры (давления и температуры), что является важным фактором при их разработке.

Анализ системы «газоносный пласт – скважина» показывает, что основные управляемые переменные для нее – это устьевое давление и дебит скважины.

Управляющим воздействием на систему «газоносный пласт – скважина» является депрессия, т. е. разность между пластовым и забойным давлениями. Изменяя забойное давление, регулируют приток газа в скважину.

Приведенный анализ выявил факторы процесса добычи газа из месторождений со сложной геологической структурой. С целью создания эффективной системы управления такими объектами требуется разработка концептуальной модели.

III. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАЗРАБОТКИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Объектом исследования являются Ачимовские залежи (газоконденсатные). Первоначальный этап анализа объекта характеризуется формированием на основе полученной информации об объекте концептуальной модели.

На добычу газа из структурно-сложных геологически месторождений влияет множество факторов. Концептуальная модель позволит определить наиболее существенные параметры, влияющие на процесс добычи.

На основе анализа специальной литературы определен перечень факторов, которые, по мнению многочисленных авторов, влияют на процесс добычи из месторождений со сложной геологической структурой.

Одним из первых факторов является режим разработки месторождения. От него зависит движение не только газа, но и пластовых вод в газоконденсатной залежи. Это напрямую влияет на пластовое давление, а значит и на коэффициент газоотдачи.

Неоднородное строение пласта в виде нескольких слоев с разными фильтрационными свойствами характеризует месторождение как сложное в разработке. Такая структура пласта может привести к эффекту перетока флюидов между слоями, что значительно затрудняет их добычу, приводя к потерям.

Литология пласта влияет на петрофизические свойства (проницаемость и фильтрацию) залежей. Которые, в свою очередь, определяют эффективность разработки газоконденсатной залежи.

Темпы разработки месторождений определяются следующими параметрами: глубиной залегания газа; геометрическими характеристиками залежей; сеткой размещения скважин; физико-технологическими характеристиками отдельных скважин и др. параметрами.

Термодинамические процессы внутри пласта, призабойной и устьевой зонах скважины, определяют поведение горной породы и флюидов внутри нее.

Всего выделено 89 параметров, которые в разной степени влияют на управление процессами добычи газа из месторождений со сложной геологической структурой. Оценка их влияния позволит определить наиболее значимые из них и разработать на их основе стратегию управления добычей газа [9, 11].

В данном исследовании использован метод экспертных оценок, т. е. для оценки влияния выявленных факторов на процесс добычи привлекались эксперты с предприятий газовой промышленности. Всего было опрошено шесть экспертов, являющихся специалистами по геологии, добыче и подготовке природного газа. Им была направлена таблица с параметрами для оценки их влияния на процесс добычи газа. Диапазон оценочной шкалы включает баллы от 0 до 10 (где 0 – влияние минимальное, а 10 – максимальное влияние на процесс) [12].

Обработка полученных экспертных мнений осуществлена методом априорного ранжирования факторов.

Первоначальный анализ экспертных оценок различных параметров показал, что они, по мнению экспертов, оказывают равнозначное влияние на процесс и имеют соответственно одинаковую оценку. Таким образом, определены «связные» ранги данных параметров, на основе которых осуществляется дальнейшая обработка данных. Связный ранг параметра определяется по формуле:

$$r = \sum_{i=1}^n q_i / n,$$

где r – связный ранг; n – количество параметров с одинаковой оценкой; q_i – номер параметра по возрастанию ранга в таблице.

Затем параметры в таблицах, полученных от экспертов, ранжируются по возрастанию по связным рангам.

Определен результирующий ранг каждого параметра, для этого складываем связные ранги параметров по каждому эксперту:

$$R_k = \sum_{i=1}^m r_i,$$

где R_k – результирующий ранг k -ого параметра; r_i – связный ранг k -ого параметра от i -ого эксперта; m – количество экспертов.

Рассчитано среднее значение результирующих рангов по формуле:

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^k R_i / k,$$

где \bar{R} – среднее значение результирующих рангов; R_i – результирующий ранг i -ого параметра; k – количество параметров.

Определено отклонение и квадрат отклонения d_i от среднего значения d_i^2 для каждого из параметров:

$$d_i = \bar{R} - R_i,$$

где $1 \leq i \leq k$.

Оценена степень согласованности мнений опрошенных экспертов с помощью коэффициента конкордации:

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k) - m \cdot \sum_{i=1}^m T_i}, \quad (1)$$

где W – коэффициент конкордации; $S = \sum_{i=1}^k d_i^2$ – сумма квадратов отклонений; $T_i = \sum_{q=1}^Q (h_q^3 - h_q)$ – показатель связных рангов в i -ой ранжировке; Q – количество групп одинаковых связных рангов в ранжировке; h_q – число равных связных рангов в группе.

При расчете получено значение коэффициента конкордации равно $W = 0,64$. Это значение показало заметную степень согласованности мнений экспертов.

Оценка значимости полученного коэффициента конкордации осуществлена с применением коэффициента Пирсона χ^2

$$\chi^2 = \frac{12S}{m \cdot k \cdot (k+1) - \frac{1}{k-1} \cdot \sum_{i=1}^m T_i}.$$

Вычисленное значение коэффициента Пирсона составляет $\chi^2 = 336,75$. Его сравнивают с табличным из распределения Пирсона, характерным для выбранного уровня значимости и числа степеней свободы. Гипотеза о согласованности мнений экспертов принимается только в том случае, если $\chi^2 \geq \chi_{\text{табл}}^2$.

