Сергей Иванович ГРАЧЕВ[1]
Александр Владимирович СТРЕКАЛОВ[2]

УДК 532.59

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ТРЕЩИНОПОРОВЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

[1] доктор технических наук, профессор,
Тюменский индустриальный университет
grachevsi@mail.ru

[2] доктор технических наук, доцент,
Тюменский индустриальный университет
hydrasym@mail.ru

Аннотация

В последнее время наиболее актуальным становятся такие методы волнового воздействия на продуктивные пласты, как нестационарное заводнение, периодическое дренирование, гидроимпульсное и инфразвуковое воздействия на призабойную зону пласта. Эффективность волновых процессов вызвана множеством факторов: сжимаемость скелета, раскрытие трещин и в целом повышенный уровень энергетического воздействия на фильтрационные процессы. В связи с тем, что наличие сети трещин в продуктивном проницаемом коллекторе обуславливает существенную структурную неоднородность, для полноценного моделирования требуется привлечение математического аппарата из теории гидравлических цепей. Поэтому целью данной статьи является рассмотрение фундаментальных проблем моделирования гидравлических систем с развитой произвольной структурой, к которым, в частности, относятся системы трещин в трещинопоровых коллекторах. Физические и вычислительные эксперименты позволили выявить «странность» в поведении некоторых гидравлических систем, которая, в противоречие обобщению Максвелла, не выходит на стационарный режим в условиях отсутствия внешнего влияния.

Цитирование: Грачев С. И. Моделирование волновых процессов трещинопоровых коллекторов / С. И. Грачев, А. В. Стрекалов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 1. С. 52-62.
DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-52-62

© ФГБОУ ВО Тюменский государственный университет

Ключевые слова

Моделирование, гидроволны, модель, математическая функция, представление, программный вычислительный комплекс.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-52-62

Известно, что нефтегазонасыщенные пласты находятся под действием физических полей, в том числе и искусственных, создающихся для решения прикладных задач нефтегазодобычи.

Например, такие методы волнового воздействия на продуктивные пласты, как нестационарное заводнение, периодическое дренирование, гидроимпульсное и инфразвуковое воздействия на призабойную зону пласта, а также эффективность обуславливаются сжимаемостью скелета, раскрытием трещин и в целом повышенным уровнем энергетического воздействия на пластовую систему. Любой волновой процесс формируется противодействием нескольких процессов: сжатия флюидов/скелета, вязкостным трением и силами инерции (второй закон Ньютона).

Как отмечает Н. Н. Михайлов [8], пластовые системы являются совокупностью подсистем, при воздействии на которые возникает эффект, приводящий к образованию новых устойчивых структур.

На подобные парадоксальные явления в свое время обратил внимание А. Х. Мирзаджанзаде [7]. Аналогичные выводы получены в результате экспериментальных исследований нестационарного движения потока промывочной жидкости внутри бурильной колонны С. И. Грачевым и Г. А. Кулябиным [2; 3]. На основании моделирования динамического взаимодействия нижней части бурильного инструмента с буровым раствором разработана технология регулирования гидродинамической составляющей мощности буровых насосов.

Известно, что в гидравлических цепях волновой процесс формируется противодействием нескольких процессов: сжатия флюидов/скелета, вязкостного трения и сил инерции (второй закон Ньютона).

Несмотря на достаточную изученность данных процессов в отдельности, к сожалению, при моделировании процессов фильтрации в поровых и трещинопоровых средах они в комплексе не нашли отражение в общей системе уравнений, решаемой в классических (принятых в качестве основных при проектировании разработки месторождений углеводородов) симуляторах: Eclipse, Tempest, tNavigator, Техсхема и т. п. Более того, реализуемая в данных симуляторах вычислительная схема (полностью или частично неявная) не позволяет прогнозировать негармонические колебания, вызванные историей гидродинамического воздействия на продуктивные пласты и любые гидравлические цепи, в принципе.

Вследствие этого наиболее достоверное моделирование волновых процессов в поровой и трещиноватой среде крайне важно в текущих тенденциях.

