

## Численное моделирование неоднородного напряженно-деформированного состояния и прогноз изменения проницаемости прискважинной зоны при создании щелевой перфорации в терригенном коллекторе

С.Н. Попов<sup>1\*</sup>, С.Е. Чернышов<sup>2\*\*</sup>

1 – Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

2 – Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

E-mail: \*popov@ipng.ru, \*\*nirgnf@bk.ru

**Аннотация.** Приведены результаты численного моделирования распределения неоднородного поля напряжений вблизи скважины для терригенного коллектора при создании щелевой перфорации. Спрогнозированы вариации проницаемости в зависимости от изменения величины эффективных напряжений. Выявлены участки восстановления проницаемости после формирования щелевых каналов. Показано, что щелевая перфорация является эффективным методом интенсификации притока углеводородов.

**Ключевые слова:** щелевая перфорация, численное моделирование, эффективные напряжения, проницаемость коллектора.

**Для цитирования:** Попов С.Н., Чернышов С.Е. Численное моделирование неоднородного напряженно-деформированного состояния и прогноз изменения проницаемости прискважинной зоны при создании щелевой перфорации в терригенном коллекторе // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 4(31). С. 25–36. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-31.art3>

Щелевая перфорация является одним из эффективных методов вскрытия пласта и интенсификации притока углеводородов в скважину [1–6]. При таком методе воздействия на пласт применяется гидропескоструйный перфоратор, с помощью которого создаются, обычно, две или четыре щели со смещением по образующей на угол 90° или 180° друг относительно друга [3, 4]. После создания щелевых каналов весьма существенно меняется распределение эффективных напряжений в околоскважинной зоне, что должно также привести к изменению фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллектора в данной области [7, 8]. В связи с вышесказанным, в рамках данной работы была создана численная 3D модель участка прискважинной зоны терригенного

коллектора, включающая щелевую перфорацию, и выполнено конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) участка пласта вблизи скважины. С помощью известного поля распределения напряжений появляется возможность прогнозирования изменения ФЕС в околоскважинной зоне при создании щелевых каналов.

Расчет поля распределения напряжений при создании щелевой перфорации производился с использованием средств численного моделирования программного комплекса ANSYS [9], в который была заложена модель пороупругости. Данный программный комплекс широко применяется при решении задач геомеханики в процессе разработки месторождений нефти и газа [10–11].

Для моделирования задач пороупругости в ANSYS используется следующая система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \nabla \bullet \sigma + f = 0 \text{ или } \nabla \bullet (\sigma' - \alpha p I) + f = 0 \\ \alpha \dot{\varepsilon}_v + \frac{1}{K_m} \dot{p} + \nabla \bullet q = S \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – тензор напряжений;  $\dot{\phantom{x}}$  (точка сверху) – оператор производной;  $\nabla \bullet$  – оператор дивергенции;  $\sigma'$  – тензор эффективных напряжений;  $\alpha$  – коэффициент Био;  $p$  – поровое давление;  $I$  – единичный тензор второго порядка;  $f$  – вектор сил;  $\varepsilon_v$  – объемные деформации скелета породы;  $K_m$  – модуль Био;  $q$  – вектор потока флюида;  $S$  – источник потока.

Также применяются соотношения для взаимосвязи напряжений и деформаций:

$$\sigma' = D \varepsilon^e, \quad (2)$$

где  $\varepsilon^e$  – тензор деформаций;  $D$  – матрица упругих констант.

Для описания потока флюида в пористой среде использовался закон Дарси:

