

# Изучение проводимости разлома на начальном этапе разработки Чаяндинского месторождения как инструмент уточнения геологического строения залежи

В.А. Маркелов<sup>1</sup>, Р.А. Хусаинов<sup>2</sup>, В.Ю. Силлов<sup>3</sup>, Е.В. Чепкасова<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup> ПАО «Газпром», г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup> ООО «Газпром добыча Ноябрьск», Ноябрьск, Российская Федерация

✉ e.v.chepkasova@gmail.com

**Резюме:** В статье представлен комплексный подход к уточнению проводимости разлома, выделенного методами сейсморазведки, на начальном этапе разработки Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения. Актуальность работы обусловлена тем, что вводимые в разработку новые месторождения характеризуются осложняющими факторами, к которым принято относить блочное строение разрабатываемых залежей. Предварительные расчеты, проведенные на гидродинамической модели Чаяндинского месторождения, показали, что параметр проводимости разломов, оказывает значительное влияние на основные технико-экономические параметры разработки всего месторождения. Методы гидропрослушивания межскважинного пространства позволили ответить на вопрос проводимости одного из выделенных разломов непосредственно до ввода рассматриваемого участка в эксплуатацию. Исследования проводили в газонасыщенных горных породах с низкой пьезопроводностью в скважинах, расположенных на расстоянии, превышающем 3000 м. Одновременно анализу гидродинамической связанности были подвергнуты три области. В результате работ было локально уточнено геологическое строение залежи: выделенный методами сейсморазведки разлом оказался проводящим, и дополнительно был выделен непроницаемый экран, о существовании которого ранее было неизвестно ввиду его малой амплитуды. Реализация предложенного подхода позволит на раннем этапе разработки актуализировать картину гидродинамической связанности блоков, выделенных методами сейсмической разведки, а также своевременно скорректировать проектные решения, принимаемые на основании прогнозных расчетов гидродинамических моделей.

**Ключевые слова:** Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение; гидропрослушивание скважин; гидродинамическая модель; проводимость разлома; геологическое строение залежи; комплексный подход

**Для цитирования:** Маркелов В.А., Хусаинов Р.А., Силлов В.Ю., Чепкасова Е.В. Изучение проводимости разлома на начальном этапе разработки Чаяндинского месторождения как инструмент уточнения геологического строения залежи. *Горная промышленность*. 2021;(3):87–91. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-87-91.

## Geological structure update using fault seal analysis at the early stage of Chayandinskoye gas condensate field development

V.A. Markelov<sup>1</sup>, R.A. Khusainov<sup>2</sup>, V.Yu. Silov<sup>3</sup>, E.V. Chepkasova<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup> Gazprom PJSC, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> Gazprom добыча Noyabrsk LLC, Noyabrsk, Russian Federation

✉ e.v.chepkasova@gmail.com

**Abstract:** The paper shows a sophisticated approach of fault sealing analysis for Chayandinskoye gas condensate field. The gas-oil system of the field is complicated by large number of the geological faults, which leads to its block structure. Preliminary calculations using the field simulation models showed that the faults conductivity might significantly affect technical and economic features of the field. Conducted interference well tests allowed to estimate fault conductivity before the juxtaposed field blocks development. The studies were carried out in gas-saturated porous medium with low formation-pressure conductivity in wells located at distance exceeding 3000 m. Hydrodynamic connectivity between three areas was analyzed. As a result, the field geological structure was locally updated: the initially considered sealing fault identified by the seismic survey data was reconsidered as a partially conductive and additional sealing boundary between two wells was recognized, which wasn't identified earlier due to its low amplitude. Proposed approach allows to estimate the hydrodynamic blocks connectivity at the early stages of the field development thus to improve simulation models forecasts and project decision making.

**Keywords:** Chayandinskoye field; interference test; simulation model; fault conductivity; geological structure; sophisticated approach

**For citation:** Markelov V.A., Khusainov R.A., Silov V.Yu., Chepkasova E.V. Geological structure update using fault seal analysis at the early stage of Chayandinskoye gas condensate field development. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(3):87–91. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-87-91.

