

АВТОМАТИЗАЦИЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

И.Г. Соловьев

КОНЦЕПЦИИ И МЕТОДЫ КИБЕРНЕТИКИ В ЗАДАЧАХ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Решение проблемных задач современного природопользования на основе развитых положений теории адаптивного наблюдения и управления связано прежде всего с построением новых форм представлений моделей объектов эксплуатации, детальность описания которых должна соответствовать: обновленным целям и расширенным регуляторным ресурсам объектов управления; условиям идентифицируемости параметров модели по данным прямых или косвенных наблюдений за эволюцией ее входо-выходных состояний.

Системы реального времени, адаптивное управление и наблюдение, скважинные системы, пласт, идентификация.

Предпосылки

Анализ современных научно-технических публикаций по нефтегазовым технологиям [1–21], охране ОС [28–40] и в целом природопользованию свидетельствует о масштабном распространении некогда модных идей и методов технической кибернетики на прикладные задачи управления процессами природопользования. Свидетельство тому — широкое цитирование специальных терминов и приемов теории управления, как то: интеллектуальные скважины [1–3], адаптивные технологии [4–6], системы реального времени (РВ) [7–9, 30, 34], замкнутое управление [10, 11], наблюдатели, фильтры Калмана [12–15], идентификация [16, 28, 29, 35] и т.п.

Столь поздняя восприимчивость практики к высокоэффективным методам теории управления 1980-х гг. объясняется многими причинами как субъективного, так и объективного характера, и прежде всего задержкой с реальным созданием и внедрением уже недорогих информационно-технических и программных средств, выступающих базой реализации информационно-емких схем анализа и управления.

Методы теории и практики управления стали приобретать особое значение в современных задачах теоретической и экспериментальной физики. Масштабное внедрение кибернетики, и в частности идей замкнутого управления, связывается с развитием в 1990-х гг. двух новых областей: «управление хаосом» и «управление квантовыми системами». По данным «Science Citation Index» [22], динамика публикаций по названным темам в рецензируемых журналах имеет порядковый рост.

Актуальность новейших подходов замкнутого управления разработкой месторождений подтверждается вопросами, выносившимися на обсуждение на специализированном международном совещании «Closed-loop Reservoir Management» (23–26 June 2008, Belgium) под эгидой International SPE. Вот некоторые из них:

- какова оптимальная частота обновления модели коллектора и стратегий разработки;
- как лучше соотносить (комбинировать) медленную динамику управления коллектором и быстрые процессы оптимизации продуктивности скважин;

— каковы характеристики наблюдаемости и управляемости переменных состояний коллектора и какие параметры модели должны идентифицироваться по данным наблюдений;

— каков оптимальный уровень детализации описания (как по пространству, так и по времени) модели коллектора для целей управления;

— каковы границы применимости законов замкнутого управления на вторичных и третичных стадиях разработки.

Несмотря на предметную принадлежность, сформулированные вопросы носят общий характер и отражают проблемные стороны становления задач управления природопользованием в современных эколого-экономических условиях.

Сущностные аспекты проблематики отражаются в следующих положениях.

1. Уровень детализации формальных описаний предметных областей, объектов анализа и управления, будь то нефтеносные коллекторы, ландшафтные модели миграции загрязнителей, теплодинамика мерзлых грунтов, разумно ограничивать условиями надежной воспроизводимости (настройки, идентификации) этих моделей по первичным данным натуральных наблюдений за процессами по месту, т.е. в естественных условиях эволюции. Данный фактор подчеркивает разделение методов и подходов прикладного назначения и общенаучного познавательного характера. В последнем случае пределы детализации моделей не ограничиваются, а, напротив, выступают главным механизмом пополнения знаний.

2. Современные подходы анализа и управления природопользованием все в большей степени апеллируют к методам принятия решения в условиях неопределенности, т.е. к методам адаптации, когда на этапе эксплуатации системы явно выделяются периоды или функции обучения (оценка скрытых состояний, изначально неопределенных, а возможно, дрейфующих параметров модели процесса, так называемая обратная задача) и периоды управления (регулирования, принятия решения — прямая задача).

