

УДК 004: 622.324

Н.А. Соловьев, А.Ф. Валеев

Развитие модели живучести системы добычи газа в условиях обводнения скважин

Анализируется развитие методического обеспечения автоматизированной системы научных исследований живучести обводненных газовых скважин. Предложена модель живучести системы добычи газа в условиях обводнения скважин, включающая модель «пласт-скважина», модель неблагоприятных последствий обводнения, модель физических процессов, модель последствий обводнения, модель средств обеспечения живучести, модель развития последствий обводнения, блок расчета показателей живучести и базы данных для работы с исходными данными и результатами моделирования. На основе анализа существующих подходов к оценке живучести технических систем разработан коэффициент живучести системы добычи газа в условиях обводнения, зависящий от свойств результативности, ресурсоемкости при использовании технологий борьбы с обводнением на объектах добычи газа. Предложен критерий выбора наилучшего средства обеспечения живучести обводненной газовой скважины, учитывающий характеристики пласта, конструкцию и оборудование скважины, дебит газа.

Ключевые слова: автоматизация, научные исследования, газовая скважина, обводнение, живучесть, результативность, ресурсоемкость, моделирование.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-93-100

Добыча продукции многих газоконденсатных месторождений сопровождается падением пластового давления и появлением внешних неблагоприятных воздействий, уровень которых превышает проектные условия эксплуатации системы добычи, например обводнение скважин.

В работе [1] авторами предложено характеризовать влияние неблагоприятного воздействия обводнения скважин на систему добычи газа свойством живучести. Дано определение понятия живучести системы добычи газа S – свойство, заключающееся в способности скважины поддерживать в допустимых пределах проектные значения эксплуатационных показателей в условиях, не предусмотренных регламентом нормальной эксплуатации. Доказана необходимость разработки автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) живучести системы добычи газа в условиях обводнения скважин.

В статье предлагается развитие методического обеспечения АСНИ живучести обводненных газовых скважин. Компоненты методического обеспечения представляют собой документы, содержащие описание терминов, теории, методов, способов, моделей, алгоритмов, нормативов, стандартов и прочих данных, которые обеспечивают методологию научных исследований в подсистемах АСНИ [2].

Модель живучести системы добычи газа в условиях обводнения

Надежность определяет работу систем в условиях нормальной эксплуатации. В ГОСТ [3] надежность – свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Проведенный анализ зарубежной и отечественных источников литературы [4–16] показал, что живучесть как понятие давно известно в технике и используется на практике при проектировании различных технических систем. При этом до настоящего

времени не создано развитой теории живучести, которая содержала бы, как и теория надежности, технические результаты, позволяющие оценивать его количественно и предоставлять практические рекомендации по обеспечению живучести разработчику сложных систем [1].

Общая модель живучести системы представлена на рис. 1, а [4], где МНВ – модель развития неблагоприятного воздействия, ПФ – значения поражающих факторов, неблагоприятных воздействий, МРС – модель изменения работоспособности системы, МПНВ – модель процессов противодействия неблагоприятным воздействиям, ПЖ – значения показателей живучести.

Значительный вклад в исследование надежности и живучести внесли отечественные ученые Г.Н. Черкесов и А.О. Недосекин [5–7], которые представляют живучесть как свойство системы сохранять и восстанавливать способность к выполнению основных функций в заданном объеме в течение заданной наработки при изменении структуры системы и (или) алгоритмов и условий ее функционирования вследствие не предусмотренных регламентом нормальной работы внешних неблагоприятных воздействий. В [8] приводится дополнение и уточнение определения с учетом свойств функциональной живучести и ее частного случая – структурной живучести. Показатели живучести распределяются на две группы. В первой группе – показатели для оценки живучести по состоянию системы, во второй – по результатам выполнения задания [6]. Показатели второй группы используются для оценки способности системы как противостоять неблагоприятному воздействию, так и выполнить установленное задание. В [8] предложены вероятностные и нечетко-логические модели функциональной живучести технических систем. Оценивается живучесть системы после n -кратного неблагоприятного воздействия. Данный подход требуют адаптации для воз-

возможности оценки живучести объектов добычи газа с учетом обводнения.

В.А. Черных и В.В. Черных [15] рассматривают живучесть системы добычи газа как геомеханическую и гидродинамическую живучесть, при этом не учитывается влияние обводнения на объекты добычи газа.

Поэтому существующий методический аппарат не может быть использован для оценки живучести системы добычи газа и требует развития с учетом особенностей объекта исследования.

Таким образом, объектом исследования является живучесть объектов добычи газа газоконденсатных месторождений в условиях обводнения; предметом – методическое обеспечение исследования живучести объектов добычи газа; границы исследования – рациональное использование пластовой

энергии на подъем газа за счет своевременного введения различных технологий борьбы с обводнением.

