

Математическое моделирование динамики внедрения подземных вод при отработке газового месторождения

И.Н. Полшкова

к.т.н., доцент, старший научный сотрудник¹
z_irpol1@mail.ru

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

Предлагается методика исследования динамики потока подземных вод при отработке газового месторождения, сопровождающегося подъемом газо-водяного контакта. На математических моделях воспроизводятся два процесса – подъем газо-водяного контакта и процесс снижения напора в обводненной толще по мере заполнения подземными водами высвобождающегося порового пространства. Методика может быть использована для оценки запасов подземных вод при отработке нефтяных и газовых месторождений.

Материалы и методы

Математическое моделирование гидродинамического процесса

Ключевые слова

математическая модель, напор подземных вод, газовое месторождение

1. Введение

Методика математического моделирования позволяет перейти от упрощенных расчетных схем, применяемых при аналитических расчетах, к гидродинамическим моделям пространственной фильтрации, адекватно отображающим реальные процессы в многопластовой системе гидрогеологического объекта, что является принципиально новым уровнем изучения природных и техногенных процессов [1]. Моделирование обеспечивает наиболее полную реализацию трех основных функций науки: описание, объяснение и прогнозирование [2], поскольку математическая модель на основе схематизированного описания исследуемых процессов объясняет механизм этих процессов взаимодействием явно выделенных факторов и обеспечивает возможность их количественных оценок в пространстве и прогнозирует развитие процесса во времени.

Гидрогеологическая расчетная схема гидродинамического процесса, существующего в водовмещающей толще при отработке газового месторождения, представлена на рис. 1.

Вследствие подпора со стороны регионального потока подземных вод по мере снижения давления в газовой шапке происходит подъем газо-водяного контакта, что вызывает снижение напора подземных вод в подстилающем водоносном горизонте.

Классический вариант методики математического моделирования гидрогеологических процессов предполагает многовариантное решение задачи, когда в процессе исследования чувствительности расчетной схемы относительно параметров водоносных горизонтов и разделяющих слоев, а также всех внешних возмущающих факторов на модели воспроизводятся искомые поля напоров водоносных горизонтов подземных вод. Адекватность модели исследуемому оценивается, в частности, по совпадению данных режимных наблюдений

и абсолютных отметок уровней подземных вод, полученных по результатам моделирования на различные моменты времени.

В данном случае процесс снижения напора не является результатом водоотбора при эксплуатации водоносных горизонтов, который задается на модели в виде граничных условий второго рода с известными отрицательными расходами. Поэтому исследование гидродинамических процессов осуществлялось в два этапа.

На первом этапе на модели воспроизводился процесс продвижения газо-водяного контакта, причем в качестве критерия адекватности модели исследуемому процессу контролировались следующие факторы, взятые, как исходные данные:

- скорость подъема газо-водяного контакта;
- объем внедрившейся воды — общий и ежегодный.

Исследование динамики процесса внедрения подземных вод при отработке газового месторождения было проведено на основе материалов, представленных в отчетах [4, 5].

Информация об абсолютных значениях отметок поверхности газо-водяного контакта представляется наиболее достоверной, тогда как второй параметр является расчетной величиной, поэтому на модели может быть воспроизведен только порядок этой величины (а не ее точное значение).

На втором этапе воспроизводился процесс снижения напора в классическом варианте — в результате заполнения внедряющимся потоком напорных подземных вод освобождающейся емкости горизонта при постепенном подъеме газо-водяного контакта. Причем, на каждом расчетном шаге по времени в качестве граничных условий 2 рода задавались отрицательные емкостные расходы, которые заполняют освобождающуюся емкость горизонта по мере снижения давления в газовой шапке. Емкостные расходы потоков получены по результатам