Разработка теоретических основ и инструментальных средств реализации адаптивных технологий природопользования является новой, актуальной, многофакторной по приложениям научно-технической задачей.

3. Комплексный синтетический признак *реального времени* (альтернатива — системы с разделенным временем) подчеркивает тенденцию переноса и модификации методов теоретико-камерального характера исследований на стадии реальной эксплуатации по данным натуральных наблюдений. В обобщенном смысле — часть функций проектирования (расчета) системы переносится на этап эксплуатации и реализуется в режиме периодической настройки параметров технологического процесса (перманентное перепроектирование или адаптация к условиям эксплуатации). По логике построения системы реального времени почти всегда организованы как системы с обратной связью, т.е. с самоконтролем.

Направление

Реализация новых подходов и методов построения высокоэффективных систем *реального времени* (РВ) на основе развитых положений теории адаптивного наблюдения и управления применительно к задачам:

- разработки нефтяных месторождений и эксплуатации скважинных систем,
- слежения, нормирования и регулирования загрязненности территорий месторождений, включая водотоки с длительными периодами ледостава,

основывается на универсальных системных положениях [19, 23], связанных

- с построением моделей управляемых процессов,
- формализацией целевых условий, отражающих улучшенные (оптимальные) свойства конструируемой системы,
- синтезом алгоритма управления.

Если классическая теория управления разрабатывает прежде всего методы конструирования алгоритмов для стандартных (чаще удобных) форм представления моделей и целей, осложненных факторами неопределенности, то в рамках отмеченных приложений основные исследования касаются начальной стадии, связанной с созданием новых форм представления моделей управляемых процессов, отвечающих новым целевым условиям и расширенным регулировочным ресурсам объекта эксплуатации.

В отличие от классических моделей теплофизики и гидродинамики сплошных сред (подземная многофазная фильтрация, поверхностный водоток, тепло-массообмен в условиях фазовых превращений) кибернетические методы синтеза апеллируют к множественным формам представлений одних и тех же объектов управления с различной степенью агрегирования и детальности описания уже конечно-мерных осредненных состояний системы. Именно на данной стадии модельного синтеза актуализируются сформулированные ранее вопросы о детальности описания, свойствах управляемости, наблюдаемости, идентифицируемости, делимости собственных движений на «медленные» и «быстрые» (а в общем случае на многотемповые), об оптимальных периодах обновления модельных описаний и т.п.

Задачи

Технологии нефтедобычи

Мировая конъюнктура рынка энергоресурсов, тревожные перспективы освоения трудноизвлекаемых запасов углеводородов, включая месторождения не шельфе морей, существенно активизировали научные исследования и конкурентную борьбу фирм по созданию новейших методов и технических средств в разработке месторождений и эксплуатации скважин. Современные методы многостволового, наклонно-направленного и горизонтального бурения, повышения продуктивности скважин на основе гидроимпульсных воздействий (ГИВ) и гидроразрыва пласта (ГРП), обустройство скважин уникальными средствами глубокого контроля и регулирования притоков по этажам многопластовой залежи [24, 25] создают реальную основу качественного совершенствования технологий нефтедобычи и повышения нефтеотдачи пластов на основе гидродинамического замкнутого адаптивного управления [10, 11].

Управление разработкой

Накопленный опыт эксплуатации некогда революционной для отрасли идеи (закрепленной с 2000 г. [26] отраслевым стандартом) о непрерывном сопровождении проекта разработки месторождения на основе создания компьютерной постоянно-действующей геолого-технологической модели (ПДГТМ) позволяет утверждать следующее.

1. Современные геоинформационные платформы и реализуемые на их основе ПДГТМ многофункциональны и находят полезное применение как на этапах проектирования, так и при эксплуатации месторождений. ПДГТМ может выступать основой построения интегрированной базы данных по сопровождению процесса разработки, с помощью которой осуществляются ретроспективный анализ, административный контроль и планирование геолого-технических мероприятий (ГТМ).