**Введение**

Вводимые в разработку новые месторождения углеводородов характеризуются осложненными условиями эксплуатации. К факторам, оказывающим значительное влияние на технологические показатели разработки, относят наличие геологических разломов и их параметры. Наличие и ориентацию разломов на начальном этапе разработки устанавливают на основании интерпретации сейсморазведки, которые характеризуются ограниченной разрешающей способностью приборов и не позволяют определить их проводимость. Таким образом, для оценки влияния разломов на процессы разработки месторождения необходимы дополнительные исследования.

Гидропрослушивание межскважинного пространства является одним из методов, позволяющих ответить на вопрос о проводимости разломов [1]. Предварительные расчеты, проведенные на гидродинамической модели Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), показали, что в случае, если выделенные сейсморазведочными методами разломы будут проницаемыми, то накопленная добыча газа к 35 году разработки возрастет на 22 млрд м<sup>3</sup> по сравнению с вариантом, где все выделенные разломы являются непроницаемыми, и позволит продлить период постоянной добычи дополнительно на 2 года.

Объектом исследования данной работы является оценка проводимости одного из выделенных разломов – разлома АВ Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения, который прослеживается во всех вариантах обработки сейсмических данных и имеет амплитуду около 25 м. Цель работы – определить методами гидропрослушивания, является разлом АВ проводящим или нет.

Результаты проведенных исследований показали, что блоки А и В, на которые делит участок залежи разлом АВ, – гидродинамически связаны. Дополнительно в ходе работы было установлено наличие непроницаемого экрана между двумя реагирующими скважинами, о существовании которого ранее было неизвестно ввиду его малой амплитуды. Полученная в ходе работы информация позволила локально уточнить гидродинамическую модель месторождения и актуализировать технико-экономические параметры разработки, а также показала эффективность используемых методов в газонасыщенных средах, характеризующихся низкой пьезопроводностью на расстояниях, превышающих 3000 м.

**Описание объекта исследования**

Отличительной чертой Чаяндинского месторождения является наличие большого количества геологических разломов, из-за которых месторождение разбито на 44 гидродинамически несвязанных блока (20 в ботуобинском и хамакинском горизонтах, 24 в талахском горизонте).

Объектом исследования в данной работе был разлом АВ, протянувшийся в субмеридиональном направлении (рис. 1), который разделяет тектонические блоки А и В. Наличие разлома АВ четко выделяется во всех вариантах интерпретации данных сейсмической разведки 3D 2015–2020 гг. и учтено в текущей тектонической схеме, принятой для подсчета запасов. Проводимость данного разлома имела большое значение при прогнозировании технологических показателей разработки месторождения и значительно влияла на фильтрационную картину движения флюидов в выделенных блоках.

Для исследования проводимости разлома АВ на начальном этапе разработки месторождения был выбран метод



**Рис. 1**  
Разлом АВ Чаяндинского НГКМ

**Fig. 1**  
AB Fault at the Chayandinskoye gas condensate field

гидропрослушивания межскважинного пространства, который заключается в изменении режима работы возмущающей скважины с последующей регистрацией изменения давления в реагирующих скважинах, отстающих от возмущающей на некотором расстоянии. При этом необходимо обеспечить условие стабильной работы рассматриваемой гидродинамической системы и достаточность времени проведения работ. Таким образом, если в процессе исследования в реагирующей скважине будет получен отклик давления, то рассматриваемые скважины имеют гидродинамическую связь, в противном случае – нет.

Главными критериями при выборе скважин-кандидатов для исследования были минимизация расстояния между скважинами, которые находились по разные стороны от изучаемого разлома, качество освоения исследуемых скважин после бурения (другими словами, наличие гидродинамической связи скважин с пластом), а также возможность устойчивой работы возмущающей скважины с постоянным дебитом на протяжении всего времени исследования.