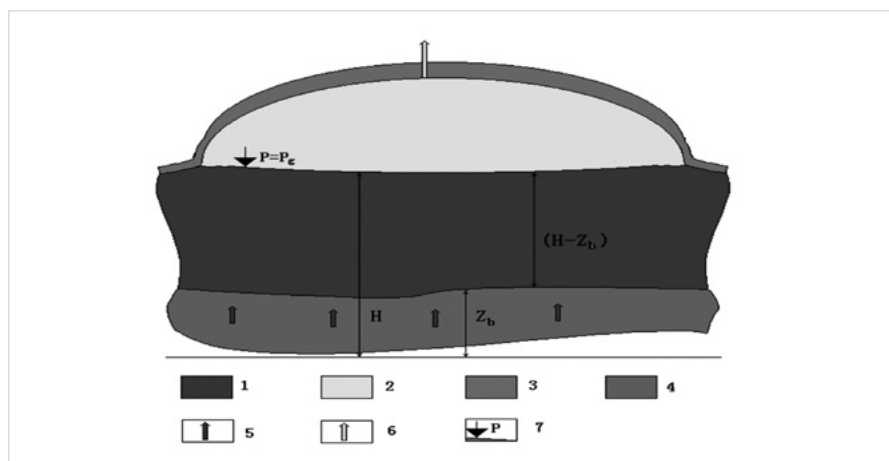


Рис. 1 — Расчетная гидрогеологическая схема:
1 — однослойный водоносный горизонт; 2 — газовая залежь;
3 — непроницаемая кровля сеноманского горизонта;
4 — региональный гидродинамический поток, подпирющий и (5) внедряющийся в водоносный горизонт по мере отработки (6) газового месторождения; 7 — давление на поверхность газо-водяного контакта

моделирования первого этапа. Адекватность модели воспроизводимому процессу контролировалась данными режимных наблюдений абсолютных отметок подземных вод в наблюдательных скважинах, расположенных напорном водоносном горизонте ниже начального газо-водяного контакта.

2. Описание математической модели

2.1. Предварительная модель процесса подъема газо-водяного контакта

В качестве расчетной гидрогеологической схемы гидродинамического потока подземных вод была принята схема однослойного водоносного пласта, расположенного под кровлей сеноманского горизонта, принимаемой в качестве непроницаемой границы (сверху). Нижняя граница обводненной толщи, являясь элементом региональной водонапорной системы, находится в состоянии подпора. По мере отработки газового месторождения давление в газовой шапке, лежащей выше обводненной толщи, падает, и в образовавшемся разреженном пространстве с достаточно высокими параметрами пористости (за вычетом порового пространства, занятого неотработанным защемленным газом) вследствие подпора снизу происходит подъем поверхности обводненной толщи (рис. 1).

Общее уравнение фильтрации, представляющее собой сумму удельных дебитов взаимосвязанных потоков подземных вод применительно к данной однослойной системе, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q_2 + (Z_b - H) \frac{k_z}{M_z} = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

где x, y — плановые координаты точки области;
 H — искомый напор подземных вод в водоносном горизонте;

$T_x(T_y)$ — значение коэффициента водопроводимости горизонта в направлении оси ОХ (ОУ);

Z_b — абсолютная отметка подошвы водоносного горизонта, уровень контакта с региональным потоком;

μ — емкость горизонта (упругая или гравитационная) в предположении, что коэффициент гравитационной водоотдачи при снижении уровня грунтовых вод равен коэффициенту недостатка насыщения при подъеме уровня;

Q_2 — граничное условие 2-го рода — известное значение удельного расхода источника (стока);

k_z — коэффициент вертикальной взаимосвязи региональной напорной системы и обводненной мощности со свободной поверхностью;

M_z — мощность гипотетического разделяющего слоя между региональной напорной системой и рассматриваемой обводненной мощностью;

Уравнение в конечных разностях решается методом минимизации невязок балансовых потоков [6].

