
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-8-685-692

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОДОБЫВАЮЩИМИ КОМПЛЕКСАМИ

С. Е. АБРАМКИН^{1,2}, С. Е. ДУШИН², Д. А. ПЕРВУХИН³

¹ *Филиал ООО „Газпром добыча Уренгой“, Уренгойское газопромысловое управление,
629306, Новый Уренгой, Россия,
E-mail: s.e.abramkin@gd-urengoy.gazprom.ru*

² *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“
им. В. И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, Россия,
E-mail: dushins@yandex.ru*

³ *Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Россия,
E-mail: kafedra_saiu@spti.ru*

Проанализированы проблемы, возникающие при разработке систем управления газодобывающими комплексами, и пути их преодоления. Отмечено, что нестационарный и случайный характер процессов газодобычи влияет на определение режима разработки месторождения, оценку технологических параметров, оптимизацию процессов добычи и подготовки газа. Газодобывающий комплекс характеризуется наличием различных типов пластовых фильтрационных систем, одновременно-раздельной добычей из нескольких пластов, разнотипностью структур сбора и технологий подготовки газа. Определена целевая функция системы управления — обеспечение заданной производительности при условиях предупреждения гидратообразования за счет достижения требуемых показателей газа по влаге и углеводородам. Путем регулирования давления газа на выходе установки создаются необходимые условия для работы газотранспортных комплексов и обеспечивается максимальное использование пластовой энергии газа и пропускной способности участка магистрального газопровода. Предложена концепция киберфизических систем — образование двух взаимосвязанных и взаимодействующих в режиме реального времени динамических подсистем, стремящихся к самоорганизации. В рамках концепции необходима разработка цифровых моделей управляемых процессов добычи газа на кустах газовых скважин, добычи газа в многопластовых залежах с помощью одной скважины, ректификации многокомпонентных смесей и систем многорежимного управления с учетом анализа большого массива данных о режимах.

Ключевые слова: *газодобывающий комплекс, система управления, цифровая модель, киберфизическая система, многорежимное управление*

Введение. Крупнейшие нефтегазоконденсатные месторождения (НГКМ) Крайнего Севера — Уренгойское и Ямбургское — находятся в стадии падающей добычи. Поэтому развитие газовой отрасли в России связано с мегапроектами ПАО „Газпром“ „Ямал“ и „Восточная газовая программа“. Эти проекты характеризуются новыми технологическими решениями, построенными на концепции малолюдных технологий. Основной проблемой в реализации

концепции является разработка автоматизированных газодобывающих комплексов (ГДК)*, включающих в себя технологические объекты добычи, подготовки и компримирования газа. Работа ГДК должна обеспечиваться единым комплексным алгоритмом управления. Согласно Техническим требованиям, автоматизированный ГДК формируется для обеспечения практически неизменной производительности промысла с учетом экономической целесообразности.

Использование традиционных подходов при построении систем управления ГДК не дает желаемого результата. В связи с этим актуальна разработка новых принципов организации автоматизированного ГДК с применением методов современной теории управления (например, нейро- и *fuzzy*-управления, робастного управления, оптимального управления на основе обратных задач математической физики, ортогональных проекций, метода аналитического конструирования нелинейных агрегированных регуляторов и т.д.).

Управляемый газодобывающий комплекс. Газодобывающие комплексы — это опасные производственные объекты со сложными непрерывными технологическими процессами (ТП), энергетическими и материальными потоками большой мощности и жесткими требованиями по производительности, качеству продукции, безопасности персонала, сохранности оборудования и воздействию на окружающую среду. Газодобывающий комплекс, с учетом функционального назначения, можно представить в виде каскадного соединения управляемых систем: газоносные пласты, скважины, газосборный коллектор (ГСК), установка комплексной подготовки газа (УКПГ). ГДК как управляемый объект представлен на рис. 1. На схеме введены следующие обозначения:

— управляемые переменные: Δp — депрессия на пласт; p_y , $p_{впк}$, $p_{мпк}$ — давление устьевого, внутрипромыслового коллектора и магистрального газопровода;

— управляющее воздействие: Q_r — расход газа;

— возмущающие воздействия: f_1, f_2, f_3, f_4 , где f_1 — воздействия на пласт, связанные с изменением местоположения газовой контактной поверхности, перетоком газа из областей высокого давления в области низкого, изменением термобарических параметров и т.д.; f_2 — воздействия на скважины вследствие их аварийных и профилактических отключений, изменения отбора газа с промысла, образования кристаллогидратов в стволе скважины; f_3 — воздействия на ГСК в связи с образованием кристаллогидратов в трубопроводах при изменениях термобарических характеристик; f_4 — воздействия на УКПГ из-за изменения термобарических параметров и расхода газа в магистральном газопроводе.