Цель исследования: разработка модели живучести системы добычи продукции газоконденсатных месторождений, позволяющей поддерживать приближенный к проектному уровень добычи газа за счет выбора технологий борьбы с обводнением и периода их использования.

Задачи исследования, которые необходимо решить для достижения цели:

1. Выполнить системный анализ проблем обеспечения живучести объектов добычи газа газоконденсатных месторождений в условиях обводнения.
2. Разработать математический аппарат для оценки показателей живучести объектов добычи газа.
3. Разработать критерий выбора технологий борьбы с обводнением системы добычи газа.

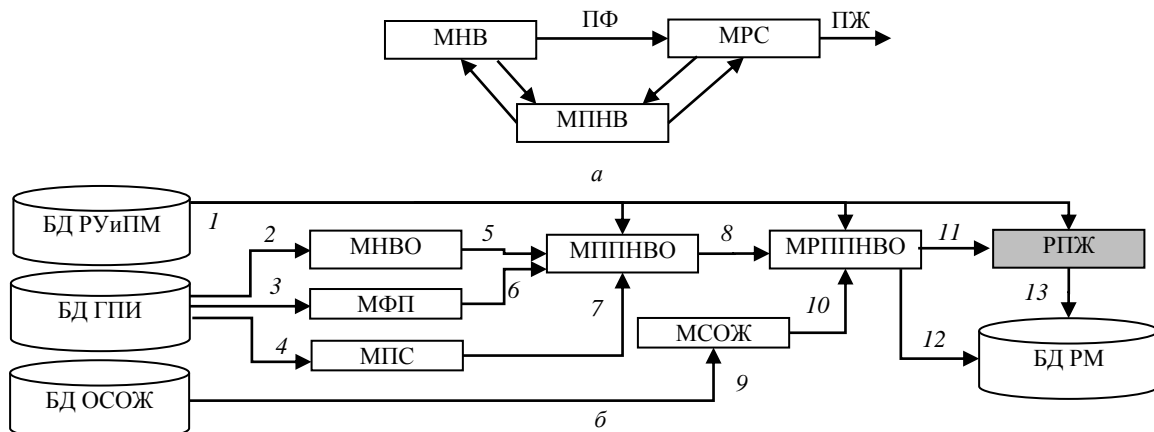


Рис. 1. Модель живучести: *a* – общая модель живучести системы [4];

б – модель живучести объектов добычи газа в условиях обводнения;

- 1* – технологические ограничения, проектные значения показателей добычи углеводородов, исходные экономические данные (цены углеводородов, ресурсов и др.); *2* – геолого-промысловые данные: P_{res1} – параметры водоносного пласта, свойства и состав пластовой жидкости; *3* – геолого-промысловые данные: свойства и состав газа; *4* – геолого-промысловые данные: P_{resg} , P_{rw} – параметры газонасыщенного пласта, конструкции и оборудования скважины, накопленная добыча газа O_g , O_l – накопленная добыча газа и жидкости, P_{res} , P_{bh} , P_{wh1} , P_{wha} – давление пластовое статическое, давление на забое, на устье (трубное и затрубное); *5* – параметры притока жидкости к забою скважины; *6* – характеристики движения газового потока по стволу скважины; *7* – параметры притока газа, показатели работы системы добычи газа без обводнения; *8* – характеристики газожидкостного потока по стволу скважины, показатели работы системы добычи газа с учетом неблагоприятного воздействия обводнения; *9* – параметры оборудования СОЖ, *10* – характеристики СОЖ; *11* – фактические, проектные и расчетные значения показателей системы добычи газа с СОЖ и без СОЖ; *12* – расчетные значения показателей системы добычи газа с СОЖ и без СОЖ; *13* – показатели живучести системы добычи газа

Методы исследования: системный анализ, теория систем, теория надежности и живучести, теория разработки месторождений природного газа, прогностическое моделирование.

В [1] предложена концепция живучести объектов добычи газа. Ее основой является система моделирования процессов добычи продукции газоконденсатных месторождений, учитывающая технологии борьбы с обводнением – средства обеспечения живучести (СОЖ) [5] и период их использования. Подбор СОЖ позволит продлить живучесть скважины – поддерживать уровень добычи газа, близкий к проектному значению.

В рамках создания АСНИ живучести объектов добычи газа [1] на основе общей модели (см. рис. 1, *a*) и подхода, предложенного Г.Н. Черкесовым [5, 6], разработана модель живучести системы добычи газа в условиях обводнения скважин (см. рис. 1, *б*).