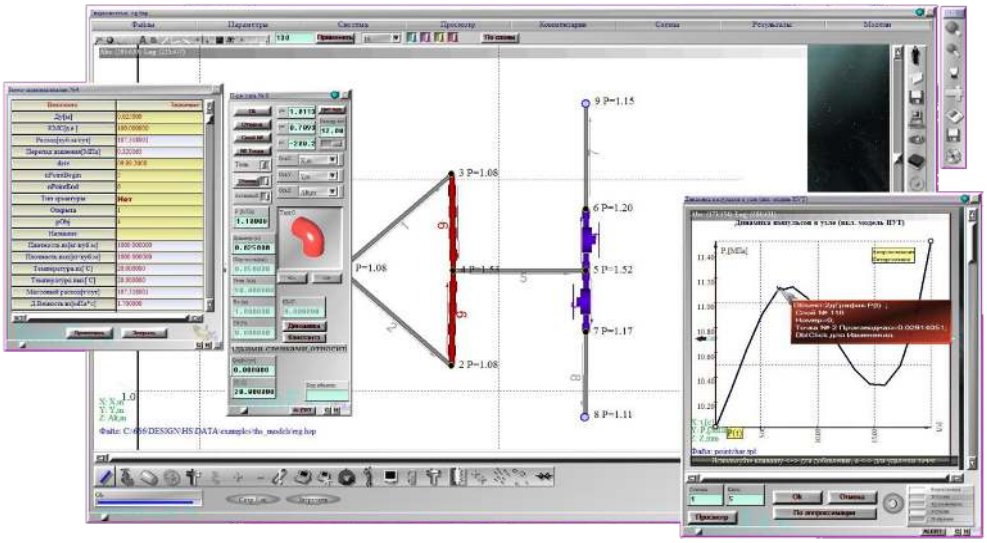


Рис. 1. Моделирование волновых процессов
в вычислительной стендовой установке в ВПК Немезида

Авторами данной статьи разработан и используется вычислительный программный комплекс (ВПК) Немезида [13] (ст. Гидрасим) (рис. 1), апробированный множеством научных работ и подтвержденный многочисленными промысловыми и лабораторными экспериментами, в частности [9; 12].

В 2008 г. была создана стендовая установка для испытания разветвленной гидросистемы в условиях нестационарных волновых процессов, в т. ч. гидроударов. Результаты стендовых испытаний подтверждают корректность разработанной модели [9] посредством сопоставления результатов вычислительных экспериментов на ВПК и физической модели (стендовой установки).

Задачи ВПК охватывают прогнозирование гидродинамических показателей в наземных трубопроводных сетях, скважинах, пластах, трещинах и внутрипоровом пространстве на основе обобщения законов сохранения массы, энергии и законов вязкостного трения в любых по природе средах. Модель, заложенная в основу программного комплекса, является полностью нелинейной, нестационарной и неизотермической, учитывающей закон инерции и, как следствие, волновые процессы. Это позволяет расширить спектр задач, объединяющий тепловые, гидромеханические, химические и механические процессы.

Вследствие наибольшей универсальности разработанная модель ВПК позволяет прогнозировать как гармонические, так и негармонические колебания, являющиеся естественными или следствием работы элементов управления, параметрами энергообмена и физическими свойствами текучих сред (рис. 2). Математический аппарат для моделирования волновых процессов в конечно-разностном выражении описан в работах [4; 9; 12].