$$q = -k \nabla p / \mu, \quad (3)$$

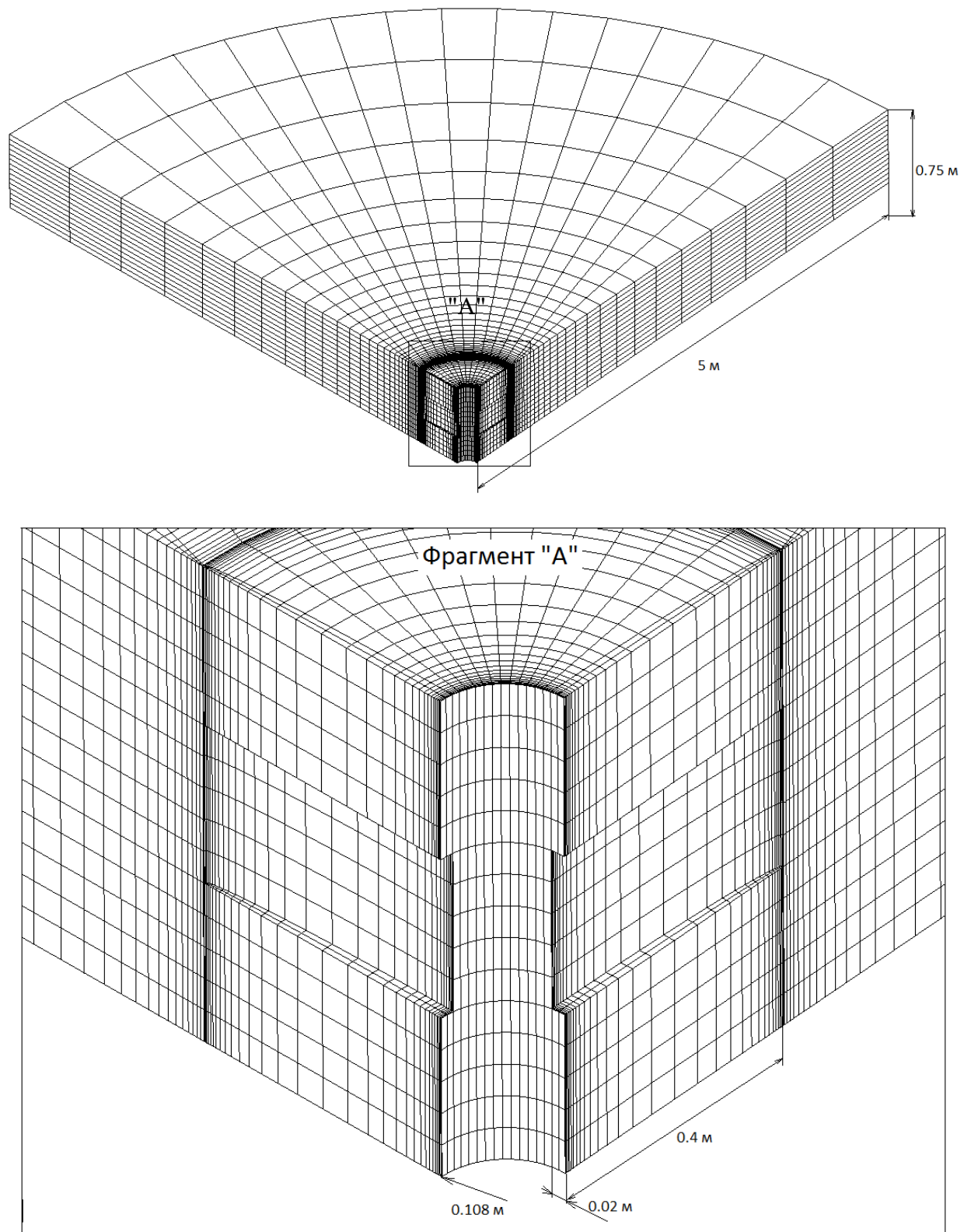
где  $k$  – тензор проницаемости второго порядка;  $\nabla$  – градиент-оператор;  $\mu$  – вязкость жидкости.

При моделировании неоднородного поля напряжений в области щелевой перфорации применялась численная конечно-элементная схема в виде сектора цилиндра, представленная на рис. 1. В модели учитывалось, что в околоскважинной зоне создаются либо две, либо четыре ортогональные друг другу щели. Сечение щелей в вертикальном направлении задавалось в виде эллипса. На рис. 1 представлены геометрические характеристики модели. В табл. 1 приведены основные физические величины, используемые в расчетах. Данные величины задавались на примере типовых терригенных пластов нефтяных месторождений Западного Казахстана.

Таблица 1

**Физические характеристики модели, используемые в расчетах**

№ п/п	Характеристика	Значение
1	модуль упругости, ГПа	20
2	коэффициент Пуассона, д.е.	0,17
3	коэффициент Био, д.е.	0,85
4	предел прочности при одноосном сжатии, МПа	24
5	угол внутреннего трения, градусы	28
6	начальная проницаемость, мД	100
7	глубина пласта, м	1600
8	вертикальное напряжение, МПа	40
9	горизонтальное напряжение, МПа	34
10	пластовое давление, МПа	15
11	депрессия на пласт, МПа	2–8



**Рис. 1.** Конечно-элементная схема околоскважинной зоны, используемая для моделирования изменения НДС при создании щелевой перфорации