Модель включает следующие компоненты:

- модель неблагоприятного воздействия обводнения (МНВО), применяется для задания неблагоприятных воздействий обводнения на газовую скважину;
- модель физических процессов (МФП), используется для анализа переходных процессов в системе добычи газа после неблагоприятных воздей-

ствий (изменение динамического уровня жидкости) и описывает траекторию процесса функционирования;

– модель «пласт–скважина» (МПС), описывает техническую и функциональную структуры компонентов системы «пласт–скважина»;

– модель первичных последствий неблагоприятного воздействия обводнения (МППНВО), получается путем взаимодействия МПС, МФП и МНВО. В МФП вводятся возмущения, связанные с неблагоприятным воздействием обводнения, и рассматриваются переходные процессы в добыче газа без учета СОЖ;

– модель СОЖ (МСОЖ), отражает характеристики технологий борьбы с обводнением. МСОЖ позволяет задать оснащение определенной компоновкой одной из технологий борьбы с обводнением на скважине: установки электроцентробежного насоса (УЭЦН), установки винтового штангового насоса (УВШН), плунжер-лифта, газлифта, концентрической лифтовой колонны (КЛК) и др.;

– модель развития первичных последствий неблагоприятного воздействия обводнения (МРППНВО), получается в результате сочетания МППНВО с МСОЖ и позволяет найти траекторию управляемого процесса с учетом действий СОЖ;

– блок расчета показателей живучести (РПЖ) системы добычи газа при различных вариантах использования СОЖ;

– база данных рекомендуемых уставок и планов мероприятий (БД РУиПМ);

– база данных геолого-промысловой информации (БД ГПИ);

– база данных оборудования СОЖ (БД ОСОЖ);

– база данных результатов моделирования (БД РМ).

Информационную основу АСНИ составляет база геолого-промысловой информации месторождения, в которой содержатся данные по скважине, результаты геофизических, газогидродинамических, промысловых и лабораторных исследований, данные технологических режимов работы, геолого-технических отчетов, конструкции и оборудования, геологического строения, вскрытых участков пласта, траектории, простоях скважин, местоположении, свойствах и составе пластового флюида и другая информация [17].

Для ведения и анализа содержимого базы данных разработан программный комплекс «Скважина» (ООО «ВолгоУралНИПИГаз»). Программный комплекс позволяет получать оперативный доступ к каталогу документов по проведенным геолого-промысловым и лабораторным исследованиям, информации о распределении давления, температуры и плотности продукции по стволу скважины, передавать данные для интегрированной геолого-технологической модели месторождения, представлять в виде графиков историю изменения устьевых и забойных давлений скважины в статике и динамике, проводить расчеты забойного давления «сухих» и обводненных газовых скважин с учетом их конструктивных и геологических особенностей, прово-

дить анализ разработки месторождений, визуализировать и осуществлять выгрузку данных в заданном формате (таблиц, графиков, диаграмм, рисунков).

Разработана МРППНВО, которая используется для проведения узлового и системного анализа; определения потерь давления и получения характеристик работы скважин; подбора оптимального диаметра труб; моделирования СОЖ на скважинах; проверки и прогноза параметров технологических режимов работы скважин; расчета специальных таблиц VFP, применяемых для задания системы добычи и представляющих собой зависимость устьевого давления скважины от забойного для различных параметров работы скважины с учетом актуальной компоновки оборудования, хранимых в базе данных [17, 18].

Однако в АСНИ отсутствует математический аппарат, необходимый для оценки показателей живучести системы добычи газа (см. серый блок на рис. 1, б).

Показатели живучести системы добычи газа

Живучесть объектов добычи газа предлагается оценивать аналогично подходу, который используется для внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем [16], по трем показателям: результативности, ресурсоемкости и длительности использования СОЖ в условиях неблагоприятных воздействий, уровень которых превышает проектные [1]. При этом предполагается, что система добычи газа является надежным техническим объектом: конструкция и все оборудование исправны, эксплуатация осуществляется в соответствии со всеми установленными требованиями промышленной безопасности.

Коэффициент живучести системы добычи газа определяется свойствами системы в выражении $S = f(Y_p, Y_r, Y_d)$.

Результативность Y_p обуславливается объемом добытого газа и характеризует процесс добычи газа.

Ресурсоемкость Y_r характеризует эффективность использования ресурсов в процессе добычи газа в условиях неблагоприятных воздействий.

Длительность использования СОЖ Y_d характеризует период времени применения СОЖ в условиях неблагоприятных воздействий.

Ресурсозатраты R – ресурсы, необходимые для эксплуатации скважин (в том числе для реализации СОЖ) и функционирования АСНИ за заданный период времени.

Определены ресурсы для реализации системы добычи газа с СОЖ и АСНИ (таблица) [16].

Проектные значения показателей (индекс pr) – значения показателей работы системы добычи газа согласно технологической проектной документации на разработку месторождения (с проектным уровнем неблагоприятного влияния обводнения скважин или без учета обводнения).