По результатам решения задачи было показано, что балансовые составляющие горизонтальных потоков весьма незначительны. Следовательно, подъем уровня обводненной толщи со свободной поверхностью в безнапорном режиме описывается следующим уравнением:

$$(Z_b - H) \frac{k_z}{M_z} = \mu \frac{\partial H(x, y)}{\partial t}$$

т.е. объем внедряющейся воды вследствие подпора распределяется в освобождающемся поровом пространстве по мере отработки месторождения:

μ — гравитационная емкость,

$Q = (Z_b - H) \frac{k_z}{M_z} S$ — ежегодный объем внедрившейся воды.

S — площадь, через которую осуществляется приток, ограничивается периметром кровли сеноманского горизонта;

Z_b — абсолютная отметка контакта обводненной толщи с региональной напорной системой подземных вод;

k_z — коэффициент вертикальной фильтрации гипотетического слоя, через который происходит подпор;

M_z — мощность гипотетического слоя;

H — абсолютная отметка уровня газо-водяного контакта.

Для данной гидродинамической системы параметрами гидрогеологической среды, исходя из приведенного выше уравнения, являются следующие величины:

- емкость водоносной части горизонта (отображение на модели коэффициента эффективной пористости μ из работы [4]);
- абсолютная отметка поверхности контакта обводненной толщи и региональной напорной системы, т.е. поверхности, на уровне которой осуществляется подпор — Z_b ;
- параметр проводимости, задающий взаимосвязь обводненной толщи с внешней средой, расположенной глубже обводненной толщи $G = \frac{k_z S}{M_z}$;
- параметр водопроводимости водоносной части сеноманского горизонта;
- начальным условием при моделировании нестационарного процесса фильтрации в данной системе является абсолютная отметка начального уровня газо-водяного контакта.

Моделируемыми функциями являются величина подъема газо-водяного контакта и объем внедрившейся воды, считая от начала отработки месторождения — 1972 года.

Областью модели является территория южной части месторождения «Медвежье» — размером 47х34 км, с сеточной разбивкой 58х43 узловых точек. За начальные условия принималось среднее значение начального уровня ГВК, равное 1131.3 м, которое определялось по 65 скважинам (рис. 2), дискретизация шага по времени составляла 1 год.

Как оказалось в процессе моделирования, на величину подъема ГВК максимальное влияние оказывает параметр емкости, а на объем внедрившейся воды — абсолютная отметка глубины подпора. Коэффициент вертикальной проводимости, естественно, оказывает влияние на обе функции. При моделировании данного процесса коэффициент проводимости между обводняемой мощностью сеноманского горизонта и региональным потоком подземных вод задается в виде обобщенной величины, прямо пропорционально зависящей от коэффициента вертикальной фильтрации и площади взаимодействия горизонта (по периметру купола) и обратно пропорционально — от мощности гипотетического разделяющего слоя. В таб. 1 приводятся результаты решения задачи для выбранного диапазона параметров [7]:

Из таблицы видно, что процесс моделирования управляем, и изменения функций вполне логичны. Как и предполагалось, диапазон изменения параметров водопроводимости (от 100 до 500 м²/сут) не оказывает значительного влияния на моделируемый процесс, что подтверждает предположение