В качестве скважин для исследования были выбраны скважины 1а (возмущающая, расположена в блоке А); 1б, 2 и 3 (реагирующие, расположены в блоках А и В) (рис. 1). Выбранные скважины прошли предварительный этап освоения, который составил от 10 до 90 дней, одна из скважин находилась в пробной эксплуатации. Для оценки фильтрационно-емкостных свойств коллектора в околоскважинной зоне пласта и эффективности вскрытия пласта во всех скважинах после освоения были проведены комплексные газодинамические исследования, состоящие из стационарных и нестационарных циклов отработки. Результаты обработки таких исследований показали, что скважины вскрывают области пласта с общеобъемной проницаемостью от  $40 \cdot 10^{-3}$  до  $285 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>, механический скин-фактор в скважинах варьируется в диапазоне от +1.2 до +7. Таким образом, результаты предварительного освоения с последующими исследованиями указывают на наличие гидродинамической связи с исследуемым пластом.

**Гидропрослушивание межскважинного пространства**

Для определения параметров работы возмущающей скважины 1а (длительность отработки, дебит), при которых возможно получение реакции в реагирующих сква-

жинах, были проведены предварительные расчеты с использованием программного комплекса Карра Saphir [2]. В качестве исходных данных были приняты осредненные ФЕС, полученные при анализе газодинамических исследований рассматриваемых скважин после их освоения, а также результаты интерпретации ГИС. Такая процедура (дизайн) является обязательной для подобного вида исследований, поскольку позволяет оценить время, необходимое для регистрации отклика давления в реагирующей скважине и формирования в ней так называемого бесконечно действующего радиального потока, диагностируемого на билогарифмическом графике.

Формирование в реагирующей скважине бесконечно действующего радиального потока позволяет с определенной степенью достоверности количественно охарактеризовать параметры межскважинного пространства. Однако на практике это может быть нереализуемо ввиду значительных временных затрат на исследование. В таком случае результатом работ по гидропрослушиванию межскважинного пространства будет ответ на вопрос о наличии гидродинамической связи между возмущающей и реагирующей скважинами, что в большинстве случаев является достаточным.

Дебит возмущающей скважины определяет амплитуду отклика давления в реагирующей скважине, которая должна быть на порядок больше разрешающей способности используемого межскважного прибора [3].

С учетом этого был разработан дизайн гидропрослушивания межскважинного пространства: отработка возмущающей скважины 1а с дебитом ~240 тыс. м<sup>3</sup>/сут в течение ~30 сут с последующей регистрацией КВД в течение ~10 сут.

Поскольку основной задачей исследования было определить проводимость разлома АВ, то дизайн исследования был получен упрощенным аналитическим методом без учета реальной ориентации и параметров заканчивания скважин. Такой подход был также использован в ходе анализа и интерпретации данных, полученных с глубинных приборов.

Параметры проведения исследования представлены на рис. 2, где кривые г и д – отражают работу возмущающей скважины 1а. Из графика видно, что возмущающая скважина работала не совсем стабильно, однако для решения поставленной задачи такое поведение является вполне допустимым.

Кривые а, б и в (рис. 2) отражают данные, полученные с глубинных приборов реагирующих скважин 2, 1б и 3 соответственно. Из приведенных графиков видно, что гидродинамически связанными с возмущающей скважиной 1а являются только скважины 1б и 3, где со временем происходит снижение пластового давления. Скважина 2 находится в заразломной области, поскольку реакция в поле давления не диагностируется, а расстояние до нее сопоставимо с расстоянием до скважины 3, где была получена реакция на возмущение. Параметры и результаты анализа проведенного исследования представлены в табл. 1.

На рис. 3 представлены билогарифмические графики (а1, б1, в1) и график временной функции суперпозиции (а2, б2, в2) в скважинах 2, 1б и 3 соответственно. Из графиков видно, что в скважине 1б, которая характеризуется наименьшим удалением от возмущающей скважины 1а, на билогарифмическом графике (б1) явно диагностируется зарождение бесконечно действующего радиального потока, что позволило с большей степенью достоверности количественно описать параметры межскважин-

Таблица 1  
Параметры и результаты гидропрослушивания

Table 1  
Parameters and results of the interference test

Реагирующая скважина	Расстояние от возмущающей скважины, м	Время начала реакции в реагирующей скважине, ч	Амплитуда изменения давления, кПа
2	3069	Реакция отсутствует	0
1б	1402	100	8.630
3	3147	220	2.746