Расчетные (прогнозные) значения показателей (без индекса) – прогнозные значения, рассчитанные с помощью АСНИ с учетом неблагоприятных воздействий, уровень которых превышает проектные.

Используемые ресурсы

Тип ресурса	Описание
Сырьевой	Объем газлифтного газа для закачки
Структурно-параметрический	Вычислительный кластер АСНИ, система хранения данных, автоматизированная система управления технологическим процессом, контрольно-измерительные приборы, инфраструктура для реализации технологии добычи с УЭЦН, УШВН, автоматики плунжер-лифта, КЛК, инфраструктура для очистки и утилизации пластовой жидкости
Энергетический	Электропитание УЭЦН, УШВН, автоматики плунжер-лифта, КЛК, компрессоров газлифтного газа и др.
Технический	Скважины, промысловые шлейфы, система предварительной подготовки углеводородного сырья
Технологический	Расход ингибиторов коррозии и гидратообразования и др.
Информационный	Необходимая информация для контроля, мониторинга и управления технологическим процессом добычи, структура ее хранения, дискретность обновления
Временной	Время, необходимое для выполнения операции, время для принятия управленческих решений
Трудовой	Количество специалистов и руководителей для обслуживания системы (операторы, отдел моделирования, геологи, разработчики месторождений, технологи, специалисты по автоматизации, инженеры сервисной службы)

Фактические значения показателей (индекс f) – значения показателей работы системы добычи газа согласно геолого-технической отчетной документации на определенный момент времени, характеризуют историю работы скважины.

Разработан математический аппарат для определения коэффициента живучести скважины

$$\begin{cases} S = 0, Q_g < Q_{g \min}; \\ S = 1, Q_g = Q_{gpr}; \\ S = Y_p(Q_g \times A) / \overline{Y_r(V_l, E(t))} / \overline{Y_d(E(t))} / \overline{\Delta P_{res}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $A = \left(\frac{Pr_{res}, Pr_w, Pr_{fl}, Pr_{es}(Q_{gim})}{P_{bh}(P_{wh}, Q_l, P_{wha}), T_{res}, T_{bh}, T_{wh}, H_{dyn}} \right)$; $\overline{Y_r}, \overline{Y_d}, \overline{\Delta P_{res}}$ –

нормализованные относительно проектных значений расчетные значения показателей: ресурсоемкости, времени эксплуатации скважины и изменения пластового давления; Q_b, Q_g – дебиты пластовой жидкости и газа; Pr_{res}, Pr_w, Pr_{fl} – параметры пласта, конструкции и оборудования скважины и шлейфа; V_l – объем пластовой жидкости; T_{res}, T_{bh}, T_{wh} – температура в пласте, в призабойной зоне и на устье; H_{dyn} – динамический уровень жидкости в пространстве между эксплуатационной колонной и насосно-компрессорными трубами; $E(t)$ – параметры СОЖ E во времени t .

Если дебит газа меньше рентабельного дебита газа, то живучесть скважины равна нулю.

Если дебит газа соответствует проектному дебиту, то живучесть скважины максимальная и равна единице.

Иначе живучесть рассчитывается по третьей зависимости в системе уравнений (1).

Максимальная накопленная добыча газа «сухой» скважины может быть равна извлекаемому запасам газа Z , дренируемым скважиной.

На рис. 2 представлена динамика коэффициента живучести скважины: S_{pr} – проектного, S_f – без использования СОЖ, S – с управляющим воздействием (применением СОЖ).

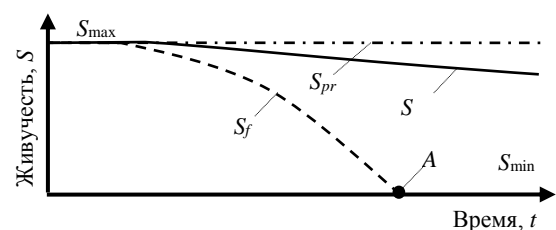


Рис. 2. Динамика коэффициента живучести скважины

Без применения СОЖ из-за самозадавливания пластовой жидкостью коэффициент живучести скважины может снизиться до значения S_{min} , при котором эксплуатация скважины становится нерентабельной.

Минимальный рентабельный (промышленный) дебит газа $Q_{g \min}$ – суточная добыча газа, обеспечивающая компенсацию ресурсозатрат на эксплуатацию скважины с СОЖ, т.е. равны чистому доходу от реализации добытой продукции $M: R = M$.

Накопленная добыча газа Q_g – объем газа, добытый из скважины за определенный период времени.

Фактическое (расчетное) значение показателя результативности системы добычи газа $Y_{pf}(Y_p)$ определяется как отношение фактического (прогнозного) накопленного объема добываемого газа за время t $Q_{gf}(Q_g)$ к проектному Q_{gpr} : $Y_{pf} = Q_{gf}(t) / Q_{gpr}(t)$, $Y_p = Q_g(t) / Q_{gpr}(t)$.