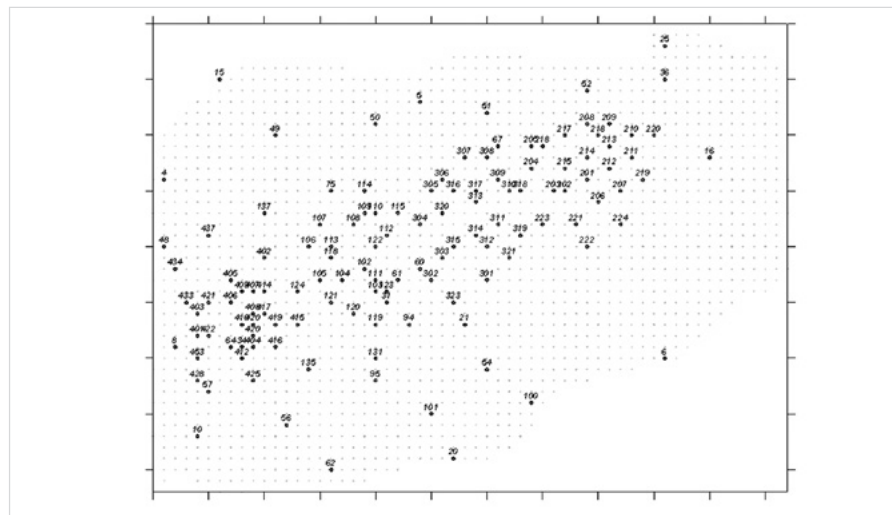


Рис. 2 — Схема размещения наблюдательных скважин на сеточной модели

№ вар	Водопров. $T_x=T_y$ м ² /сут	Емкость μ	Вертикал. проводим. $G=(K/M)S$ м ² /сут	Глубина подпора Z_b м	Подъем уровня гвк за 20 лет H (м)	V внедр. воды за 10 лет (тыс. м ³ /год)
1	300	0.2	10	-1190	19.4	4261.6
2	300	0.2	5	-1190	10.7	2263.1
3	300	0.1	5	-1190	19.3	2130.9
4	300	0.1	1.5	-1190	6.7	695.8
5	300	0.05	1.5	-1190	12.6	670.7
6	300	0.02	1.5	-1190	26.4	602.9
7	300	0.02	1.5	-1180	22	500.2
8	100	0.02	1.5	-1180	21.9	500.2
9	500	0.02	1.5	-1180	21.8	500.3

Таб. 1 — Соотношение функций и параметров по результатам математического моделирования

о том, что преобладает вертикальная фильтрация при которой происходит пополнение емкости освобождающегося порового пространства.

Подъем уровня по отдельным скважинам на различные моменты времени не всегда совпадал с реальными данными вследствие того, что задавалось одно и то же значение емкости во все точки моделируемого слоя. Однако среднее совпадение модельных и реальных значений подъема уровней ГВК удовлетворительно (рис. 3).

Ежегодное падение пластового давления в среднем равно 3 атмосферам, средний ежегодный подъем уровня обводненной толщи составляет примерно 1.8 м (0.58 м на одну атмосферу падения давления) [4]. Наблюдаемое среднее значение подъема ГВК составляет 23.7 м, на модели получено значение 22 метра. Этот результат можно объяснить заниженным значением гравитационной емкости — 0.02, заданным на модели.

Объем внедрившейся воды по тем же данным [4, 5] на конец 1983 и 1984гг. составляют 441 и 569 тыс. м³/год, соответственно. На модели получено минимальное значение порядка 500 тыс. м³/год. Кроме того, на модели с каждым годом заметно снижение объема внедряющейся воды, что можно объяснить снижением действия подпора. На рис. 4 приводятся основные структурные компоненты общего баланса потока подземных вод — объем внедряющейся воды за счет подпора и емкостная составляющая, полученные в результате решения эпигнозной задачи.

При рассмотрении структуры баланса

потока в этом процессе можно сделать вывод, что по мере отработки газового месторождения приток подземных вод снизу, из напорной системы подземных вод, уменьшается, соответственно, уменьшается и отток в емкость сеноманского горизонта. Объемы потоков практически равны по модулю, что подтверждает предположение о преобладающем характере вертикальной фильтрации в водонапорной системе.

2.2. Основная модель процесса снижения напора

Описанная модель, воспроизводящая подъем ГВК, является предварительной. Емкостная составляющая потока (правая часть уравнения (1) является основным результатом моделирования на предварительном этапе. Эта матрица значений записывается в базу сеточных данных системы моделей на каждом расчетном шаге по времени. Поле этого параметра имеет смысл гипотетического водоотбора, который реализует процесс снижения напора в обводненной толще сеноманского горизонта в классической постановке задачи и может быть задан на основной модели в качестве нестационарного граничного условия второго рода на каждом — k -ом шаге по времени:

$$Q_i^k(\mu_i) = \hat{\mu} \frac{\partial H_i^k}{\partial t} \equiv Q_i^k$$

Процесс моделирования сводится к решению нестационарной задачи по уравнению (1), с полученными граничными условиями, матрицы которых подгружаются из базы сеточных данных модели. Граничные условия 3 рода, которыми моделируется

подпор, также берутся из предварительной модели. В качестве параметра емкости задается не гравитационная, а упругая емкость горизонта $\mu = 0.001$. На этой же модели могут быть заданы проектируемые водозаборы с прогнозируемым дебитом водоотбора по скважинам.

