УДК 531.72, 536.422, 004.942

DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_6\_0\_56

# ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОГИДРАТНЫЕ ПЛАСТЫ

Е.А. Петров<sup>1</sup>, И.Э. Джариев<sup>1</sup>, О.Р. Попов<sup>2</sup>, С.М. Сысоев<sup>1</sup>

¹ Сургутский государственный университет, Сургут, Россия, e-mail: petrov\_ea@surgu.ru ² Южное отделение MOO «Академия информатизации образования», Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация: Развитие существующих технологий добычи полезных ископаемых посредством скважин (дегазация при добыче угля, выщелачивание металлов, добыча нефти и газа) невозможно без построения новых моделей, позволяющих проводить как качественные оценки, так и количественные расчеты основных процессов, проходящих в горных породах. Процессы фильтрации в пористых средах, заполненных твердым газогидратом или жидкостью, при депрессии и с тепловыми эффектами (в том числе, электромагнитным нагревом), приводящими к фазовым переходам (разложение газогидрата, кипение жидкости) могут быть реализованы численными методами, на основе использования двумерной осесимметричной модели. В работе приводится результат исследования близкой к реальным условиям математической модели разложения гидрата газа в пористых средах под действием сверхвысокочастотного электромагнитного нагрева. В качестве дополнения к вычислительному моделированию разложения гидрата газа в пористых средах под действием СВЧ электромагнитного нагрева предлагается применение решетчатой модели пористой среды на основе теории перколяции для прогнозирования динамики емкостных характеристик пластов при фильтровании различных активных растворов. При этом следует ожидать возникновения дополнительных эффектов, которые можно предсказать теоретически, основываясь на положениях перколяционных моделей.

**Ключевые слова:** разложение газовых гидратов, математическое моделирование, процесс фильтрации, теория перколяции, сверхвысокочастотный электромагнитный нагрев, добыча газа.

**Для цитирования:** Петров Е. А., Джариев И. Э., Попов О. Р., Сысоев С. М. Подход к прогнозированию универсальных динамических процессов на примере моделирования электромагнитного воздействия на газогидратные пласты // Горный информационно-аналитический бюллетень. − 2023. − № 6. − С. 56−66. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_6\_0\_56.

# An approach to prediction of universal dynamic processes: A case-study of modeling electromagnetic effect on gas-hydrate strata

E.A. Petrov<sup>1</sup>, I.E. Dzhariev<sup>1</sup>, O.R. Popov<sup>2</sup>, S.M. Sysoev<sup>1</sup>

Surgut State University, Surgut, Russia, e-mail: petrov\_ea@surgu.ru
 Southern branch of NGO «Academy of Informatization of Education», Rostov-on-Don, Russia

**Abstract:** The present-day technological development of mineral extraction via boreholes (gas drainage in coal mining, in-situ metal leaching, oil and gas recovery) is impossible without advanced modeling which enables both qualitative and quantitative assessment of many critical processes in rock mass. The permeation processes in porous media filled with solid gas-hydrate or fluid under the action of depression or heat (including electromagnetic heating), which initiate phase transitions (decomposition of gas-hydrate, boiling of liquid), can be modeled numerically using 2D axially symmetric models. This study describes the result obtained from a near-real-life mathematical model of gas hydrate decomposition in porous media under the action of super-high-frequency electromagnetic heating. As a supplement to the computational modeling of gas hydrate decomposition in porous media under the impact of SHF EM heating, it is proposed to use a lattice model of a porous media based on theory of percolation for predicting the poroperm properties of rocks during flow of different active solutions in them. It should be anticipated that some extra effects may appear, which can be predicted theoretically, using provisions of percolation models.

*Key words*: gas hydrate decomposition, mathematical modeling, permeation process, percolation theory, super-high-frequency electromagnetic heating, gas production.

*For citation:* Petrov E. A., Dzhariev I. E., Popov O. R., Sysoev S. M. An approach to prediction of universal dynamic processes: A case-study of modeling electromagnetic effect on gas-hydrate strata. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(6):56-66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236 1493 2023 6 0 56.