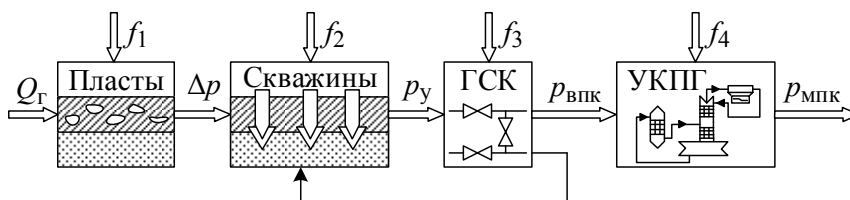


Рис. 1

Из рис. 1 видно, что основным регулируемым параметром ГДК является давление газа на входах и выходах различных систем.

ГДК — это территориально распределенные системы с многочисленными управляемыми объектами добычи, сбора и подготовки газа и конденсата. Сложность управления ими обусловлена [1, 2]:

— различием типов пластовых фильтрационных систем (ПФС) — сеноманские, валанжинские, ачимовские залежи, — а также одновременно-раздельной добычей из нескольких пластов;

* Автоматизированный газовый промысел. Технические требования к технологическому оборудованию и объемам автоматизации при проектировании и обустройстве на принципах малолюдных технологий. СТО Газпром 2-2.1-1043-2016. М.: Газпромэкспо, 2016. 208 с.

- рассредоточенностью объектов добычи газа (скважин) и их совместной работой на общий ГСК;
- неоднородностью пластовых пространств, случайностью внешних факторов, воздействующих на ПФС;
- разнотипностью структур сбора и технологий подготовки газа (абсорбционная осушка газа, низкотемпературная сепарация газа);
- реконфигурацией УКПГ во времени в связи с падением давления в пласте;
- зависимостью УКПГ от технологии подготовки газа к подаче через обвязочный трубопровод;
- неравномерностью отбора газа магистральным газопроводом.

Особенностью многопластовых систем является разработка двух пластов одной скважиной (одновременно-раздельная эксплуатация), при этом характер процессов газодобычи нестационарный и случайный. Это влияет на выбор режима разработки месторождения, оценку технологических параметров, оптимизацию процессов добычи и подготовки газа.

При разработке газовых залежей требуется обеспечить поддержание устьевых давлений в целях транспортирования газа по ГСК; при разработке газоконденсатных — не только транспортирование, но и отделение конденсата путем дросселирования с использованием энергии газа высокого давления.

Начало процесса разработки месторождений природного газа включает управление топологией (или структурой) ПФС [1], которое заключается во вскрытии залежи системой скважин. Система скважин разбивает всю залежь на зоны дренирования. При обеспечении максимальных дебитов происходят разрушение пласта, прорывы краевой воды и подтягивание конусов подошвенной воды в газоносный пласт с увеличением площади газоводяного контакта. Преодолеть эти проблемы можно за счет управления: структурой ПФС — оптимизируя расположение скважин с целью равномерного распределения пластового давления; поведением ПФС — изменяя дебиты добывающих скважин при заданных ограничениях.

Управление процессами осушки природного газа и извлечения конденсата на УКПГ необходимо для нормальной работы газотранспортной системы. Природный газ, добываемый из подземных источников, насыщен капельной влагой, тяжелыми углеводородами и механическими примесями, это может привести к аварийным ситуациям при его транспортировке по магистральным газопроводам. Также возможны снижение пропускной способности трубопроводов и повреждение технологического оборудования вследствие образования гидратов.

Производительность УКПГ, определяемая поддержанием давления газа на выходе установки, задается такой, чтобы обеспечить условия для работы магистральной компрессорной станции и максимально использовать пластовую энергию газа и пропускную способность магистрального газопровода.