На основной модели была решена эпигнозная задача и воспроизведен процесс снижения напора с 1972 по 2000 г. Адекватность модели реальному процессу прослеживается для 9 имеющихся в обводненной толще наблюдательных гидрогеологических скважин. На рис. 5 приводятся сравнение модельных и режимных данных по 4 наблюдательным скважинам. На рис. 6 приводится общий вид поверхности газо-водяного контакта и поверхности напора подземных вод по состоянию на 2000 г. Два купола газо-водяного контакта соответствуют двум участкам месторождения.

Таким образом, можно определить следующую методику решения подобных задач: 1. На первой, вспомогательной модели воспроизводится процесс подъема ГВК и объема внедряющейся воды. Основное граничное условие — граничное условие 3 рода по подошве горизонта. Подбирается отметка подпора, параметр взаимосвязи с региональным потоком, параметр водопроводимости и упругая емкость. Критерий адекватности — сравнительные графики подъема уровней газо-водяного контакта по скважинам и балансовые таблицы, как подтверждение независимого расчета объема внедряющейся воды. Результат — матрицы емкостных потоков на каждом шаге по времени.

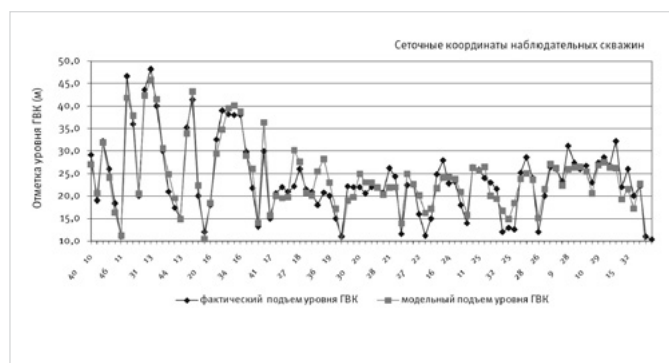


Рис. 3 — Сравнение реальных и модельных данных положения уровня ГВК на 1993 г.

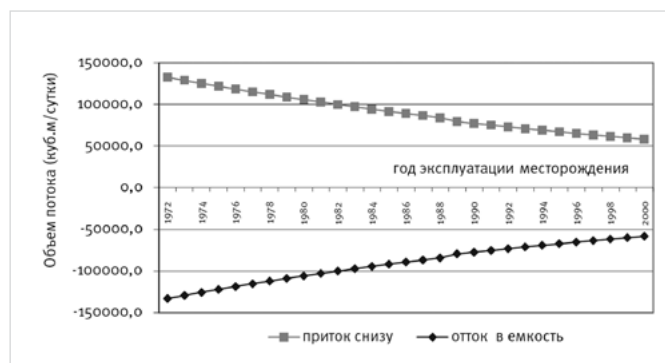


Рис. 4 — Структура балансовых потоков при подъеме ГВК

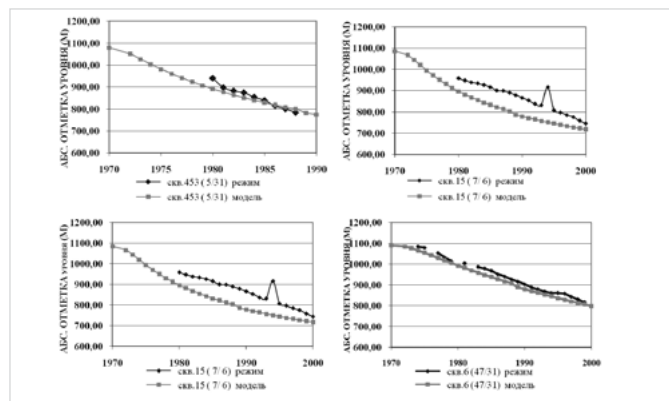


Рис. 5 — Сравнение модельных и режимных данных снижения напора в наблюдательных скважинах при подъеме газо-водяного контакта