2. Расширение сфер использования ПДГТМ на основе универсализации и, как следствие, усложнения закладываемых механизмов многокомпонентной, многофазной фильтрации в анизотропных средах порождает проблемы иногда «непреодолимого характера», в частности:

- программная реализация, первичная настройка, сопровождение и эксплуатация такой системы оказывается не только трудоемким, но и затратным делом;

- главная предпосылка — обеспечения повышенной точности анализа и прогноза оказывается чаще несостоятельной:

- чем сложнее модель, тем труднее ее настроить (идентифицировать) по данным истории разработки, условия идентифицируемости для расширенного поля настраиваемых параметров, как правило, не выполняются;

- априорная настройка параметров модели по данным лабораторных геофизических испытаний кернов и флюидов возможна для некоторых характеристик коллектора, но в узком диапазоне состояний системы;

- уточненная настройка параметров модели прискважинных зон значительно огрубляется по сути неизвестными фильтрационно-емкостными и упругими свойствами коллектора в межскважинных зонах;

- усложненная (универсальная, детальная) форма представления модели гидродинамики и нефтенасыщенности коллектора «выводит» нас из области аналитического синтеза оптимальных стратегий управления процессом разработки.

В практике проектирования ПДГТМ используется лишь на заключительных стадиях сравнительного анализа конкурентных вариантов разработок. В формировании собственно исходного множества альтернативных стратегий аналитические формы представления ПДГТМ не используются, что существенно снижает эффективность процесса проектирования.

Обозначенные проблемы построения, сопровождения и применения универсальных моделей месторождений, реализуемых на геоинформационных платформах, активизировали новые, более прагматичные направления исследований по созданию замкнутых технологий регулирования. Суть инноваций — в непрерывном сопровождении (обновлении) моделей иерархически организованной системы управления разработкой месторождения, детальность описания которых определяется прежде всего двумя факторами:

- целями, а также расширенными регулировочными ресурсами системы соответствующего уровня иерархии;

- условиями идентифицируемости параметров модели по данным прямых или косвенных наблюдений за эволюцией ее входо-выходных состояний.

В свете изложенного построение иерархически субординированных целей управления и соответствующих уровням моделей эксплуатационного объекта, параметры и состояния которых оцениваются методами адаптивного наблюдения,— одна из ключевых задач создания адаптивных систем управления разработкой месторождений.

Более развернутое пояснение задач данного направления изложено в [10].

Управление скважинными системами

Современные технологии многостволового бурения с одновременным дренированием скважиной нескольких нефтеносных горизонтов, нарезка продольных стволов позволяют строить высокопродуктивные структуры эксплуатационных участков, разрабатываемых с одного устья. Реализация заявленных потенциалов возможна при надлежащем обустройстве скважинных систем средствами глубинного контроля, дистанционного регулирования прито-

ков, что в современных публикациях именуется интеллектуальными скважинами [2].

Новейшие конструкции пластово-скважинных систем существенно расширяют границы управляемости эксплуатационных режимов, когда нормы отборов и нагнетаний по горизонтам доопределяются по результатам контроля текущего состояния обводненности и зональной выработки участка.

Регламентированные методики гидродинамического исследования скважин (ГДИС) [27], действующие правила проектирования не удовлетворяют современной практике конструирования скважин со сложно построенной структурой забоя. Более того, практикуемые методы ГДИС надежно не интерпретируют модель призабойной зоны в случае ГРП.

Изложенное свидетельствует об актуальности задач проектирования и регулирования объединенными пластово-скважинными комплексами на основе развития идей и методов адаптивного управления и наблюдения. Создание и сопровождение новых форм представления гидрогазодинамических моделей объединенной системы «призабойная зона — скважина — насос» существенно расширяют функционал системы автоматизированного контроля над процессом эксплуатации скважин за счет новых задач, в числе которых:

- непрерывное слежение за глубинными гидродинамическими состояниями системы;
- регулярное обновление данных о дрейфующих параметрах притока в забой и призабойную зону коллектора;
- непрерывная диагностика подъемника (насос + НКТ) по факторам:
 - уменьшение проходных сечений гидравлического тракта (парафино-солевые отложения);
 - уменьшения производительности насоса;
 - возникновение утечек и перетоков.