Разработка системы управления газодобывающим комплексом. Основной целевой функцией системы управления ГДК является поддержание заданной производительности при условиях предупреждения гидратообразования, что достигается обеспечением требуемых показателей газа по влаге и углеводородам [3]. Задача эффективного (оптимального) управления работой ГДК не решена в полной мере. Это связано в значительной мере с отсутствием адекватных математических моделей (ММ) и алгоритмов диспетчерского управления всеми ТП ГДК. Применение ММ при проектировании систем управления ТП ГДК обусловлено требованиями „Автоматизированный газовый промысел...“, предусматривающими разработку единого комплексного алгоритма управления и системы поддержки принятия решений, основанных на моделировании процессов в режиме реального времени.

Традиционные подходы к построению систем управления ГДК, основанные на представлении ММ с сосредоточенными параметрами, не приводят к требуемому результату. Зачастую при исследовании, например ТП в УКПГ, основное внимание уделяется получению

статических и динамических моделей отдельных устройств, а не комплекса в целом. Статические модели, по существу, определяют основные потоки субстанций при нормальной эксплуатации промышленных установок. Динамические модели, как правило, формируются в результате линеаризации при малых отклонениях от равновесных режимов и находят применение для разработки локальных контуров регулирования.

Накопленный опыт в этой области позволяет сделать вывод, что зачастую используемые ММ мало соответствуют реальным объектам, они не в состоянии адекватно отразить физику реальных ТП на нестационарных режимах, не позволяют формализовать все многообразие возмущающих факторов, которые в значительной степени влияют на различные показатели эффективности функционирования системы.

Построение динамических моделей ТП ГДК в виде дифференциальных уравнений в частных производных позволяет рассматривать их как объекты управления с распределенными параметрами. Ввиду сложности физических явлений и нелинейного характера взаимодействующих фаз основным методом исследования таких систем становится численное моделирование процессов [3].

Некоторые современные направления разработки систем управления ГДК представлены в работах [4—8]. В настоящее время перспективу развития автоматизации и управления ТП ГДК связывают с разработкой и внедрением в производство киберфизических систем (КФС) — автономных систем, объединенных в глобальную сеть с использованием облачных технологий, — что составляет суть программы „Индустрии 4.0“. Именно на концепции КФС должны базироваться создание и эксплуатация современных систем управления ГДК [9].

Концептуальный подход к построению КФС можно представить на примере комплекса абсорбционной осушки природного газа (КАОПГ), входящего в состав УКПГ. Предполагается рассмотрение системы управления КАОПГ как нового объекта проектирования и эксплуатации более высокого уровня иерархии, представляющего взаимодействие физического объекта с цифровой (компьютерной) моделью (ЦМ) — цифровым двойником. Цифровая модель системы управления КАОПГ при этом является неотъемлемой частью КФС, хотя физическая часть системы должна работать и при отсутствии (отключении) цифрового двойника. Таким образом, ЦМ системы управления КАОПГ можно рассматривать как управляющее устройство для всей киберфизической системы, находящейся на более высоком уровне иерархии, нежели контроллер, предназначенный только для управления физическим объектом. Следовательно, функции модели расширяются до управляющей [9].

Физическая система, состоящая из объекта управления (установки) и контроллера в замкнутом контуре регулирования по жидкой фазе, и ее ЦМ должны динамически взаимно согласовываться в соответствии с поставленной целью управления не только на этапе проектирования, но и в процессе эксплуатации (в режиме реального времени), что составляет важнейшую особенность работы КФС. По сути, здесь уместно говорить о синергетическом подходе — теории самоорганизации неравновесных процессов, рекомендуемом к практическому применению на современном этапе развития теории управления [10]. Именно такое образование двух взаимосвязанных и взаимодействующих в режиме реального времени динамических подсистем, стремящихся к самоорганизации, представляет собой КФС.

Киберфизический подход на стадиях проектирования и эксплуатации систем управления предъявляет к моделям такие же требования, как и при решении задачи идентификации объектов в составе общей процедуры синтеза систем управления: на основе критериев функционального подобия формируется целевая „близость“ моделей к реальным (физическим) объектам. Тем самым происходит разрешение системного парадокса Ротача. Для повышения эффективности степень близости должна устанавливаться на топологическом, структурно-операторном и параметрическом рангах неопределенности системы [11].