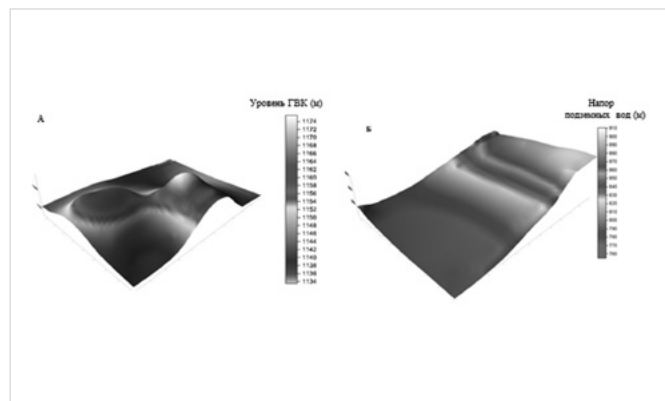


Рис. 6 — Результаты моделирования: (А) — поверхность газо-водяного контакта — предварительная модель, (Б) — поле напоров подземных вод сеноманского в пределах границ сеточной области — основная модель.

2. Из базы сеточных данных вспомогательной модели соответствующие емкостные потоки передаются в основную модель на каждом расчетном шаге по времени, начиная от момента эксплуатации газового месторождения и заканчивая окончанием срока эксплуатации проектируемого водозабора. Для проверки адекватности модели необходимо иметь несколько гидрогеологических скважин в обводненной толще, расположенных ниже начального уровня газо-водяного контакта. Основное внимание уделяется уточнению параметра водопроводимости на основе данных о снижении уровня в наблюдательных скважинах. Критерий адекватности — сравнительные графики по скважинам и балансовые таблицы.
3. На основной модели можно оценивать запасы подземных вод, как правило, минерализованных в той или иной степени.

Итоги

Разработана модель реального объекта с воспроизведением динамического процесса снижения напора подземных вод.

Выводы

Методика может быть использована для оценки запасов подземных вод при отработке газовых месторождений.

Список используемой литературы

1. Скворцов В.В. Математический эксперимент в теории разработки нефтяных месторождений. Москва: Наука, 1970, 224 с.
2. Рабочая книга по прогнозированию. Москва: Мысль, 1982, 430 с.
3. Полшкова И.Н. Система специального программного обеспечения расчета процессов фильтрации и массопереноса в подземных водах «АкваСофт» — Aquasoft. Свидетельство о регистрации № 2006610658 от 17.02.2006.

4. Скоробогатов В.А. и др. Отчет по теме Р.1.1.П.11 «Гидрогеологические аспекты обводнения крупнейших разрабатываемых газовых месторождений севера Тюменской области». ВНИИГАЗ, 1998.
5. Ремизов и др. Методы анализа отработки сеноманских залежей севера Тюменской области по данным исследований эксплуатационных скважин (в период активного проявления водонапорного режима). Обзор информации. Москва: ИРЦ Газпром, 1999.
6. Полшкова И.Н. Особенности реализации системы специального математического обеспечения автоматизированных сеточных моделей бассейнов и месторождений подземных вод. Москва: Всеингео, 1994.
7. Полшкова И.Н., Силаев В.С., Гильфанова Т.Н. Математическая модель процесса геофильтрации в обводненной толще при отработке газового месторождения. Вопросы освоения подземных промышленных вод. Махачкала: Юпитер, 2003, С. 68–84.