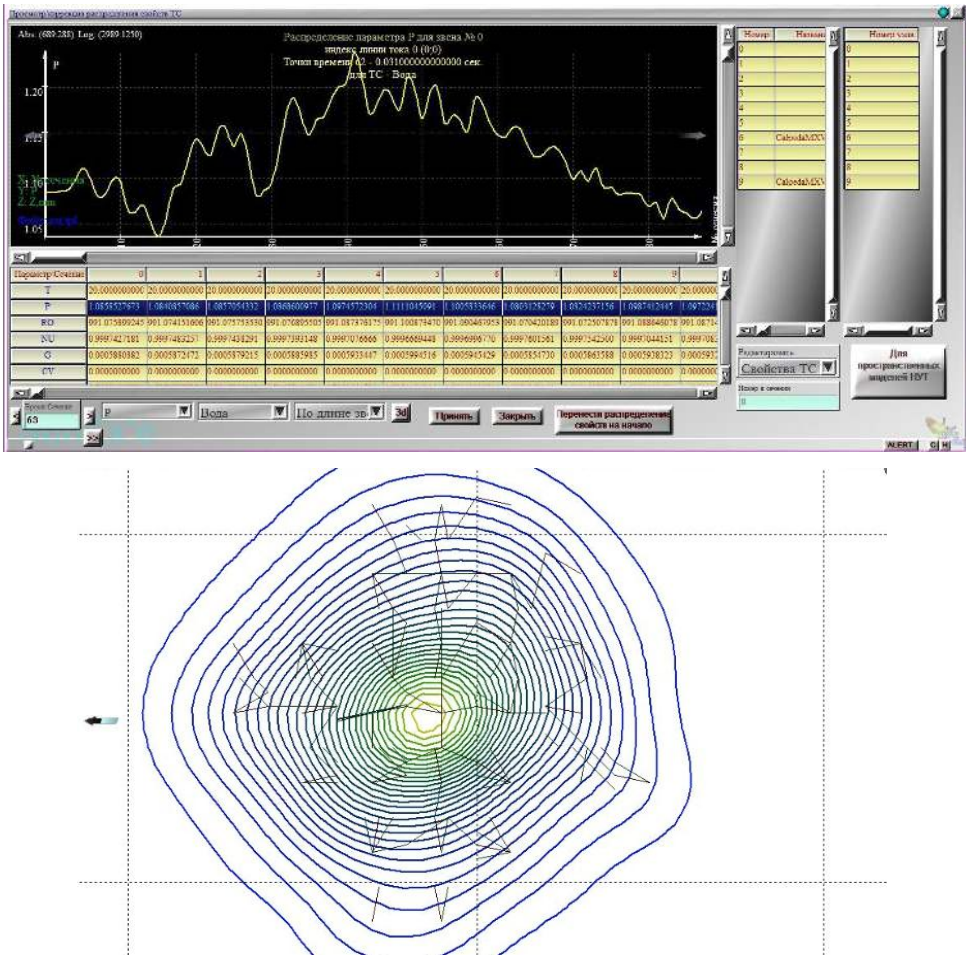


Рис. 2. Демонстрация волнового процесса
в системе трещин продуктивного пласта ВПК Немезида

В данной статье показаны некоторые весьма интересные для гидромеханики результаты, имеющие прямое отношение к решению задач контроля и регулирования гидравлических систем.

Особенно важно отметить, что при условии существования в продуктивных коллекторах сети трещин особое внимание требуется уделять технологии гидродинамического воздействие на пласты, так как структурная неоднородность сети каналов со сверхпроводимостью является решающим фактором при планировании мероприятий по повышению эффективности извлечения углеводородов. По сути, сеть трещин является аналогом гидравлической цепи [6] и в наиболее общем виде описывается известными замыкающими отношениями [4; 6; 11].

Последние исследования авторов как наследие более старых исследований [2; 3] направлены на изучение нестационарных процессов в техногенных и природных гидравлических системах.

В ходе ранних стендовых испытаний [2; 3] и в 2008 г. [9] было обнаружено «странное свойство» некоторых гидравлических систем: при определенных условиях запуска гидросистема не выходит на стационарный режим.

Вместе с тем известно, что любая система стремится перейти от неравновесного состояния к равновесному, т. е. стационарному или квазистационарному состоянию, в котором во всех узлах системы устанавливается определенные давления, а в участках системы определенные расходы. На этом принципе, например, основан часто применяемый метод исследования скважин — снятие и обработка «индикаторных линий и диаграмм». На данном же принципе основаны методы решения задачи потокораспределения [6, 11].

В результате ряда вычислительных и подтверждающих их лабораторных экспериментов (на стендовой установке) установлен крайне важный и нетривиальный факт — в зависимости от структуры системы, параметров ее элементов, начальных условий и условий на ее границах гидравлическая система может не выходить на стационарный режим, характеризующийся условно постоянными давлениями и скоростями потоков в элементах системы.