Согласованная работа физической системы (объекта) и ЦМ проиллюстрирована на рис. 2 (А — абсорбер; РК — ректификационная колонна; И — испаритель; К — контроллер физической системы; Р — регулятор цифровой модели). Измеренные и/или оцениваемые данные о состоянии физической системы (о динамической ситуации) сопоставляются с данными о состоянии ЦМ, и в случае их несоответствия производится коррекция ЦМ системы как в части модели объекта (осуществляется текущая идентификация объекта), так и в управляющей части (регулятора) модели. В свою очередь, по данным с ЦМ системы устройство идентификации и коррекции получает информацию для структурного синтеза или параметрической настройки контроллера (адаптация) либо формирования корректирующего сигнала физической системы. Ограничения по работе КФС связаны с временными затратами ЦМ на обработку входных данных и вычисления (моделирование процессов), которые практически не должны влиять на реальные ТП физической системы.

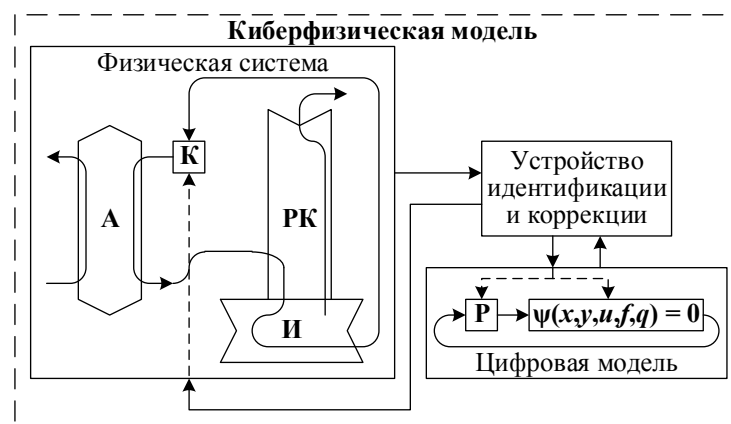


Рис. 2

В рамках концепции КФС необходимо разрабатывать модели управляемых процессов добычи газа на кустах газовых скважин, модели управляемых процессов добычи в многопластовых системах с помощью одной скважины, модели управляемого процесса ректификации многокомпонентных систем.

Киберфизический подход допускает также обработку больших данных, например, с помощью *Data mining* [12, 13], которые формируются в процессе длительной эксплуатации месторождения на основе измерений значительного количества параметров ТП. Для повышения эффективности управления ТП целесообразно применять концепцию многорежимного управления [14] в сочетании с информацией о режимах работы, хранящейся в базе данных. На ее основе устанавливается технологический режим добычи газа для каждой установки. Однако на сегодняшний день не существует системы, которая позволяла бы эффективно обрабатывать и выдавать решения с целью управления ГДК.