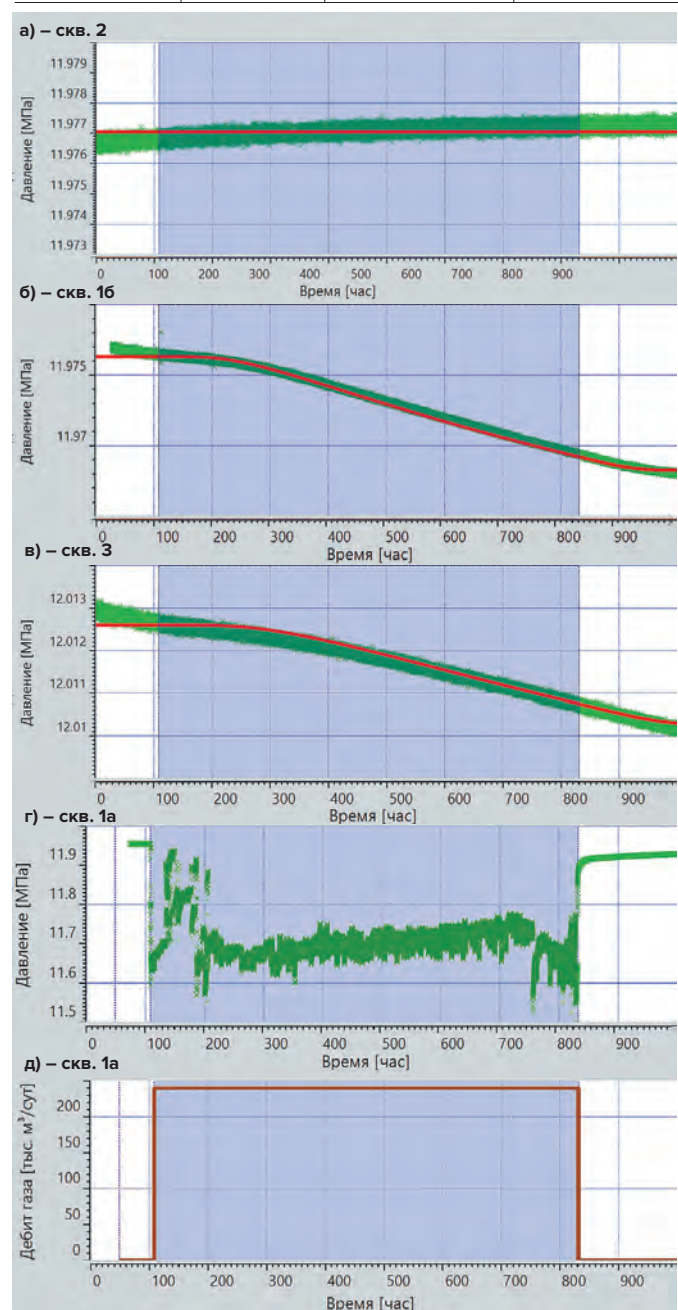
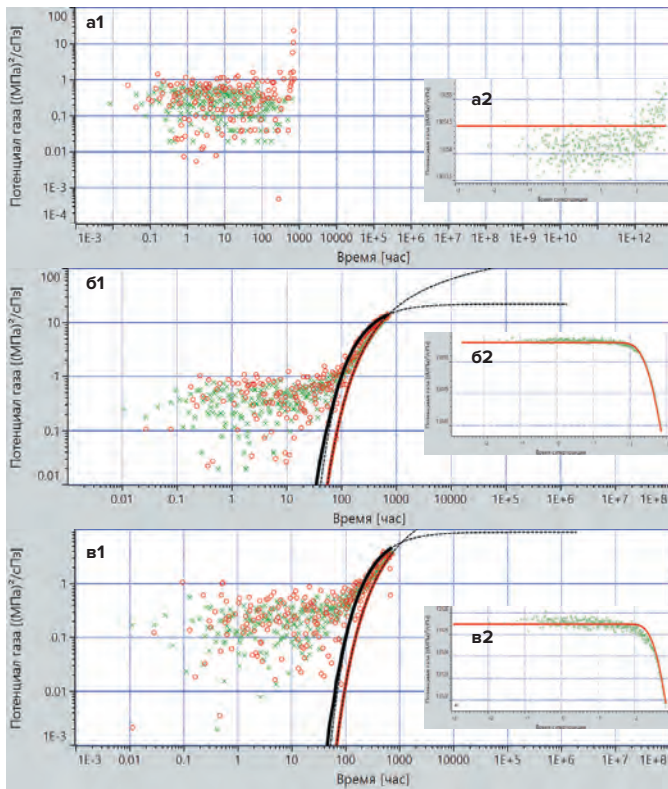