Очевидно, данный вывод должен противоречить обобщению теоремы Максвелла о принципе наименьшего теплового действия на гидравлические цепи. Как известно, на основе последнего принципа построить универсальную вычислительную схему для решения задачи потокораспределения так и не удалось.

Из такой ситуации гипотетически можно было бы предположить невозможное: нарушение закона сохранения энергии. Однако разумеется, что это не так.

Основным признаком такого особого состояния гидросистемы, когда она не выходит на стационарный режим, является сохранение автоколебаний давления и скоростей в некоторых участках системы со сдвигом фаз и разными амплитудами. Иными словами, когда в одном из участков наблюдается снижение скорости течения и снижение диссипации гидравлической энергии в тепловую, в другом элементе в это время прослеживается рост скорости и перепада давления на вязкостное трение.

При этом, если в ходе стендовых испытаний на систему оказывает воздействие сжимаемость гидравлических каналов и работа насосного агрегата, а также множество не учитываемых слабых факторов, то при гидродинамическом моделировании, однако, автоколебания все равно фиксируются, хотя эти факторы не учитываются.

Другим важным моментом является то, что гидросистема не является замкнутой, а имеет на границе постоянное давление. При этом скорость потоков со стороны узлов отрыва гидросистемы от внешней среды (например,

законтурная область пласта или емкости с постоянным давлением) изменяется в колебательном гидравлическом процессе. Таким образом, низкий уровень энергии в одних участках системы компенсируется со стороны внешних гидравлических систем как в конечных узлах модели, так и в экспериментальной установке.

Получается, что система находится на таком же энергетическом уровне, как и идеально вышедшая на стационарный режим, хотя в отдельных узлах и участках структуры происходят незатухающие колебания с амплитудой до 0,5-5 МПа.

Так как для вычислительных экспериментов использовалась полностью явная схема вычисления с шагом 1 мкс, и при этом соблюдалась гладкость решения, то можно прийти к обоснованному теоретическому выводу о том, что данные автоколебания не являются результатом неточностей вычислительного эксперимента или результатом ошибок лабораторных экспериментов [2; 3; 9].

Экспериментально также уставлено, что одна и та же гидросистема с различных начальных распределений давления переходит в различное условно стационарное состояние (рис. 3 *б* и *в*). Т. е. уровень энергии в общем по системе одинаков, при этом характеристики автоколебаний могут отличаться.

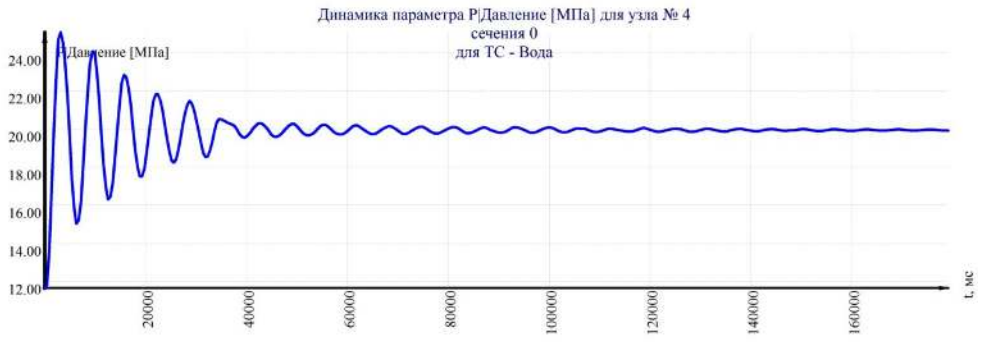
Следует отметить, что, рассчитывая любые гидравлические системы, будь то наземные сети с развитой структурой или продуктивные пласты с изотропной или трещиноватой структурой, и предполагая оптимальным и технологически номинальным (или даже возможным) состоянием системы исключительно стационарный режим (как на рис. 3 *а*), мы находимся в некотором заблуждении. Иначе говоря, волновые процессы в природе гидросистем являются одним из средств сохранения их состояния с наименьшим уровнем диссипации энергии.