В модели создавались следующие граничные условия:

- забойное давление на стенке скважины;
- давление флюида на боковой поверхности модели, определяемое на основе следующей зависимости:

$$p = p_b - \Delta p \frac{\ln r_b / r}{\ln r_b / r_w}, \quad (4)$$

где  $p$  – текущее (определяемое) пластовое давление, Па;  $p_b$  – давление на контуре питания, Па;  $\Delta p$  – депрессия на пласт, Па;  $r_b$  – радиус контура питания, м;  $r_w$  – радиус открытого ствола скважины, м;  $r$  – радиус, на котором определяется значение пластового давления, м;

– давление на внутренней поверхности щелей, вычисляемое по линейной зависимости от радиальной координаты: для радиуса, равного радиусу скважины, давление приравнивалось забойному, а в вершине щелей давление определялось из соотношения (4) при радиусе, равном длине щели плюс радиус скважины (0,4 м + 0,108 м = 0,508 м).

– на левой, правой, и нижней границах модели (см. рис. 1) задавались нулевые перемещения в направлении, ортогональном поверхности;

– на верхнюю границу модели действовало напряжение от вышележащих пород, равное 40 МПа.

Всего были рассчитаны два основных варианта: с учетом и без учета изменения проницаемости пласта в зависимости от изменяющихся эффективных напряжений. Каждый из таких расчетных вариантов разделялся еще на два внутренних расчета: моделирование только открытого ствола скважины (без учета щелей) и моделирование открытого ствола с учетом создания щелевых перфорационных каналов.

Величина изменения проницаемости коллектора вычислялась на основе существующей зависимости [8]:

$$\begin{cases} K = K_0 - \lambda \Delta \sigma, & \Delta \sigma \geq 0 \\ K = K_0 + \kappa \Delta \sigma, & \Delta \sigma < 0 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $K_0$  – исходная величина проницаемости, мД;  $K$  – определяемая текущая проницаемость, мД;  $\Delta \sigma$  – величина изменения средних эффективных напряжений в коллекторе, МПа;  $\lambda$  – коэффициент снижения проницаемости, мД/МПа;  $\kappa$  – коэффициент восстановления проницаемости, мД/МПа.

В проведенных расчетах коэффициенты изменения проницаемости коллектора задавались в виде следующих констант:  $\lambda = 7,2$  мД/МПа,  $\kappa = 0,278$  мД/МПа. Изменение средней величины эффективных напряжений определялось из следующего соотношения:

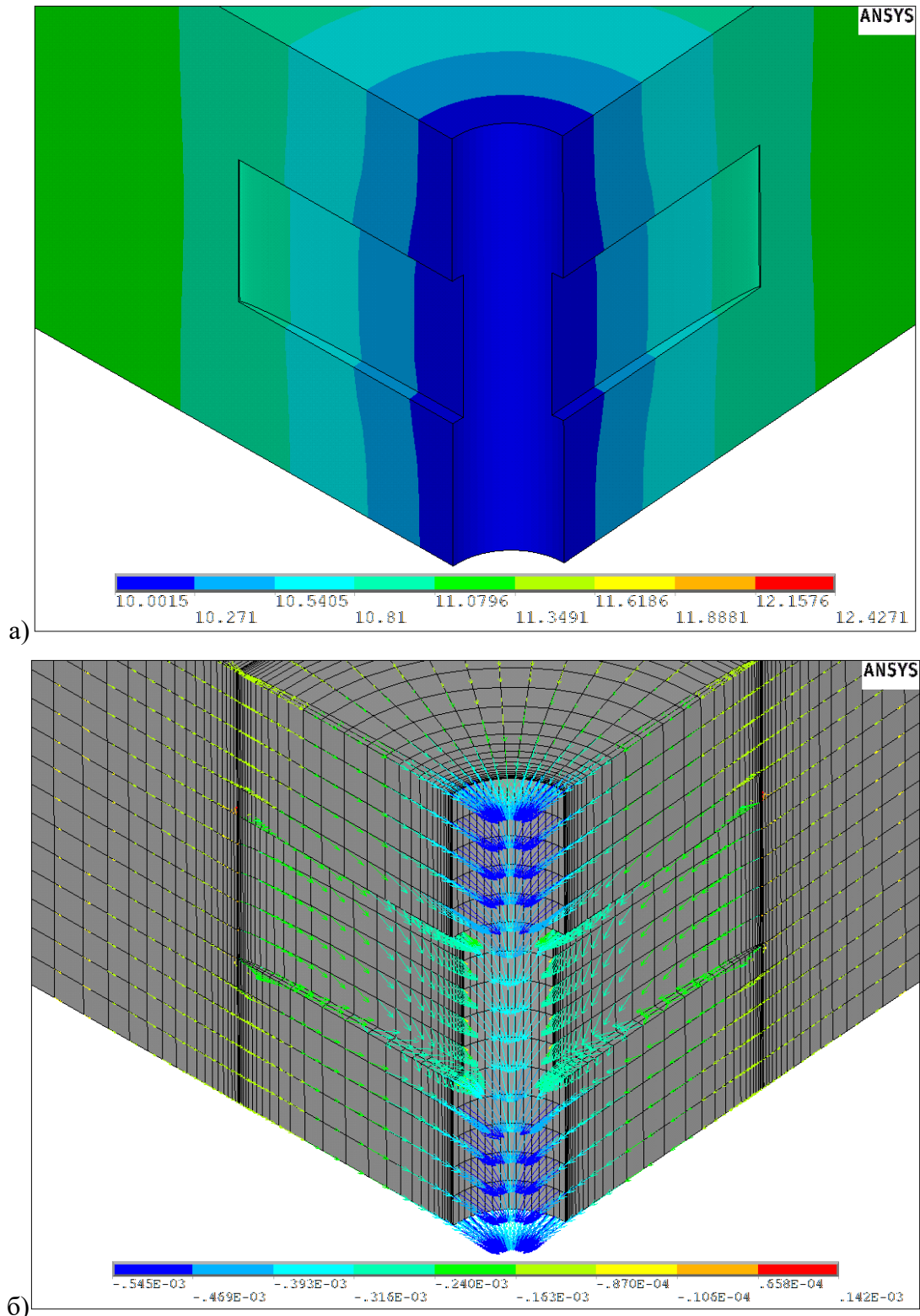
$$\Delta \sigma = \frac{(\sigma_1^{(1)} + \sigma_2^{(1)} + \sigma_3^{(1)}) - (\sigma_1^{(0)} + \sigma_2^{(0)} + \sigma_3^{(0)})}{3(\sigma_1^{(0)} + \sigma_2^{(0)} + \sigma_3^{(0)})} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где  $\Delta \sigma$  – изменение среднего эффективного напряжения, %;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные

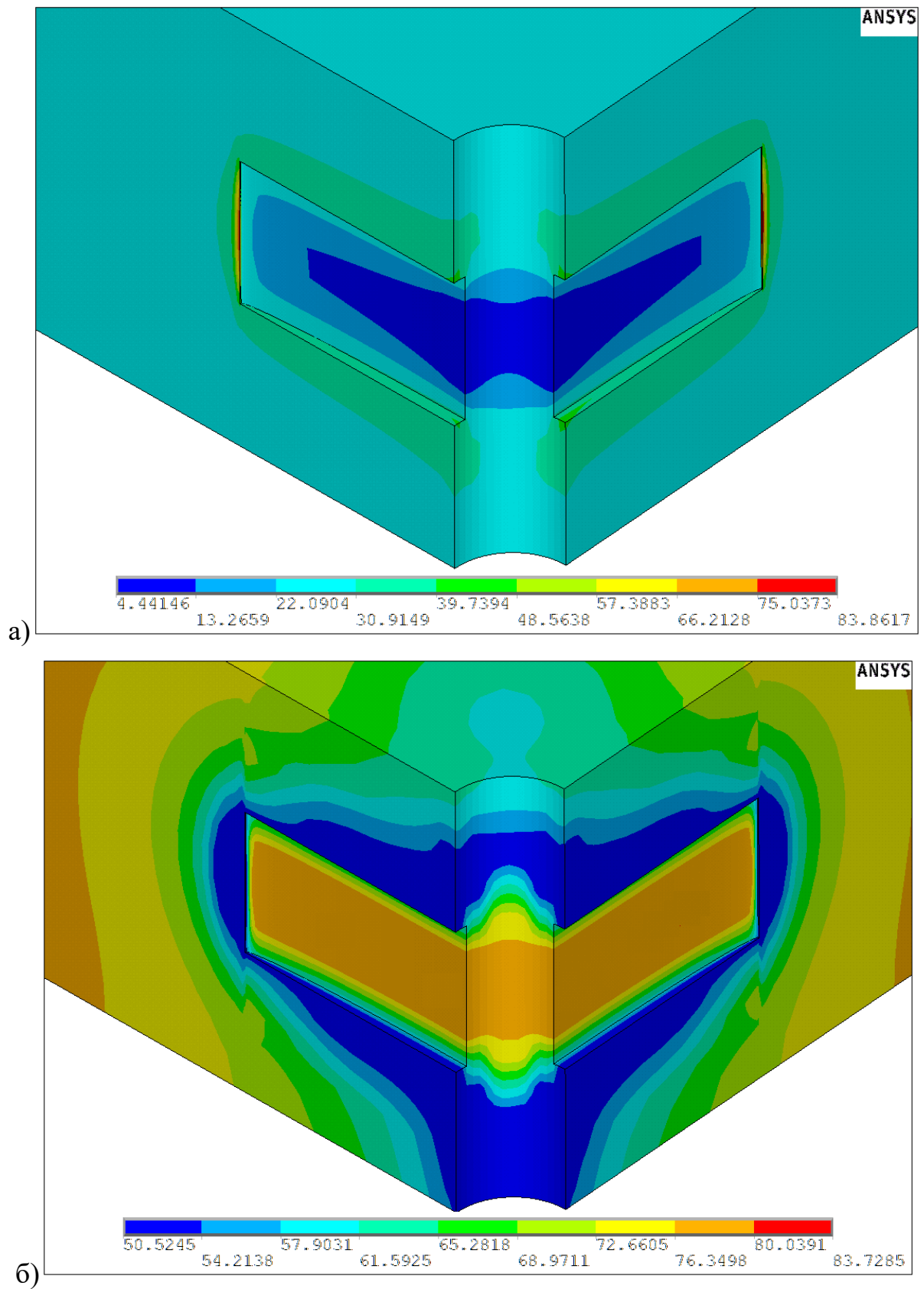
эффективные напряжения (верхние индексы соответствуют этапу расчета).

На рис. 2–4 показаны некоторые из основных полученных результатов численного моделирования. На

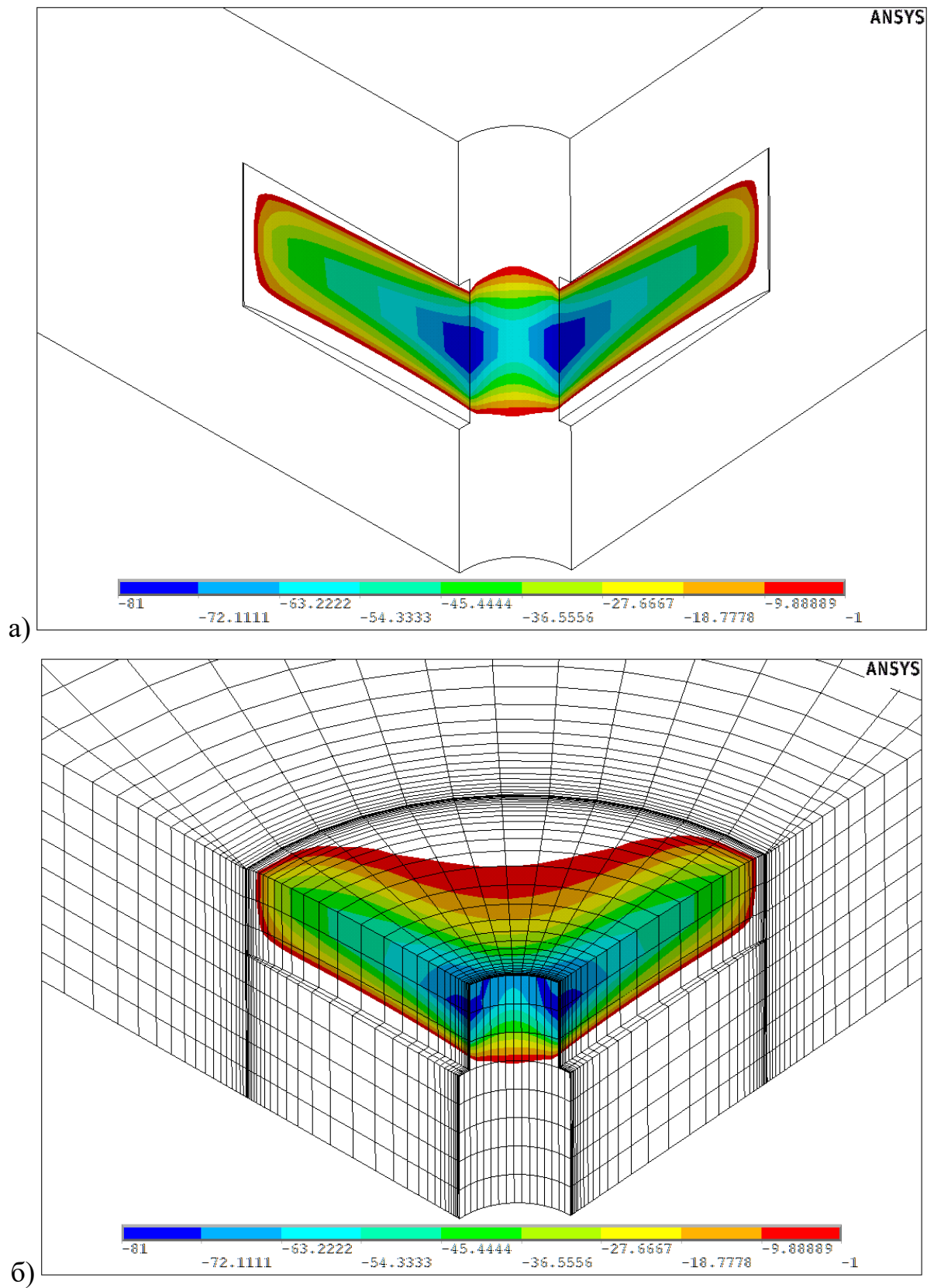
рис. 2 представлено распределение пластового давления и скорости течения жидкости.