Ресурсоемкость Y_r определяется как отношение ресурсозатрат и объема добытого газа за время t : $Y_r = R(t) / Q_g(t)$.

Длительность использования СОЖ: $Y_d = \Delta t$.

В результате обводнения скважины происходит ухудшение фильтрационных свойств пласта.

На рис. 3 представлена динамика показателей работы скважины без учета обводнения и с применением СОЖ при обводнении.

Показатели скважины включают: S – коэффициент живучести, P_{res} – пластовое давление, Q_{gim} – накопленная добыча газа; Q_{wim} – накопленная добыча пластовой жидкости, R – ресурсозатраты. В момент времени t_0 начинается эксплуатация скважины, в t_w – начинается обводнение скважины, в t_{cr} – окон-

чание работы скважины фонтаном, начало эксплуатации скважины с первой компоновкой СОЖ, в $t_1 \dots t_n$ – заканчивается период использования 1...n компоновки СОЖ.

Показатели S , P_{res} , Q_{gim} , Q_{lim} , R с соответствующими индексами характеризуют работу скважины в моменты времени t , отмечены на графиках, представленных сплошными линиями на рис. 3.

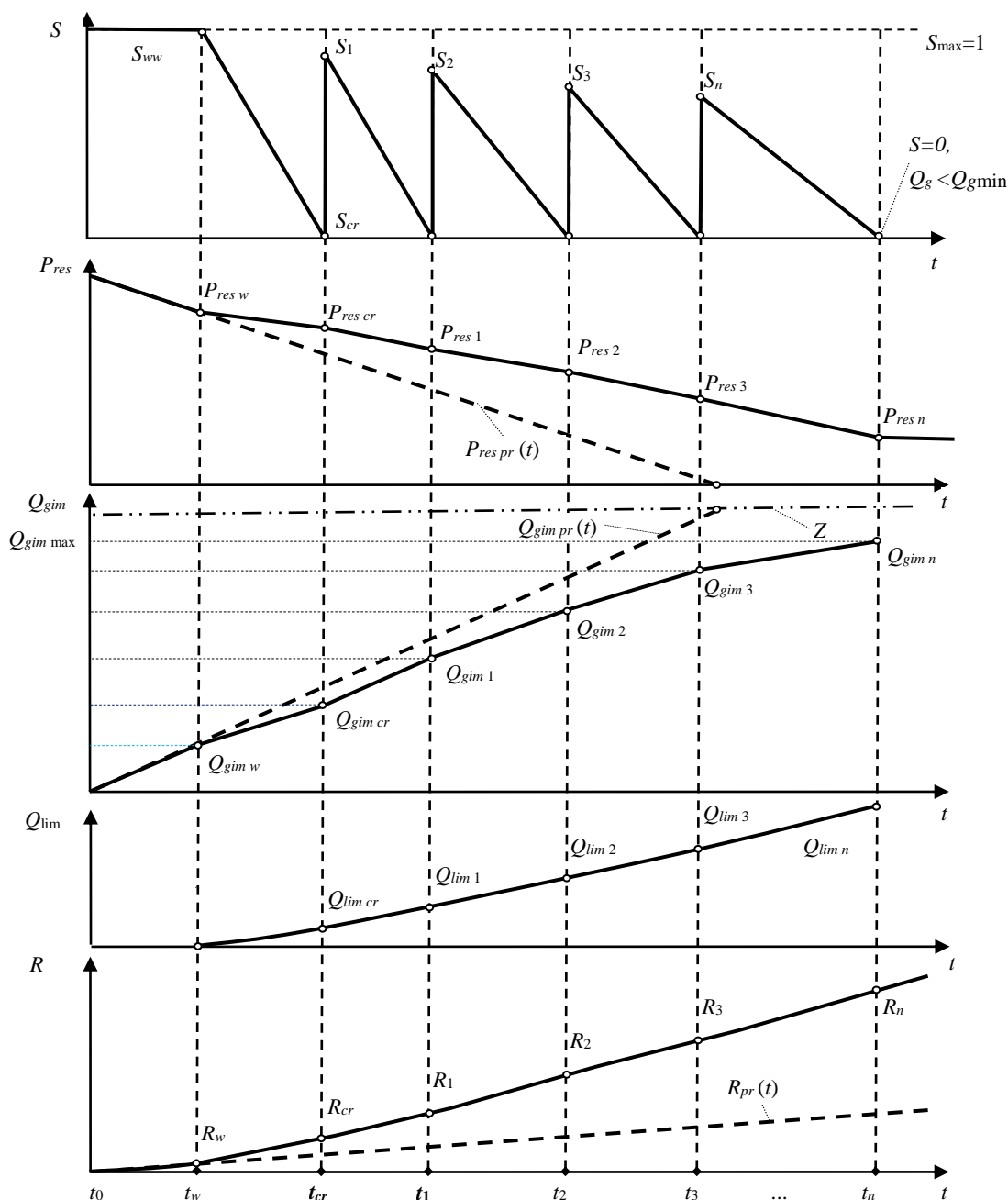


Рис. 3. Показатели работы газовой скважины в условиях обводнения

Графики показателей (см. жирные пунктирные линии на рис. 3) $P_{res pr}(t)$, $Q_{gim pr}(t)$, $R_{pr}(t)$ характеризуют работу «сухой» скважины – проектные значения показателей.