Рис. 2  
Запись глубинных приборов реагирующих скважин 2, 1б и 3 – а, б и в соответственно совместно с решением; параметры работы возмущающей скважины 1а: г – забойное давление, д – дебит

Fig. 2  
Records of the bottomhole instruments in observation wells 2, 1b and 3 – а, б and в respectively, together with the solution; operating parameters of active well 1a: г – bottomhole pressure, д – production rate

ного пространства на основании аналитической модели, совмещая ее с фактическими замерами глубинного прибора (табл. 2).



**Рис. 3**  
Билогарифмические графики (a1, b1 и v1) и графики функции суперпозиции (a2, b2 и v2) для реагирующих скважин 2, 16 и 3 соответственно

**Fig. 3**  
Bilogarithmic plots (a1, b1 and v1) and superposition function plots (a2, b2 and v2) for observation wells 2, 16 and 3, respectively

**Таблица 2**  
Параметры межскважинного пространства

**Table 2**  
Interwell space parameters

Параметр	сква. 1а	сква. 1а – сква. 2	сква. 1а – сква. 16	сква. 1а – сква. 3
Эффективная проницаемость, $\cdot 10^{-3}$ мкм <sup>2</sup>	108.9	–	96	192.5
Коэффициент пористости, д.ед.	–	–	0.158	0.094

**Локальное уточнение гидродинамической модели Чаяндинского НГКМ по данным гидропрослушивания скважин**

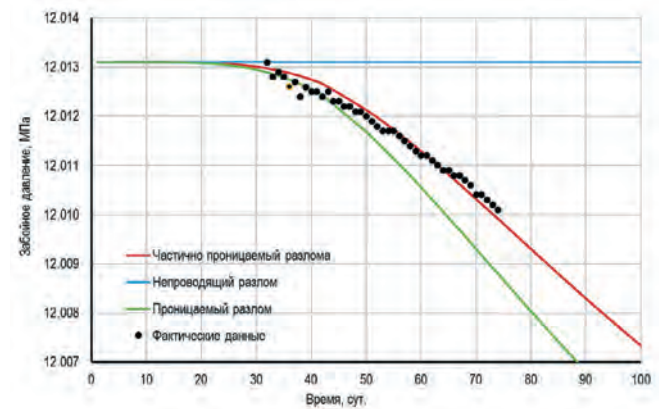
Результаты гидропрослушивания межскважинного пространства были использованы для локальной адаптации действующей гидродинамической модели Чаяндинского НГКМ. Ранее все выделенные результатами сейсмической разведки тектонические нарушения принимались непроницаемыми. Однако результаты проведенных исследований показали, что блоки А и В имеют гидродинамическую связь, а скважины 1а и 2 – гидродинамически не связаны, другими словами, между ними имеет место новый, не выделенный ранее методами сейсмической разведки разлом.

При адаптации модели были воспроизведены режим работы возбуждающей скважины 1а и реакция давления в скважинах 16, 2 и 3. Целью адаптации было воспроизвести динамику давления в реагирующих скважинах.