**Рис. 2.** Распределение пластового давления в МПа (а) и векторов течения потока жидкости, в м/с (б) вблизи скважины при создании щелевых перфорационных каналов (депрессия 5 МПа)



**Рис. 3.** Распределение величины средних эффективных напряжений, в МПа, (а) и проницаемости коллектора, в мД (б) в зоне создания щелевых перфорационных каналов (депрессия 5 МПа)



**Рис. 4.** Изменение величины средних эффективных напряжений (в %) в целом в модели (а) и на срезе по середине щелей (б) после создания щелевых перфорационных каналов (депрессии 5 МПа)

Рис. 2а показывает, что изменение давления вблизи щелевой перфорации происходит достаточно равномерно и характеризует распределение данной величины по логарифмической зависимости. На стенке щелевой перфорации изменение давления происходит по линейной зависимости.

Анализируя векторы потока жидкости (см. рис. 2б), следует отметить, что максимальные значения данной характеристики соответствуют открытому стволу скважины в областях выше и ниже созданных щелей. Однако такой результат получен для необсаженного ствола скважины. В действительности вышеобозначенные области будут непроницаемы при учете эксплуатационной колонны в модели, что должно привести к максимальному притоку именно на стенках щелевых каналов.

На рис. 3а представлено распределение средних эффективных напряжений. Как видно из данного рисунка, области коллектора с наименьшей величиной эффективных напряжений расположены вблизи стенок щелевой перфорации. Это говорит о том, что на данных участках должно происходить восстановление проницаемости и в целом проницаемость должна достигать наибольшей величины. Данный факт подтверждается на рисунке с распределением проницаемости породы-коллектора (рис. 3б). Области с максимальными напряжениями соответствуют вершинам щелей, что соответствует минимальной проницаемости на данных участках.

Рис. 4 отображает величину восстановления напряжений после создания щелевой перфорации. Из рис. 4 видно, что после формирования щелевых каналов внутри зоны, ограниченной длиной щелей, создается область, в которой происходит уменьшение

напряжений, то есть в ней должно происходить некоторое увеличение проницаемости под воздействием данного эффекта.

Проведенные расчеты показали, что зона, в которой происходит уменьшение напряжений, должна уменьшаться с увеличением депрессии на пласт, что, в конечном итоге, должно привести и к частичному невосстановлению проницаемости коллектора после создания щелей.

Таким образом, приведенные результаты численного конечно-элементного моделирования показали, что щелевая перфорация является эффективным методом восстановления проницаемости коллектора в околоскважинной зоне и интенсификации притока к скважине. Об этом свидетельствуют участки с восстановлением проницаемости и уменьшением эффективных напряжений, полученные при данных расчетах. Такие результаты моделирования говорят о том, что если при эксплуатации продуктивного пласта происходит снижение проницаемости под воздействием уменьшающегося пластового или забойного давления или при его кольматации различными агентами, то с помощью щелевой перфорации появляется возможность восстановить гидродинамическую связь скважины с пластом-коллектором.