Для характеристики работы скважины в условиях обводнения необходимо уточнить определения некоторых понятий.

Величина неблагоприятного воздействия обводнения (Q_w) – дебит пластовой воды, который поступает на забой скважины $Q_w = Q_{wim}/Y_d$.

Время работы скважины t_{ot} – время фактической работы скважины за определенный промежуток времени. Включает время вывода скважины на стационарный режим работы и время стационарного режима работы скважины.

Календарное время t_{ct} – максимально возможное время работы скважины за определенный промежуток времени.

Время простоя скважины t_{rt} – время, когда скважина не работает, включает время проведения

ремонтных работ, время исследований, время остановки скважины при периодической эксплуатации.

Коэффициент эксплуатации скважины (K_o) – отношение времени работы скважины t_{ot} к календарному времени t_{ct} : $K_o = t_{ot} / t_{ct}$.

Период промышленной эксплуатации скважины – это период эксплуатации скважины, во время которого обеспечивается поддержание промышленного дебита газа.

Работоспособность скважины – свойство, определяющее способность скважины поддерживать дебит газа выше минимального рентабельного дебита газа.

Восстанавливаемость скважины – свойство, определяющее возможность вернуть работоспособность при использовании СОЖ.

Жизнеспособность скважины – свойство, определяющее способность поддерживать промышленный дебит газа, $S > 0$.

Нежизнеспособность скважины – свойство, противоположное жизнеспособности, т.е. неспособность поддерживать промышленный дебит газа, $S = 0$.

Потери газа $O_{gim\ loss}$ – разница между проектной и расчетной накопленной за весь период эксплуатации добычей газа: $O_{gim\ loss} = O_{gim\ pr} - O_{gim}$.

Запас живучести – отношение расчетной живучести скважины к проектной в определенный момент времени.

Средний запас живучести – среднее значение запаса живучести системы добычи газа за определенный период времени.

Удельная добыча газа (U_g) – отношение накопленной добычи газа за определенный период времени O_{gim} к ресурсозатратам на ее эксплуатацию R : $U_g = O_{gim} / R$.

Критерий выбора средства обеспечения живучести системы добычи газа

Подбор СОЖ системы добычи газа производят с учетом следующих данных:

- производственных параметров скважины (истории добычи, конструкции скважины, глубины забоя, пластового давления и температуры, траектории ствола скважины, состава и свойств пластового флюида, содержание механических примесей);

- инфраструктурных параметров скважины (местоположение, ограниченность пространства, тип закачивания, источник внешней энергии, герметичность эксплуатационной колонны);

- возможных производственных проблем (коррозия оборудования, пенообразование, солеотложение, гидратообразование).

Для выбора наилучшего СОЖ системы добычи газа авторами [1] предлагается критерий, математическое выражение которого представляется целевой функцией

$$S \left\{ Y_p(E(t)), Y_r(V_l, E(t)), Y_d(E(t)) \right\} \xrightarrow[Q_g > Q_{g\ min}]^{U(E(t))} \max,$$

где $U(E(t))$ – управляющее воздействие с учетом применяемого СОЖ E во времени t .

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований определены показатели, характеризующие работу объектов добычи газа в условиях обводнения.

Предложена модель живучести объектов добычи газа, включающая модель «пласт–скважина», модель обводнения, модель средств обеспечения живучести. Определены основные ресурсы, необходимые для эксплуатации системы добычи газа с использованием средств обеспечения живучести и ее исследования. Разработан математический аппарат для расчета коэффициента живучести объекта добычи газа, учитывающий такие свойства, как результативность и ресурсоемкость в условиях применения технологий борьбы с обводнением. Выявлены параметры, которые необходимо учитывать при выборе средств обеспечения живучести. Определен критерий выбора наилучшего средства обеспечения живучести обводненной газовой скважины. Разработанный методический аппарат позволит проводить подбор средств обеспечения живучести и является основой для построения автоматизированной системы научных исследований живучести обводненных газовых скважин.