Данный вывод тесно связан и с пониманием стационарного состояния в квантовой физике.

Колебательный волновой процесс формируется так, что потенциальная величина давления стационарного состояния находится ровно между максимумом и минимумом давления с периодическим профилем волны как при субгармонических (рис. 3 *в*), так и не гармонических (рис. 3 *б*) колебаниях.

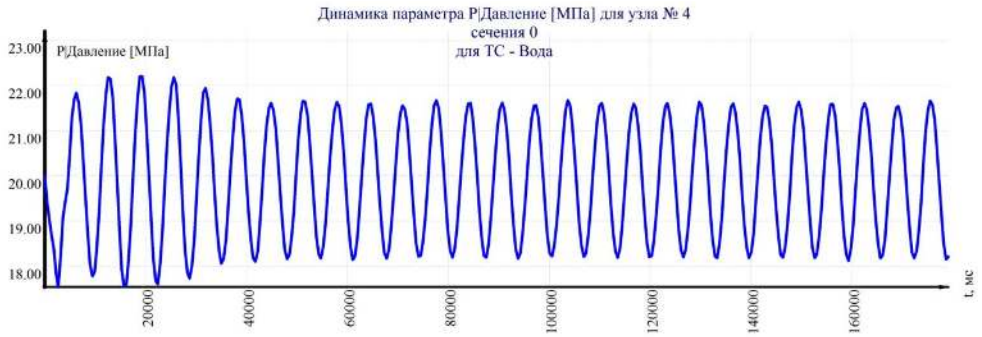
В таких неклассических условиях «квазистационарных процессов» материальный баланс в узловых соединениях не соблюдается (рис. 4), из-за чего и меняется давление, вследствие сжимаемости среды.

Как уже отмечалось [4], волновые процессы в продуктивных коллекторах с развитой сетью трещин (рис. 2) требуют дальнейшего изучения и технологического использования с целью повышение нефтеотдачи пластов с низкой поровой проницаемостью. Здесь важно отметить учет тепловых эффектов [1] при волновых процессах в системах с разветвленной структурой.



а)

б)



в)

Рис. 3. Динамика давления узла 4 с различных начальных давлений:
а — 11 МПа; б — 5 МПа; в — 20 МПа

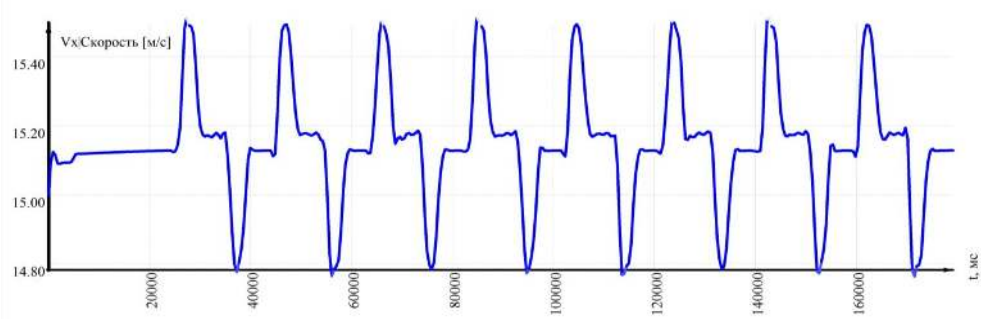


Рис. 4. Динамика скорости в одном из участков гидросистемы для случая запуска с давления 5 МПа