Заключение. Проанализированы проблемы в управлении ТП ГДК. Определена целевая функция системы управления ГДК — поддержание заданной производительности при условиях предупреждения гидратообразования, что достигается обеспечением требуемых показателей газа по влаге и углеводородам. Отмечено, что недостаточно используются методы математического моделирования. Основой разработки и эксплуатации систем управления ГДК предложено принять концепцию киберфизических систем. В рамках концепции необходима разработка цифровых (компьютерных) динамических моделей управляемых процессов добычи газа на кустах газовых скважин, добычи газа в многопластовых системах с помощью одной скважины, ректификации многокомпонентных систем и систем многорежимного управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев Ю. Н.* Автоматизированная система управления разработкой газовых месторождений. М.: Недра, 1987. 141 с.
2. *Тараненко Б. Ф., Герман В. Т.* Автоматическое управление газопромысловыми объектами. М.: Недра, 1976. 213 с.
3. *Абрамкин С. Е., Душин С. Е.* Моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа. СПб: Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2015. 160 с.
4. *Ананенков А. Г., Ставкин Г. П., Талыбов Э. Г.* АСУ ТП промыслов газоконденсатного месторождения Крайнего Севера. М.: Недра-Бизнесцентр, 1998. 271 с.
5. *Харазов В. Г.* Интегрированные системы управления технологическими процессами. СПб: Профессия, 2009. 592 с.
6. *Балавин М. А., Продовиков С. П., Шайхутдинов А. З.* и др. Автоматизация процессов газовой промышленности. СПб: Наука, 2003. 496 с.
7. *Андреев Е. Б., Ключников А. И., Кротов А. В.* и др. Автоматизация технологических процессов добычи и подготовки нефти и газа / Под общ. ред. *В. Е. Попадько*. М.: Недра-Бизнесцентр, 2008. 399 с.
8. *Еремин Н. А.* Современная разработка месторождений нефти и газа. Умная скважина. Интеллектуальный промысел. Виртуальная компания. М.: Недра-Бизнесцентр, 2008. 244 с.
9. *Исмагилов Р. Н., Абрамкин С. Е., Душин С. Е.* Состояние и перспективы развития автоматизации установок комплексной подготовки газа на УНГКМ // Перспективные направления развития Уренгойского комплекса: сб. науч. тр. ООО „Газпром добыча Уренгой“. М.: Недра, 2018. С. 271—281.
10. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / Под ред. *А. А. Колесникова*. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч. II. 559 с.
11. *Вавилов А. А.* Структурный и параметрический синтез сложных систем. Л.: Изд-во ЛЭТИ, 1981. 95 с.
12. *Майер-Шенбергер В., Кукьер К.* Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живем, работаем и мыслим. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014. 221 с.
13. *Селезнев К.* Проблемы анализа больших данных // Открытые системы. СУБД. 2012. № 7. С. 25—29.
14. *Филимонов Н. Б.* Концепция многорежимного регулирования // Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками: Межвуз. сб. науч. тр. Новосибирск: НЭТИ, 1988. С. 88—92.

Сведения об авторах

- Сергей Евгеньевич Абрамкин** — канд. техн. наук; филиал ООО „Газпром добыча Уренгой“ УГПУ; ведущий инженер по добыче нефти и газа; СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, кафедра автоматики и процессов управления; E-mail: s.e.abramkin@gd-urengoy.gazprom.ru
- Сергей Евгеньевич Душин** — д-р техн. наук, профессор; СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, кафедра автоматики и процессов управления; E-mail: dushins@yandex.ru
- Дмитрий Анатольевич Первухин** — д-р техн. наук, профессор; СПГУ; кафедра системного анализа и управления; E-mail: kafedra_saiu@spmi.ru

Поступила в редакцию
05.02.19 г.

Ссылка для цитирования: Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Первухин Д. А. Проблемы разработки систем управления газодобывающими комплексами // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 8. С. 685—692.

PROBLEMS OF DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEMS OF GAS-PRODUCING COMPLEXES

S. E. Abramkin^{1,2}, S. E. Dushin², D. A. Pervukhin³

¹Gazprom Dobycha Urengoy Ltd., Urengoy Gas Production Directorate,
629306, Novy Urengoy, Russia,
E-mail: s.e.abramkin@gd-urengoy.gazprom.ru

²St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", 197376, St. Petersburg, Russia,
E-mail: dushins@yandex.ru

³St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Russia,
E-mail: kafedra_saiu@spmi.ru

The problems arising in the development of control systems of gas-producing complexes are considered and ways to overcome them are analyzed. It is noted that the unsteady and random nature of gas production processes affects the definition of the field development mode, assessment of technological parameters, optimization of gas production and treatment processes. The gas production complex is characterized by the presence of different types of reservoir filtration systems, simultaneous and separate production from several layers, different types of collection structures and gas treatment technologies. The objective function of the control system is defined as the assurance of a given performance under the conditions of hydrate formation prevention, which is achieved by providing the required gas indicators for moisture and hydrocarbons. By controlling the gas pressure at the outlet of the installation, the necessary conditions for the operation of gas transportation systems are created and the maximum use of gas reservoir energy and the capacity of the section of the main gas pipeline is ensured. A concept of cybernetic systems is proposed; this concept consists in formation of two interconnected and interacting in real time dynamic subsystems striving for self-organization. Within the framework of the concept, it is necessary to develop digital models of controlled gas production processes at gas wells, gas production in multi-layer deposits using a single well, rectification of multicomponent mixtures and multi-mode control systems, taking into account the analysis of a large array of data on modes.