Литература

1. Соловьев Н.А. Концепция автоматизации научных исследований живучести системы добычи газа в условиях обводнения скважин / Н.А. Соловьев, А.Ф. Валеев // Программные продукты и системы. – 2019. – Т. 32, № 3. – С. 462–471. – DOI: 10.15827/0236-235X.127.462-471.
2. Общеотраслевые руководящие методические материалы по созданию автоматизированных систем научных исследований и комплексных испытаний образцов новой техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20070928082241/http://linux.nist.fss.ru/hr/doc/gtk/asni.htm>, свободный (дата обращения: 18.11.2021).
3. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200136419>, свободный (дата обращения: 18.11.2021).
4. Волик Б.Г. Эффективность, надежность и живучесть управляющих систем / Б.Г. Волик, И.А. Рябинин // Автоматика и телемеханика. – 1984. – № 12. – С. 151–160.
5. Черкесов Г.Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. – М.: Знание, 1987. – 32 с.
6. Черкесов Г.Н. Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многократных воздействиях высокой точности. – Ч. 1 / Г.Н. Черкесов, А.О. Недосекин // Надежность. – 2016. – № 2. – С. 3–15.
7. Черкесов Г.Н. Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многократных воздействиях высокой точности. – Ч. 2 / Г.Н. Черкесов, А.О. Недосекин // Надежность. – 2016. – № 3. – С. 26–34. – DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-3-26-34.
8. Недосекин А.О. Методы и модели оценки функциональной живучести структурно-сложных технических систем / А.О. Недосекин, В.В. Виноградов, З.И. Абдулаева. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2018. – 127 с.
9. Надежность технических систем: справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Болдырев, В.В. Болотин, И.А. Ушаков. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

10. ResiliNets [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://resilinet.org>, свободный (дата обращения: 18.11.2021).

11. Ellison R. Survivability assurance for systems of systems. Technical report. – Networked System Survivability, 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа https://www.researchgate.net/publication/235112267_Survivability_Assurance_for_System_of_Systems, свободный (дата обращения: 18.11.2021).

12. Omer M. The resilience in network infrastructure systems. – Singapore: World Scientific, 2013. – 236 p.

13. Deffaunt G., Gilbert N. Viability and resilience of complex systems. – Germany: Springer, 2011. – 236 p.

14. Стекольников Ю.И. Живучесть систем. – СПб.: Политехника, 2002. – 156 с.

15. Черных В.А. Математическая теория живучести систем добычи газа / В.А. Черных, В.В. Черных. – М.: Институт проблем нефти и газа РАН, 2015. – 219 с.

16. Петухов Г.Б. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем / Г.Б. Петухов, В.И. Якунин. – М.: АСТ, 2006. – 504 с.

17. Баишев В.З. Автоматизированная информационная система ведения геолого-промысловых данных нефтегазоконденсатных месторождений / В.З. Баишев, И.С. Вологин, А.Ф. Валеев // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2016. – № 3. – С. 25–29.

18. Валеев А.Ф. Моделирование системы «пласт-скважина–шлейф» обводненных газовых скважин / А.Ф. Валеев, А.Г. Шуэр, Н.А. Соловьев // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2012. – № 10. – С. 31–35.

Соловьев Николай Алексеевич

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем

Оренбургского государственного университета

Победы пр-т, д. 13, г. Оренбург, Россия, 460018

Тел.: +7 (353-2) 37-25-54

Эл. почта: povtas@mail.osu.ru

Валеев Артем Фаатович

Канд. техн. наук, нач. отд. геолого-гидродинамического

моделирования Службы разработки месторождений и

геологоразведочных работ Инженерно-технического

центра ООО «Газпром добыча Оренбург»

Чкалова ул., д. 1/2, г. Оренбург, 460058

ORCID: 0000-0001-8367-2547

Тел.: +7 (353-2) 73-10-37

Эл. почта: a.valeev@gdo.gazprom.ru

Solovyov N.A., Valeev A.F.

Development of gas production system survivability model in the conditions of well flooding

The article is devoted to the development of methodological support for an automated system that allows carrying scientific research on the survivability of flooded gas wells. A model of the gas production system survivability under conditions of well flooding is proposed. It includes a «reservoir-well» model, a model of adverse effects of flooding, a model of physical processes, a model of primary flooding consequences, a model of means of ensuring survivability, a model of the primary flooding consequences development, a calculation unit indica-

tors of survivability and a database for working with initial data and simulation results. Based on the analysis of existing approaches to assessing the survivability of technical systems, the coefficient of gas production system survivability under flooding conditions has been developed. It depends on the properties of performance, resource intensity when using technologies to combat flooding in wells. A criterion for choosing the best means of ensuring the survivability of a flooded gas well is proposed, taking into account the parameters of the reservoir, well design and equipment, and gas flow rate.

Keywords: automation, scientific research, gas well, flooding, survivability, efficiency, resource intensity, modeling.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-93-100

References

1. Soloviev N.A., Valeev A.F. The automation of scientific studies on the concept of gas well survivability during water flooding. *Software & Systems*, 2019, no. 3, pp. 462–471. doi: 10.15827/0236-235X.127.462–471 (in Russ.).