Дальнейшим развитием понимания волнового энергообмена в пластовых и наземных гидросистемах является оценка волновых процессов в многофазных взаиморастворимых средах. При этом свойства жидкостей и газов вносимых в ПВК должны непосредственно описываться PVT-функциями и системой взаимодействия макрокомпонентов. Последнее позволяет учитывать взаимное трение и переходные массообменные процессы фаз [5] и компонентов, заменяя уравнения состояния в наиболее универсальной постановке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакулин А. А. Диагностика теплофизических параметров в нефтегазовых технологиях / А. А. Вакулин, А. Б. Шабаров. Новосибирск: Наука. Сиб. Издательская фирма РАН, 1998.
2. Грачев С. И. О моделировании динамического взаимодействия нижней части бурильного инструмента с потоком бурового раствора / С. И. Грачев, Г. А. Кулябин // НТЖ. Известия вузов. Нефть и газ. 1987. № 3. С. 17-20. Баку.
3. Грачев С. И. Стенд для исследования динамических характеристик бурильного инструмента и потока промывочной жидкости (авторское свидетельство) / С. И. Грачев, Г. А. Кулябин // А. С. 1208175 СССР. Заявл. 25.07.84. Опубл. 30.01.86. Бюл. № 4.
4. Грачева С. К. Моделирование образования сети трещин / С. К. Грачева, А. В. Стрекалов, А. Т. Хусаинов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2013. № 2. С. 168-183.
5. Кислицын А. А. Тепломасообмен / А. А. Кислицын, А. Б. Шабаров. Тюмень: изд-во ТюмГУ, 2008.
6. Меренков А. П. Теория гидравлических цепей / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев. Н., 1985. 276 с.
7. Мирджанадзе А. Х. Парадоксы нефтяной физики / А. Х. Мирджанадзе, В. А. Байков. Москва, Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 223 с.
8. Михайлов Н. Н. Физика нефтяного и газового пласта (физика нефтяных пластовых систем): Том 1: Учебное пособие / Н. Н. Михайлов. М.: МАКС Пресс, 2008. 448 с.

9. Морозов В. Ю. Технология регулирования гидросистем нефтяных промыслов на примере систем поддержания пластового давления. Дисс. канд. техн. наук / В. Ю. Морозов. Тюмень, 2010.
10. Стрекалов А. В. Влияние нестационарных процессов на закономерности фильтрации в пористых средах / А. В. Стрекалов, В. Ю. Морозов // Нефтегазовое дело. 2010. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Strekalov/Strekalov_2.pdf
11. Стрекалов А. В. Метод численного решения задачи потокораспределения в сетевых гидравлических системах / А. В. Стрекалов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математические науки, информатика, химия. 2009. Июнь. С. 169-176.
12. Стрекалов А. В. Модель нестационарных процессов в гидравлических системах сетевой структуры / А. В. Стрекалов, В. Ю. Морозов. Нефтяное хозяйство. 2010. № 8. С. 107-109.
13. Стрекалов А. В. Программный комплекс гидродинамического моделирования природных и технических систем «Немезида Гидрасим 2014» (Nemesis Hydrasym 2014) / А. В. Стрекалов, С. И. Грачев. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2014614505. Заявка № 2014612343. Дата гос. регистрации 28 апреля 2014.

Sergei I. GRACHEV[1]
Aleksandr V. STREKALOV[2]

SIMULATION OF WAVE PROCESSES IN FRACTURE-POROUS COLLECTORS

[1] Dr. Sci. (Tech.), Professor,
Tyumen Industrial University
grachevsi@mail.ru

[2] Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor,
Tyumen Industrial University
hydrasym@mail.ru

Abstract

Such methods of wave action on productive formations as non-stationary water flood, intermittent drainage, and infrasound and hydro-pulse impact on the bottomhole formation zone have recently grown in importance. The effectiveness of wave processes is caused by a number of factors, namely the compressibility of skeleton, fracture opening, and, in general, an increased level of energy impact on filtration processes. Due to the fact that the presence of a fracture network in productive permeable reservoir causes significant structural heterogeneity, for the full simulation the use of mathematical apparatus of the theory of hydraulic circuits is required. Therefore, the aim of this paper is to review fundamental issues in modeling hydraulic systems with a highly developed arbitrary structure, which include fracture networks in fractured porous reservoirs. The physical and simulation experiments allowed identifying "weirdness" in the behavior of some hydraulic systems, which is not, in contradiction to Maxwell's generalization, in a stationary mode under the lack of external influence.