ENGLISH

GAS INDUSTRY

Math modelling of underground water infiltration dynamics in exhausted gas deposit

UDC 556.3.01

Authors:

Irina N. Polshkova — ph.d., associate professor, senior researcher¹; z_irpol1@mail.ru

¹Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract

The studying goal is the state of groundwater flow, what is changing during the development of gas field, as well as basing of possibility for reserves assessment of related mineral water. As the main settlement in the hydrogeological scheme showing the dynamic of ground water flow approximation adopted single-layer aquifer, located under the Cenomanian horizon roof, taken as impenetrable border (top). The lower boundary of the aquifer thickness, as a part of regional water system is in the prop. During exhausting gas deposit the gas pressure in the gas cap, lying above the aquifer thickness, falls and in formed

unload pore space with a very high porosity parameters (less pore space occupied by gas non exhausting) comes up a surface watered thickness. There are two models, both processing simultaneously showing changes of hydrodynamic flow state. Two processes are represented with math models — gas-water contact raise and the process of pressure decrease in watered thickness as ground water fills the pore space that is being freed. The modelling results are: the surface map of gas-water contact, map of Cenomanian groundwater pressures head and graph of changes in time — the value of influx from below and the appropriate value of outflow into capacity.

Materials and methods

Math modelling of hydrodynamic process.

Results

A model of a real object with reproducing of hydrodynamic process in underground water flow is worked out.

Conclusions

The technique can be used to estimate groundwater resources in developing gas fields.

Keywords

math model, underground water pressure, groundwater flow dynamics, gas deposit

References

1. Skvortsov V.V. *Matematicheskiy eksperiment v teorii razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy* [Math experiment in theory of oil deposits mining]. Moscow: Nauka, 1970, 224 p.
2. *Rabochaya kniga po prognozirovaniyu* [Work book on forecasting]. Moscow: Mysl, 1982, 430 p.
3. Polshkova I.N. *Sistema spetsial'nogo programmnogo obespecheniya rascheta protsessov fil'tratsii i massoperenosa v podzemnykh vodakh Akvasoft* — Aquasoft [System of special software aimed at calculating filtration and mass transfer processes in underground waters — Aquasoft]. Certificate of registration № 2006610658 of 17.02.2006.
4. Skorobogatov V.A. and others. Report on the subject R.1.1.P.11 *Gidrogeologicheskie aspekty obvodneniya krupneyshikh razrabatyvaemykh gazovykh mestorozhdeniy severa Tyumenskoy oblasti* [Hydrogeological aspects of watering the largest mined gas deposits of the northern part of Tyumen region]. VNIIGAZ, 1998.
5. Remizov and others. *Metody analiza otrabotki senomanskikh zalezhey severa Tyumenskoy oblasti po dannym issledovaniy ekspluatatsionnykh skvazhin (v period aktivnogo proyavleniya vodonapornogo rezhima)* [Methods of analysing mining cenomanian deposits of the northern part of Tyumen region according to working wells investigation (during the period of active manifestation of water pressure mode)]. Moscow: IRZ Gazprom, 1999.
6. Polshkova I.N. *Osobennosti realizatsii sistemy spetsial'nogo matematicheskogo obespecheniya avtomatizirovannykh setochnykh modeley basseynov i mestorozhdeniy podzemnykh vod* [Specifics of implementing the system of special math provision for automated grid models of basins and deposits of underground waters]. Moscow: VSEINGEO, 1994.
7. Polshkova I.N., Silaev V.S., Gilfanova T.N. *Matematicheskaya model' protsesssa geofil'tratsii v obvodnennoy tolshche pri otrabotke gazovogo mestorozhdeniya. Voprosy osvoeniya podzemnykh promyshlennykh vod* [Math model of geofiltration process in watered thick during gas deposit exploitation]. Collection of scientific works. Issues of developing underground industrial waters. Makhachkala: Jupiter, 2003, pp. 68–84.