Исследования по созданию новых форм представления гидродинамических моделей многозабойных скважин с распределенными функциями регулирования притоков, по формализации целевых условий оптимальной эксплуатации скважин полностью соответствуют единой концепции о построении иерархически субординированных моделей в системах управления разработкой месторождений.

Охрана окружающей среды

Фактор управляемости государственной системы охраны окружающей среды (ОС) и природных ресурсов имеет двойную природу.

С социальной точки зрения под управляемостью понимается уровень правовой и дисциплинарной обеспеченности основных критериальных положений о предельно-допустимых нормах загрязнения воздуха, воды и почвогрунтов.

С методической точки зрения под управляемостью можно понимать меру соответствия между закладываемыми в проект (желаемыми) нормами качества ОС и фактическим состоянием показателей качества среды в условиях реального природопользования.

Существует явная зависимость между социально-правовой (СУ) и методической управляемостями (МУ). Низкие уровни МУ «размывают» характеристики правовой ответственности, снижая уровень СУ. С другой стороны, создание более точных многофакторных методик нормирования (усиление МУ) качественно усложняет расчетные схемы проектирования, расширяя функции и статус территориальных служб экологического регулирования, что в свою

очередь порождает противления и иные социально-правовые дилеммы фактической реализации экономической деятельности.

Недостатки действующего субъектно-ориентированного регламента нормирования и контроля источников загрязнения ОС объясняется следующими очевидными причинами.

1. Нормируются суммарные объемы воздействий (сбросы, выбросы, количество отходов) в исчислениях за год. При этом не лимитируется график распределений сбросов в пределах года, что по сути легализует пики экстремальных сверхлимитных загрязнений зональных сред.

2. Отсутствует регламент распределенного нормирования воздействий для группы субъектно-независимых источников, что также легализует возможные суммарные сверхлимитные концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) в среде.

3. В расчетах не учитывается действие вторичных источников загрязнений, обусловленных запаздывающим взаимовлиянием загрязнений сопрягаемых кумулятивных зон и сред, что особенно характерно для водотоков. Это — донные отложения, береговые наносы, сорбция ЗВ ледовым покровом, поверхностный сток.

4. Отсутствуют механизмы оперативного регулирования воздействий по контролю реального состояния загрязненности ОС. Иными словами, регулирование в реальном времени посредством обратной связи отсутствует.

Обозначенные выше факторы «хаоса» работы системы управления охраной ОС эффективно устраняются на основе создания комплексных территориальных моделей, учитывающих массообменные механизмы аккумуляции, миграции и трансформации ЗВ, внесенных нормативно учетными источниками загрязнений.

Как ранее отмечалось, создание многофакторных расчетных схем нормирования на основе территориальных моделей взаимовлияния кумулятивных зон приводит к трудностям в сфере социальной управляемости. Сложности комплексного учета, описания эволюции состояний природных сред и, как следствие, множественные формы представления моделей, регулируемых процессов обуславливают низкую правовую защищенность результатов нормирования и контроля.

Усиление правового статуса модельных технологий управления возможно на путях перехода к методам реального времени, когда искомые параметры кинетики процессов миграции и ассимиляции ЗВ между нормативно согласованным множеством кумулятивных зон восстанавливаются и обновляются по данным регулярных натуральных наблюдений за состоянием их загрязненности.

Изложенное объясняет концептуальную основу построения адаптивных (самонастраивающихся) технологий управления охраной окружающей среды.

Анализ литературных источников [28–40] свидетельствует о масштабном распространении геоинформационных технологий мониторинга и управления состоянием ОС, реализуемых по принципу замкнутого регулирования в реальном времени [28–30].