Keywords

Simulation, mud waves, model, mathematical function, performance, software and computing complex.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-52-62

Citation: Grachev S. I., Strekalov A. V. 2016. "Simulation of Wave Processes in Fracture-Porous Collectors." Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 1, pp. 52-62.
DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-52-62

© Tyumen State University

REFERENCES

1. Grachev S. I., Kulyabin G. A. 1987. "O modelirovanii dinamicheskogo vzaimodeistviya nizhnei chasti burilnogo instrumenta s potokom burovogo rastvora" [On the Modeling of Dynamic Interaction between the Bottom of the Drilling Tool with the Flow of Drilling Fluid]. Higher Educational Institutions News. Oil and Gas, no 3, pp. 17-20.
2. Grachev S. I., Kulyabin G. A. 1986. Stend dlya issledovaniya dinamicheskikh kharakteristik burilnogo instrumenta i potoka promyvochnoi zhidkosti (avtorskoe svidetelstvo) [Stand for investigation of dynamic characteristics drilling tool and flushing fluid flow (certificate of authorship)]. Inventor's certificate no 1208175, USSR. Bulletin no 4.
3. Gracheva S. K., Strekalov A. V., Khusainov A. T. 2013. "Modelirovanie obrazovaniya seti treshchin" [Simulation of Fracture network]. Oil and Gas Business, no 2, pp. 168-183.
4. Kislitsyn A. A., Shabarov A. B. 2008. Teplomasoobmen [Heat-Mass-Exchange]. Tyumen: Tyumen State University.
5. Merenkov A. P., Khasilev V. Ya. 1985. Teoriya gidravlicheskikh tsepei [The Theory of Hydraulic Circuits]. Moscow: Nauka.
6. Mikhailov N. N. 2008. Fizika neftyanogo i gazovogo plasta (fizika neftyanykh plastovykh sistem) [Physics of Oil and Gas Reservoir (Physics of Oil Reservoir Systems)], vol. 1. Moscow: MAKS Press.
7. Mirdzhanadze A. Kh., Baikov V. A. 2004. Paradoksy neftyanoi fiziki [Paradoxes of Petroleum Physics]. Moscow, Izhevsk: Institut kompyuternykh issledovanii.
8. Morozov V. Yu. 2010. "Tekhnologiya regulirovaniya gidrosistem neftyanykh promyslov na primere sistem podderzhaniya plastovogo davleniya" [The Technology of Hydraulic Control of Oil Fields on the Example of the Reservoir Pressure Maintenance Systems]. Cand. Sci. (Tech.) diss., Tyumen State University.
9. Strekalov A. V. 2009. "Metod chislennogo resheniya zadachi potokoraspredeleniya v setevykh gidravlicheskikh sistemakh" [Method of the Numerical Solution of Load Flow in Hydraulic Systems Network]. Tyumen State University Herald. Physics and mathematics, computer science, chemistry, no 6, pp. 169-176.
10. Strekalov A. V., Grachev S. I. 2014. Programmnyi kompleks gidrodinamicheskogo modelirovaniya prirodnykh i tekhnicheskikh sistem "Nemezida Gidrasim 2014" (Nemesis Hydrasym 2014) [Program complex hydrodynamic modeling of natural and technical systems "Nemesis Gidrasim 2014" (Nemesis Hydrasym 2014)]. State registration certificate of the computer program no 2014614505. Application no 2014612343. Date of state registration: April 28, 2014.
11. Strekalov A. V., Morozov V. Yu. 2010. "Model nestatsionarnykh protsessov v gidravlicheskikh sistemakh setevoi struktury" [The model of non-stationary processes in the hydraulic systems of the network structure]. Neftyanoe khozyaistvo, no 8, pp. 107-109.
12. Strekalov A. V., Morozov V. Yu. 2010. "Vliyanie nestatsionarnykh protsessov na zakonomernosti filtratsii v poristykh sredakh" [Influence of Non-Stationary Procedures on Filtration Rules in Porous Environments]. Oil and Gas Business. http://www.ogbus.ru/authors/Strekalov/Strekalov_2.pdf
13. Vakulin A. A., Shabarov A. B. 1998. Diagnostika teplofizicheskikh parametrov v neftegazovykh tekhnologiyakh [Diagnostics of Thermal Parameters in the Oil and Gas Technologies]. Novosibirsk: Nauka.