Определим количество степеней свободы для исследуемой ранжировки:

$$v = k - 1 = 88 - 1 = 87.$$

Табличное значение коэффициента Пирсона при уровне значимости параметров $\alpha = 0,05$ и 87 степенях свободы равно $\chi_{\text{табл}}^2 = 110,89$. Соответственно выполняется условие $\chi^2 \geq \chi_{\text{табл}}^2$, т. е. $336,75 \geq 110,89$. Таким образом, гипотеза о согласованности мнения экспертов принимается, а значение $W = 0,64$ не случайная величина.

Определен вес каждого параметра по формуле:

$$\lambda_i = R_i / \sum_{i=1}^k R_i.$$

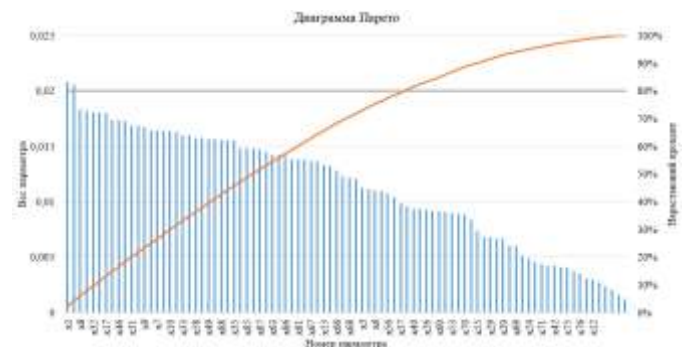


Рис. 3. Диаграмма Парето

Наиболее значимые параметры определены по диаграмме Парето (рис. 3). Согласно принципу Парето, наиболее значимые параметры имеют вес $\lambda_i \geq 0,01$. Согласно данному соотношению построена

концептуальная модель управляемых процессов добычи газа из месторождений со сложной геологической структурой (рис. 4).



Рис. 4. Концептуальная модель управляемых процессов добычи газа в месторождениях со сложной геологической структурой

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ процесса добычи газа из месторождений со сложной геологической структурой. Определены основные переменные процесса. Управляемые переменные – устьевое давление и дебит скважины. Управляющее воздействие – депрессия на пласт. Разработана концептуальная модель управляемых процессов для данного объекта. Модель построена методом экспертных оценок для выявления наиболее значимых параметров. Результаты проверены коэффициентами конкордации и Пирсона. Разработанная концепция является базисом для дальнейших исследований по управлению добычей газа из месторождений со сложной геологической структурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Реализация комплексных алгоритмов управления на газодобывающем предприятии //XXV Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2022): Сб. докладов. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. С. 83–86.
- [2] Горбунова Л.В. Экономическая оценка освоения сложностроенных месторождений // Известия высших учебных заведений. Социология. Экономика. Политика. 2011. № 1. С. 44–46.
- [3] Молдован А.А. Газовая промышленность в мире и основные тенденции её развития // E-Scio. 2022. № 3 (66). С. 184–192.
- [4] Пунанова С.А. Углеводородные скопления ачимовских отложений северных регионов Западной Сибири // Экспозиция Нефть Газ. 2020. № 3 (76). С. 10–13.
- [5] Сивцев А.И., Егорова Т.Р., Сивцев Н.А. К вопросу извлекаемых запасов газа //Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Vestnik of North-Eastern Federal University. Серия «Науки о Земле». Earth Sciences. 2021. №. 3. С. 58-65.
- [6] Ereemeeva A.M., Ilyushin Y.V. Automation of the control system for drying grain crops of the technological process for obtaining biodiesel fuels. Scientific Reports. 13, 14956 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41962-0>.
- [7] Pershin I.M.; Papush E.G.; Kukharova T.V.; Utkin V.A. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral Water Wells. Water 2023, 15, 2289. <https://doi.org/10.3390/w15122289>.
- [8] Asadulag M.-A.M., Pershin I.M., Tsapleva V.V. Research on Hydro lithospheric Processes Using the Results of Groundwater Inflow Testing. Water 2024, 16, 487. <https://doi.org/10.3390/w16030487>.
- [9] Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Chernyshev A.B. Investigation of Popov's Lines' Limiting Position to Ensure the Process Control Systems' Absolute Stability. In Proceedings of the 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russia, 24–26 May 2023; pp. 69–72. <https://doi.org/10.1109/SCM58628.2023.10159089>.
- [10] Katysheva E. Analysis of the Interconnected Development Potential of the Oil, Gas and Transport Industries in the Russian Arctic. Energies 2023, 16, 3124. <https://doi.org/10.3390/en16073124>.
- [11] Yury I., Martirosyan A. The development of the sodenberg electrolyzer electromagnetic field's state monitoring system. Sci Rep 14, 3501 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52002-w>.
- [12] P.A. Mal'Tsev, N.A. Shatilova and S.E. Abramkin, "Synthesis of a Control System for the Oil Cooling Process in the Oil Supply System of a Gas Turbine Engine," 2022 XXV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 68-71, doi: 10.1109/SCM55405.2022.9794841.