Исследования, связанные с созданием новых систем водопользования на основе технологий РВ, включают разработку:

— *теоретических положений по синтезу множественных форм представления массообменных моделей аккумуляции, миграции и трансформации ЗВ для поверхностных водных объектов и окаймляющих кумулятивных зон в условиях действия сезонно-климатических и природных факторов севера Западной Сибири;*

— соответствующих алгоритмов и программных средств адаптивного наблюдения за состоянием загрязненности зон и источников сбросов;
— новых положений по расчету нормативных графиков сбросов и регламенту их коррекции в условиях взаимовлияния зон по данным регулярных натурных наблюдений;
— моделей и алгоритмов управления качеством поверхностных вод на основе сезонной аккумуляции водных и криогенных ресурсов территории с последующим пролонгированным использованием для разбавлений [39, 40], консервации и сепарации ЗВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ajayi A., Konopczynski M., Sukkestad T. Network Approach for Optimization and Control of Intelligent Well Systems: Theory and Practice // SPE 110641. 2007
2. Mathieson D., Giuliani C., Ajayi A., Smithson M. Intelligent Well Automation — Design and Practice // SPE 103082. 2006.
3. Muradov K. M., Davies D. R. Zonal Rate Allocation in Intelligent Wells // SPE 121055. 2009.
4. Дзюба В.И. Гидродинамическое моделирование разработки месторождений углеводородов. Проблемы и перспективы // Нефтяное хозяйство. 2007. № 5. С. 78–81.
5. Миллионщиков Н.В., Слепцов Д.И. Об адекватности компьютерных геолого-технологических моделей // Нефтяное хозяйство. 2007. № 2. С. 60–61.
6. Glandt C. A. Reservoir Management Employing Smart Wells: A Review. SPE Journ. 12. 2005. P. 281–288 // SPE 81107.
7. Zdolnik S., Pashali A., Markelov D., Volkov M. Real-time Optimization Approach for 15,000 ESP Wells // SPE 112236. 2008.
8. Saputelli L., Nikolaou M. and Economides M.J. Real-time reservoir management: A multiscale adaptive optimization and control approach // Computational Geosciences. 2006. No 10. P. 61–96.
9. Guyaguler B., Papadopoulos A.T., Philpot J.A. Feedback Controllers for the Simulation of Field Processes // SPE 118969. 2009.
10. Соловьев И.Г. Иерархия адаптивных технологий нефтедобычи реального времени // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2008. № 2. С. 20–28.
11. Going W. S., Thigpen B. L., Chok P. M., Anderson A. B., Vachon G. P. Intelligent Energy Conference and Exhibition, 11–13 April 2006, Amsterdam, The Netherlands. Intelligent-Well Technology: Are We Ready for Closed-Loop Control? // SPE 99834. 2006.
12. Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Фомин В.В. Технология адаптивного наблюдения глубинных состояний гидродинамики нефтяных скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2007. № 8. С. 30–34.
13. Gao G., Li G., Reynolds A. C. A Stochastic Optimization Algorithm for Automatic History Matching // SPE 90065.
14. Gu Y., Oliver D. S. An Iterative Ensemble Kalman Filter for Multiphase Fluid Flow Data Assimilation // SPE 108438.
15. Zhang D., Lu Z., Chen Y. Dynamic Reservoir Data Assimilation with an Efficient Dimension-Reduced Kalman Filter // SPE 95277.
16. Соловьев И.Г., Говорков Д.А. Идентификация гидродинамических параметров скважины, оборудованной погружным насосом с наблюдателем процесса разгазирования нефти в подъемнике: (Основы методики I) // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2009. № 3. С. 28–33.
17. Сыртланов В.Р., Денисова Н.И., Хисматуллина Ф.С. Некоторые аспекты геолого-гидродинамического моделирования крупных месторождений для проектирования и мониторинга разработки // Нефтяное хозяйство. 2007. № 2. С. 70–74.
18. Мугалев И., Курносоев С. Роль информационных технологий в развитии современных предприятий топливно-энергетического комплекса // Нефтяное хозяйство. 2007. № 10. С. 42–44.