2. *Obshcheotraslevyye rukovodyashchiye metodicheskiye materialy po sozdaniyu avtomatizirovannykh sistem nauchnykh issledovaniy i kompleksnykh ispytaniy obraztsov novoy tekhniki* [Industry-wide guiding methodological materials for the creation of automated systems for scientific research and integrated testing of new technology samples]. Available at: <https://web.archive.org/web/20070928082241/http://linux.nist.fss.ru/hr/doc/gtk/asni.htm>, free. (Accessed: November 18, 2021) (in Russ.).

3. GOST 27.002–2015. Dependability in technics. Terms and definitions. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200136419>, free (Accessed: November 18, 2021) (in Russ.).

4. Volik B.G., Ryabinin I.A. *Effektivnost', nadezhnost' i zhivuchest' upravlyayushchih sistem* [Efficiency, reliability and survivability of control systems]. *Automation and telemechanics*, 1984, no. 12, pp. 151–160 (in Russ.).

5. Cherkesov G.N. *Metody i modeli otsenki zhivuchesti slozhnykh sistem* [Methods and models for assessing the survivability of complex systems]. Moscow, Znaniye Publ., 1987, 32 p. (in Russ.).

6. Cherkesov G.N., Nedosekin A.O. Description of approach to estimating survivability of complex structures under repeated impacts of high accuracy. *Reliability*, 2016, no. 2, part 1, pp. 3–15 (in Russ.).

7. Cherkesov G.N., Nedosekin A.O. Description of approach to estimating survivability of complex structures under repeated impacts of high accuracy. *Reliability*, 2016, no. 3, part 2, pp. 26–34 (in Russ.). doi: 10.21683/1729-2646-2016-16-3-26-34.

8. Nedosekin A.O., Vinogradov V.V., Abdulaeva Z.I. *Metody i modeli ocenki funktsional'noj zhivuchesti strukturno-slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Methods and models for assessing the functional survivability of structurally complex technical systems]. St.-Petersburg, Publishing House of the Polytechnic University Publ., 2018. 127 p. (in Russ.).

9. Belyaev Yu.K., Boldyrev V.A., Bolotin V.V., Ushakov I.A. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: spravochnik* [Reliability of technical systems: handbook]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1985, 608 p. (in Russ.).

10. ResiliNets. Available at: <https://resilinet.org>, free (Accessed: November 18, 2021).

11. Ellison R. Survivability assurance for systems of systems. Technical report. Networked System Survivability, 2008. Available at: https://www.researchgate.net/publication/235112267_Survivability_Assurance_for_System_of_Systems, free (Accessed: November 18, 2021).

12. Omer M. *The resilience in network infrastructure systems*. Singapore, World Scientific Publ., 2013, 236 p.

13. Deffaunt G., Gilbert N. *Viability and resilience of complex systems*. Germany, Springer Publ., 2011, 236 p.

14. Stekolnikov Yu.I. *ZHivuchest' sistem* [Survivability of systems]. St. Petersburg, Politechnika Publ., 2002, 156 p. (in Russ.).

15. Chernykh V.A., Chernykh V.V. *Matematicheskaya teoriya zhivuchesti sistem dobychi gaza* [Mathematical theory of survivability of gas production systems]. Moscow, Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences Publ., 2015, 219 p. (in Russ.).

16. Petukhov G.B., Yakunin V.I. *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovaniya celenapravlennyh processov i celeustremlennyh sistem* [Methodological foundations of external design of purposeful processes and purposeful systems]. Moscow, AST Publ., 2006, 504 p. (in Russ.).

17. Baishev V.Z., Vologin I.S., Valeev A.F. Automated information support system for oil and gas fields geological and field data. *OIL AND GAS TERRITORY*, 2016, no. 3, pp. 25–29 (in Russ.).

18. Valeev A.F., Shuer A.G., Solovyov N.A. Simulation of the system «reservoir-well-pipeline» in watercut gas wells. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2012, no. 10, pp. 31–35 (in Russ.).

Nikolay A. Solovyov

Doctor of Science in Engineering, Professor, Supervisor of Software Department, Orenburg State University
13, Pobedy pr., Orenburg, Russia, 460018
Phone: +7 (353-2) 37-25-54
Email: povtas@mail.osu.ru

Artem F. Valeev

Candidate of Science in Engineering, Head of Geological and Hydrodynamic Simulation Department, Field Development and Exploration Services in the Engineering Center, Gazprom Dobycha Orenburg
1/2, Chkalova st., Orenburg, Russia, 460058
Phone: +7 (353-2) 73-10-37
Email: a.valeev@gdo.gazprom.ru