Для воспроизведения реакции давления, полученной в скважине 3, расположенной по другую сторону от выделенного разлома АВ и возбуждающей скважины 1а, были рассмотрены различные варианты, отличающиеся друг от

друга множителем коэффициента проводимости разлома АВ. Диапазон изменения множителя составлял от 0 (гидродинамическая связь между блоками отсутствует) до 1 (тектонический разлом не оказывает влияния на гидродинамическую связь блоков). В результате расчетов было найдено решение, которое воспроизвело фактические данные гидропрослушивания скважин с приемлемой точностью.

На рис. 4 изображены графики забойного давления, полученные для скважины 3 в пакете гидродинамического моделирования Schlumberger Eclipse [4] для вариантов с различной проводимостью разлома АВ на отработку возмущающей скважины 1а (синяя линия соответствует варианту с абсолютно непроницаемым разломом, зеленая – проницаемому разлому, красная – частично проводящему разлому, точками нанесены фактические данные исследования). Как можно видеть из приведённого графика сопоставления модельной и фактической кривой реагирования, в ходе адаптации удалось достичь хорошего соответствия как по времени начала реагирования скважины 3 на отборы возмущающей скважины 1а, так и по величине изменения забойного давления.



**Рис. 4**  
Результат локальной адаптации гидродинамической модели Чаяндинского НГКМ на данные гидропрослушивания луча скважин 1а – 3

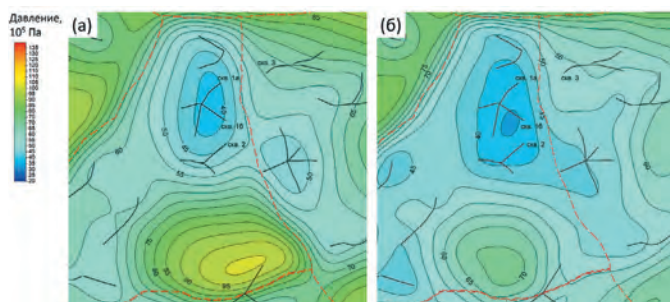
**Fig. 4**  
Result of local adaptation of the Chayandinskoye gas condensate field simulation model using interference test data of wells 1а – 3

Также в модели был воспроизведен обнаруженный в ходе гидропрослушивания непроницаемый экран, находящийся между реагирующими скважинами 16 и 2. По результатам гидродинамического моделирования было установлено, что для корректного воспроизведения результатов исследований в модели, длина выявленного разломного нарушения должна составлять не менее 3500 м от плоскости разлома АВ и проходить между скважинами 16 и 2.

Таким образом, результаты интерпретации гидропрослушивания были учтены в гидродинамической модели Чаяндинского НГКМ. Проницаемость других разломов, выделенных в модели по данным сейсморазведки, но не охваченных текущим исследованием, осталась без изменений – они приняты непроницаемыми.

Расчеты на адаптированной на результаты гидропрослушивания гидродинамической модели Чаяндинского НГКМ показали, что прогнозируемый прирост в добыче газа, по сравнению с базовым вариантом, в котором разлом АВ был непроницаемым, составляет около 210 млн м<sup>3</sup> к 35 году разработки месторождения, что составляет 0,7 % от накопленной добычи газа кустов блока А и В.

Разница в накопленной добыче газа обусловлена луч-



**Рис. 5**  
Карты изобар на 35 год разработки (а – базовый вариант, непроницаемый разлом АВ, б – вариант локально адаптированной гидродинамической модели)

**Fig. 5**  
Pressure charts for the 35th year of development (a – base case, impermeable AB fault, б – variant of a locally adapted simulation model)

шим охватом зон пласта дренированием по сравнению с базовым вариантом, что видно из сравнения карт изобар на 35 год разработки, представленных на рис. 5.

### Выводы

Прослеживаемая в последнее время тенденция диверсификации продукции нефтегазовых компаний привела к росту спроса на ввод в эксплуатацию новых газовых и газоконденсатных месторождений, которые характеризуются осложненными условиями эксплуатации. В статье был

рассмотрен подход, позволивший уточнить геологическое строение газоконденсатной залежи на раннем этапе разработки, что оказывает значительное влияние на своевременное принятие решений оптимизации добычи углеводородного сырья и актуализацию технико-экономических параметров разработки.