### Выводы

1. Авторами была создана численная конечно-элементная модель околоскважинной зоны, учитывающая создание щелевых перфорационных каналов и особенности физико-механических свойств продуктивного пласта. Представлены результаты расчетов неоднородного НДС в околоскважинной зоне коллектора после создания щелевой перфорации.



2. Результаты численного моделирования поля распределения напряжений показали, что после создания щелевых перфорационных каналов возникает зона, в которой уменьшается величина средних эффективных напряжений, что приводит к восстановлению проницаемости коллектора.

3. В процессе расчетов использовались соотношения, характеризующие изменение величины проницаемости в зависимости от эффективных напряжений. Как показали

результаты моделирования, после создания щелевой перфорации происходит восстановление проницаемости на участках боковых поверхностей щелей.

4. В целом, результаты численного моделирования процесса создания щелей, расчета НДС и проницаемости вблизи щелевой перфорации показали весьма высокую эффективность данного метода вскрытия пласта для увеличения притока жидкости в эксплуатационные скважины.

*Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Исследование термодинамических свойств углеводородных смесей, моделирование гидротермодинамических, физико-химических и геомеханических процессов в геосредах с целью повышения эффективности разработки трудноизвлекаемых запасов нефти и газа», № АААА-А19-119030690057-5).*

## Литература

1. *Гайворонский И.Н., Костицын В.И., Савич А.Д., Черных И.А., Шумилов А.В.* Повышение эффективности вторичного вскрытия продуктивных пластов // Нефтяное хозяйство. 2016. № 10. С. 62–65.
2. *Chernyshov S.E., Galkin S.V., Krisin N.I., Turbakov M.S., Riabokon E.P.* Efficiency improvement of abrasive jet perforation // SPE Annual Caspian Technical Conference and Exhibition, CTCE 2015, Baku, Azerbaijan, 4–6 November 2015. Conference paper: SPE-177375-MS. 8 p. <https://doi.org/10.2118/177375-MS>
3. *Чернышов С.Е., Рябоконт Е.П., Турбаков М.С., Крысин Н.И.* Пат. RU 2645059 С1. Способ щелевой гидропескоструйной перфорации. № 2016141101; Заявл. 19.10.2016; Опубл. 15.02.2018 // Изобретения. Полез. модели. Бюл. № 5. 7 с. <http://www1.fips.ru>
4. *Крысин Н.И., Рябоконт Е.П., Турбаков М.С., Чернышов С.Е., Щербаков А.А.* Совершенствование устройств щелевой гидропескоструйной перфорации в нефтяных скважинах // Нефтяное хозяйство. 2016. № 8. С. 129–131.
5. *Kritsanaphak K., Tirichine S., Abed M.* Using hydrajert perforating technique as an effective alternative to explosive perforating for Algerian oil and gas fields // IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. Ho Chi Minh City, Vietnam. 1–3 November 2010. Conference paper: SPE-136066-MS. 14 p. <https://doi.org/10.2118/136066-MS>
6. *Салихов Р.Г., Крапивина Т.Н., Крысин Н.И.* Применение щелевой гидропескоструйной перфорации при вторичном вскрытии продуктивных пластов СПб.: Недра, 2005. 180 с.
7. *Кашиников Ю.А., Ашихмин С.Г., Гладышев С.В., Попов С.Н., Матяшов С.В.* Изменение напряженно-деформированного состояния и фильтрационно-емкостных свойств трещинного продуктивного объекта при щелевой перфорации // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2002. № 11. С. 15–21.