19. Соловьев И.Г. Концептуальные основы и системные принципы управления гибкими автоматизированными технологиями нефтедобычи // Изв. вузов. Нефть и газ. Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. № 5. С. 62–69.
20. Мухаметзянов Р.Н., Фахретдинов Р.Н., Стрижнев К.В. и др. Аспекты применения геолого-гидродинамического моделирования для проектирования и мониторинга геолого-технических мероприятий // Нефтяное хозяйство. 2007. № 10. С. 86–89.
21. Joint Industry Project "Added value from Intelligent Well & Field systems Technology". Plans for 2008–2010 / Project Direct. Dr. David Daves [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.pet.hw.ac.uk/research>.
22. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: Принципы и примеры. СПб.: Наука, 2003. 208 с.
23. Растригин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. М.: Сов. радио, 1980. 232 с.
24. Ajayi A., Konopczynski M., Sukkestad T. Network Approach for Optimization and Control of Intelligent Well Systems: Theory and Practice // SPE 110641. 2007.
25. Goh K. C., Dale-Pine B., Yong I., Van Overschee P., Lauwerys C. Production Surveillance and Optimization for Multizone Smart Wells with Data Driven Models // SPE 112204. 2008.
26. РД 153-39.0-047-00. Регламент по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газовых месторождений / Минтопэнерго. М., 2000.
27. РД 153-39.0-109-01. Методические указания по комплексированию и этапности выполнения геофизических, гидродинамических и геохимических исследований нефтяных и нефтегазовых месторождений / Минэнерго России. М., 2002. 80 с.
28. Соловьев И.Г., Пикиноров П.В., Шмелева Т.А. Математические методы контроля нефтезагрязненности водотоков на месторождениях с длительными периодами ледостава: Модель. I // Криосфера Земли. 2008. № 2. С. 28–35.
29. Соловьев И.Г., Пикиноров П.В. Математические методы контроля нефтезагрязненности водотоков на месторождениях с длительными периодами ледостава: Идентификация. II // Криосфера Земли. 2008. № 3. С. 25–31.
30. Al-Sabhan W., Mulligan M., Blackburn G. A. A real-time hydrological model for flood prediction using GIS and the WWW // Computers, Environment and Urban Systems. 2003. No. 27. P. 9–32.
31. Ani E., Wallis S., Kraslawski A., Agachi P. S. Development, calibration and evaluation of two mathematical models for pollutant transport in a small river // Environmental Modelling & Software. 2009. No. 24. P. 1139–1152.
32. Argent R. M., Perraud J.-M., Rahman J. M. et al. A new approach to water quality modelling and environmental decision support systems // Environmental Modelling & Software. 2009. No. 24. P. 809–818.
33. Beck M. B. Water quality modelling: A review of the analysis of uncertainty // Water Resources Research. 1987. No. 23. P. 1393–1442.
34. Euren K., Weyer E. System identification of open water channels with undershot and overshot gates // Control Engineering Practice. 2007. No. 15. P. 813–824.
35. Green C. H., Van Griensven A. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds // Environmental Modelling & Software. 2007. No. 20. P. 1–13.
36. Huang S., Hesse C., Krysanova V., Hattermann F. From meso- to macro-scale dynamic water quality modelling for the assessment of land use change scenarios // Ecological Modelling. 2009. No. 220. P. 2543–2558.
37. Goodall J. L., Horsburgh J. S., Whiteaker T. L. et al. A first approach to web services for the National Water Information System // Environmental Modelling & Software. 2008. No. 23. P. 404–411.
38. Shrestha S., Kazama F., Newham L. T. H. A framework for estimating pollutant export coefficients from long-term in-stream water quality monitoring data // Environmental Modelling & Software. 2008. No. 23. P. 182–194.

39. Wang X., Homerb M., Dyerb S. D., White-Hullb C., Du C. A river water quality model integrated with a web-based geographic information system // Journ. of Environmental Management. 2005. No. 75. P. 219–228.

40. Yang W., Nan J., Sun D. An online water quality monitoring and management system developed for the Liming River basin in Daqing, China // Journ. of Environmental Management. 2007. No. 87. P. 123–131.

I.G. Solovyev

CONCEPTS AND METHODS OF CYBERNETICS IN THE PROBLEMS
OF NATURE MANAGEMENT

Solution of problem questions of modern nature management on the basis of the developed theses of adaptive observation and control theory is first of all connected with constructing new presentation forms regarding models of exploitation objects which detailed description should correspond to updated goals and broadened regulation resources of management objects; to conditions of identification ability of model's parameters after data of direct or indirect observations regarding evolution of its input-output states.

On-line systems, adaptive management and observation, well systems, bed, identification.