Keywords: gas-producing complex, control systems, digital model, cyber physical system, multimodal control

REFERENCES

1. Vasil'yev Yu.N. *Avtomatizirovannaya sistema upravleniya razrabotkoy gazovykh mestorozhdeniy* (Automated Control System for the Development of Gas Fields), Moscow, 1987, 141 p. (in Russ.)
2. Taranenko B.F., German V.T. *Avtomaticheskoye upravleniye gazopromyslovymi ob"yektami* (Automatic Control of Gas Field Facilities), Moscow, 1976, 213 p. (in Russ.)
3. Abramkin S.E., Dushin S.E. *Modelirovaniye upravlyayemykh protsessov absorbtionnoy osushki prirodnoy gaza* (Simulation of Controlled Processes of Absorption Dehydration of Natural Gas), St. Petersburg, 2015, 160 p. (in Russ.)
4. Ananenkov A.G., Stavkin G.P., Talybov E.G. *ASU TP promyslov gazokondensatnogo mestorozhdeniya Kraynego Severa* (Process Control System for Gas Fields of the Far North Gas Condensate Field), Moscow, 1998, 271 p. (in Russ.)
5. Kharazov V.G. *Integrirovannyye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* (Integrated Process Control Systems), St. Petersburg, 2009, 592 p. (in Russ.)
6. Balavin M.A., Prodovikov S.P., Shaykhutdinov A.Z. et al. *Avtomatizatsiya protsessov gazovoy promyshlennosti* (Automation of Gas Industry Processes), St. Petersburg, 2003, 496 p. (in Russ.)
7. Andreyev E.B., Klyuchnikov A.I., Krotov A.V. et al. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov dobychi i podgotovki nefiti i gaza* (Automation of Technological Processes of Oil and Gas Production and Treatment), Moscow, 2008, 399 p. (in Russ.)
8. Eremin N.A. *Sovremennaya razrabotka mestorozhdeniy nefiti i gaza. Umnaya skvazhina. Intellektual'nyy promysel. Virtual'naya kompaniya* (Modern Development of Oil and Gas. Smart Well. Intellectual Fishing. Virtual Company), Moscow, 2008, 244 p. (in Russ.)
9. Ismagilov R.N., Abramkin S.E., Dushin S.E. *Perspektivnyye napravleniya razvitiya Urengoy'skogo kompleksa* (Perspective Directions of Development of the Urengoi Complex), Collection of scientific papers of Gazprom Dobycha Urengoy LLC, Moscow, 2018, pp. 271–281. (in Russ.)
10. Kolesnikov A.A., ed., *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya: Sinergeticheskiy podkhod v teorii upravleniya* (Modern Applied Control Theory: A synergistic approach to control theory), Taganrog, 2000, pt. II, 559 p. (in Russ.)
11. Vavilov A.A. *Strukturnyy i parametricheskyy sintez slozhnykh sistem* (Structural and Parametric Synthesis of Complex Systems), Leningrad, 1981, 95 p. (in Russ.)
12. Mayer-Schönberger V., Cukier K. *Big Data: A Revolution that Will Transform How We Work, Live and Think*, 2013.
13. Seleznev K. *Open Systems.DBMS*, 2012, no. 7, pp. 25–29. (in Russ.)
14. Filimonov N.B. *Avtomaticheskoye upravleniye ob"yektami s peremennymi kharakteristikami* (Automatic Management of Objects with Variable Characteristics), Interuniversity collection of scientific papers, Novosibirsk, 1988, pp. 88–92. (in Russ.)

Data on authors

- Sergey E. Abramkin** — PhD; Gazprom Dobycha Urengoy Ltd., Urengoy Gas Production Directorate, Leading Oil and Gas Production Engineer; St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"; Department of Automation and Control Processes; E-mail: s.e.abramkin@gd-urengoy.gazprom.ru
- Sergey E. Dushin** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"; Department of Automation and Control Processes; E-mail: dushins@yandex.ru
- Dmitry A. Pervukhin** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Mining University; Department of System Analysis and Control; E-mail: kafedra_saiu@spmi.ru

For citation: Abramkin S. E., Dushin S. E., Pervukhin D. A. Problems of development of control systems of gas-producing complexes. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 8. P. 685—692 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-8-685-692