В ходе работы был продемонстрирован комплексный подход анализа результатов сейсморазведочных работ с методами газодинамических исследований межскважинного пространства, что позволило уточнить параметры геологического разлома АВ Чаяндинского НГКМ, а также выделить малоамплитудный непроницающий разлом, не диагностируемый методами сейсморазведки.

Результаты работы были использованы для локального уточнения гидродинамической модели Чаяндинского НГКМ. При адаптации модели на результаты гидродинамических исследований скважин по гидропрослушиванию в ней были воспроизведены параметры проведения исследования и подобраны соответствующие параметры геологического строения исследуемого участка залежи, которые позволили обеспечить хорошее соответствие фактических и модельных данных.

Проведенные на адаптированной модели прогнозные расчеты показали, что проводимость разлома может оказывать значительное влияние на динамику добычи газа из рассматриваемых блоков месторождения, что необходимо учитывать на раннем этапе разработки месторождений углеводородов.

### Список литературы

1. Ли Дж., Ваттенбаргер Р.А. *Инжиниринг газовых резервуаров*. Ижевск: Институт компьютерных технологий; 2014. 944 с.
2. Houze O., Viturat D., Fjaere O.S. et al. *Dynamic Data Analysis: vol. 5.40*. Paris: Kappa; 2021. 874 p.
3. Деева Т.А., Камартдинов М.Р., Кулагина Т.Е., Мангазеев П.В. *Гидродинамические исследования скважин: анализ и интерпретация данных*. Томск: ЦППС НД ТПУ; 2009. 240 с.
4. *Eclipse Technical Description*. Schumberger; 2014. 1156 p.

### References

1. Lee W.J., Wattenbarger R.A. *Gas Reservoir Engineering*. Izhevsk: Computer technology Institute; 2014. 944 p. (In Russ.)
2. Houze O., Viturat D., Fjaere O.S. et al. *Dynamic Data Analysis: vol. 5.40*. Paris: Kappa; 2021. 874 p.
3. Deeva T.A., Kamartdinov M.R., Kulagina T.E., Mangazeev P.V. *Well tests: analysis and data interpretation*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2009. 240 p. (In Russ.)
4. *Eclipse Technical Description*. Schumberger; 2014. 1156 p.

### Информация об авторах

**Маркелов Виталий Анатольевич** – кандидат технических наук, заместитель председателя правления ПАО «Газпром», г. Москва, Российская Федерация.

**Хусаинов Роман Артурович** – научный сотрудник центра геологического и гидродинамического моделирования, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: khusainov.p@gmail.com.

**Силов Виталий Юрьевич** – руководитель группы гидродинамических исследований, ООО «Газпром добыча Ноябрьск», г. Ноябрьск, Российская Федерация; e-mail: silov65@yahoo.com.

**Чепкасова Екатерина Викторовна** – ведущий геолог группы гидродинамических исследований, ООО «Газпром добыча Ноябрьск», г. Ноябрьск, Российская Федерация; e-mail: e.v.chepkasova@gmail.com.

### Information about the authors

**Vitaly A. Markelov** – PhD in Engineering, Deputy Chairman of Management Committee, Gazprom PJSC, Moscow, Russian Federation.

**Roman A. Khusainov** – Researcher at the Center for Geological and Hydrodynamic Simulation, Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow, Russian Federation; e-mail: khusainov.p@gmail.com.

**Vitaly Yu. Silov** – Head of the Hydrodynamic Research Group, Gazprom dobycha Noyabrsk LLC, Noyabrsk, Russian Federation; e-mail: silov65@yahoo.com.

**Ekaterina V. Chepkasova** – Senior Geologist of the Hydrodynamic Research Group, Gazprom dobycha Noyabrsk LLC, Noyabrsk, Russian Federation; e-mail: e.v.chepkasova@gmail.com.

### Article info

Received: 12.05.2021

Revised: 24.05.2021

Accepted: 31.05.2021

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.05.2021

Поступила после рецензирования: 24.05.2021

Принята к публикации: 31.05.2021