8. *Ашихмин С.Г., Чернышов С.Е., Кашиников Ю.А., Макдональд Д.И.М.* Влияние ориентации и схемы размещения каналов целевой перфорации на проницаемость терригенных коллекторов в околоскважинной зоне пластов // Нефтяное хозяйство. 2018. № 6. С.132–135. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-6-132-135>

9. ANSYS. Technical description. 2019.

10. *Попов С.Н., Сметанников О.Ю.* Разработка численной модели околоскважинной зоны гранулированного коллектора, учитывающей изменение фильтрационно-емкостных свойств под воздействием нагнетаемой воды и изменяющихся эффективных напряжений // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2018. № 8. С. 52–59. <https://doi.org/10.30713/2413-5011-2018-8-52-59>

11. *Попов С.Н.* Разработка 3D геомеханической модели участка ачимовских отложений одного из месторождений Крайнего Севера // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 2(25). С. 3. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-25.art3>

## Numerical modeling of a heterogeneous stress-strain state and prediction of changes in the permeability of the near-wellbore zone when creating slotted perforation in a sandstone reservoir

S.N. Popov<sup>1\*</sup>, S.E. Chernyshov<sup>2\*\*</sup>

1 – Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

2 – Perm National Research Polytechnic University, Perm

E-mail: \*popov@ipng.ru, \*\*nirgnf@bk.ru

**Abstract.** The results of numerical simulation of the distribution of a heterogeneous stress field near the well for a sandstone reservoir formation when creating slotted perforation are presented. Variations in permeability are predicted depending on changes in the magnitude of effective stresses. Areas of restoration of permeability after the creating of slotted channels are revealed. It is shown that slotted perforation is an effective method for stimulating hydrocarbon inflow.

**Keywords:** slotted perforation, numerical modeling, effective stresses, reservoir permeability.

**Citation:** Popov S.N., Chernyshov S.E. Numerical modeling of a heterogeneous stress-strain state and prediction of changes in the permeability of the near-wellbore zone when creating slotted perforation in a sandstone reservoir // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 4(31). P. 25–36. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-31.art3> (In Russ.).

### References

1. Gaivoronovskiy I.N., Kostitsyn V.I., Savich A.D., Chernykh I.A., Shumilov A.V. Ways of improvement of reservoir completion efficiency // Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry. 2016. No. 10. P. 62–65. (In Russ.).
2. Chernyshov S.E., Galkin S.V., Krisin N.I., Turbakov M.S., Ryabokon E.P. Efficiency improvement of abrasive jet perforation // SPE Annual Caspian Technical Conference and Exhibition, CTCE 2015, Baku, Azerbaijan, 4–6 November 2015. Conference paper: SPE-177375-MS. 8 p. <https://doi.org/10.2118/177375-MS>
3. Chernyshov S.E., Ryabokon E.P., Turbakov M.S., Krysin N.I. Pat. RU 2645059 C1. Method of slotted hydro-sandblasting perforation. No. 2016141101; Declared 19.10.2016; Publ. 15.02.2018 // Inventions. Useful models. Bull. No. 5. 7 p. <http://www1.fips.ru>
4. Krysin N.I., Ryabokon E.P., Turbakov M.S., Chernyshov S.E., Scherbakov A.A. Improvement of devices of abrasive jet perforation in oil wells // Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry. 2016. No. 8. P. 129–131. (In Russ.).
5. Kritsanaphak K., Tirichine S., Abed M. Using hydrajert perforating technique as an effective alternative to explosive perforating for Algerian oil and gas fields // IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. Ho Chi Minh City, Vietnam. 1–3 November 2010. Conference paper: SPE-136066-MS. 14 p. <https://doi.org/10.2118/136066-MS>
6. Salikhov R.G., Krapivina T.N., Krysin N.I. The field trials of slotted sand blast perforation of productive deposits. St. Petersburg: Nedra, 2005. 180 p. (In Russ.).

7. *Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., Gladyshev S.V., Popov S.N., Matyashov S.V.* Changes in the stress-strain state and the filtration-capacitive properties of a fractured productive object during slot perforation // *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2002. No. 11. P. 15–21. (In Russ.).

8. *Ashikhmin S.G., Chernyshov S.E., Kashnikov Yu.A., Macdonald D.I.M.* A geomechanical analysis of orientation and placement of jet slots on terrigenous reservoir permeability // *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*. 2018. No. 6. P. 132–135. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-6-132-135> (In Russ.).

9. ANSYS. Technical description. 2019.

10. *Popov S.N., Smetannikov O.Yu.* Development of a numerical model of a granular reservoir near-well zone that takes into account the changes in porosity and permeability under the influence of injected water and varying effective stresses // *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2018. No. 8. P. 52–59. <https://doi.org/10.30713/2413-5011-2018-8-52-59> (In Russ.).

11. *Popov S.N.* Development of 3D geomechanical model of the Achimov deposits of one of the fields of the Far North // *Actual Problems of Oil and Gas*. 2019. Iss. 2(25). P. 3. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-25.art3> (In Russ.).