### Введение

В связи с развитием промышленности потребность в энергетических ресурсах постоянно растет [1 – 3]. Учеными разных стран проводятся исследования по повышению эффективности извлечения полезных ископаемых как с поверхности Земли, так и из ее глубин. Эти задачи успешно решаются и в России [4 — 7]. Газовые гидраты являются одним из главных запасов природного газа [8, 9]. Сложность геологических условий препятствует извлечению метана из гидратных коллекторов. Существует множество методов воздействия на газогидрат [10, 11]. Однако термическая стимуляция электромагнитным излучением является наиболее перспективным методом [12, 13]. Аналогичные методы успешно применяются и в смежных областях [14].

Современное развитие Индустрии 4.0 подразумевает цифровизацию производства [15], а также широкое применение

интеллектуальных систем и математических моделей [16] для оптимизации и повышения эффективности производственных процессов и технологий [17—19]. Просачивание газа в пористых средах носит общий характер с явлением перколяции (отангл. percolation — протекание). Теория перколяции дает возможность описать процессы, когда при плавном изменении одного из параметров системы (температуры, концентрации и т.п.) свойства всей системы меняются скачком [20].

В течение последних десятилетий перколяционное моделирование широкого класса так называемых критических явлений показало их универсальность с математической точки зрения. Оказалось, что процессы различной природы такие, как проникновение жидкости или газа внутрь пористого камня, распространение эпидемий или информации в социальной сети, математическим образом сходятся в аддитивную компоненту [21].

# Размерность пространства Dimension of space

|   | Размерность пространства |             |       |              |       |
|---|--------------------------|-------------|-------|--------------|-------|
|   | d = 2                    | d = 3       | d = 4 | <i>d</i> = 5 | d ≥ 6 |
| β | 5/36                     | 0,417±0,003 | 0,5   | 0,7          | 1     |
| ν | 4/3                      | 0,875±0,008 | 0,7   | 0,6          | 1/2   |
| γ | 43/18                    | 1,795±0,005 | 1,8   | 1,6          | 1     |

Методы стохастической геометрии позволяют описать явления переноса в пористых средах. Математическое исследование просачивания позволяет решать как практические, так и теоретические задачи.

Теория перколяции позволяет установить вероятность того, что существует открытый путь из 0 до бесконечности, который связывает между собой поры и узлы в бесконечный кластер [22]. В основном, теория касается существования такого кластера и его структуры по отношению к вероятности заполнения пор и узлов газом [23, 24].

Существуют три модели теории перколяции: решеточные, континуальные, градиентные [25-27].

Критическая температура является условием для перехода между двумя фазами в теории температурных фазовых переходов. Главная особенность перколяционного перехода состоит в том, что он является геометрическим фазовым переходом. Фазы конечных кластеров или одного бесконечного кластера являются порогом перколяции при наступлении критической концентрации.

Аналогией температуры в температурных фазовых переходах в перколяции является концентрация занятых узлов. В первом случае параметр системы — это температура, а во втором — вероятность того, что узел принадлежит бесконечному кластеру. Существуют показательные функции, описывающие важные характеристики кластера.

$$P_{\infty}(p) \propto |p-p_{c}|^{\beta}$$
, (1)

где  $P_{\infty}$  — параметр порядка, описывающий порядок в перколяционной системе.

Радиус корреляционных флуктуаций находится:

$$\xi(p) \propto (p_c - p)^{\mathrm{v}}$$
. (2)

Среднее количество узлов последнего кластера определяется как

$$S(p) \propto |p - p_c|^{-\gamma}$$
. (3)

Универсальность позволяет решать вопросы прогнозирования динамических процессов при перколяционных переходах, исходя из общих представлений о наиболее вероятном местонахождении каждого компонента при заданных условиях.

### Метод

Разложение газогидрата моделируется в среде, представляющей собой горизонтальный пласт заданной толщины, заключенный между плоскостями, перпендикулярными оси z. Кровля и подошва являются неограниченной, непроницаемой и теплоизолированной областью, у которой теплофизические характеристики отличаются от характеристик пласта. Считается, что скелет пористой породы и газовый гидрат несжимаемы и неподвижны, газ является совершенным, вода несжимаема; движение газа и воды подчиняется закону двухфазной фильтрации Дарси, капиллярные эффекты не учитываются [25].

В скважину на уровне пласта помещен источник мощностью в несколько десятков киловатт, излучающий электромагнитные волны в радиальном направлении. Вследствие объемного поглощения электромагнитной энергии вокруг скважины происходит разогрев пласта и прилегающих пород, приводящий к разложению гидрата метана.

Разложение газового гидрата на газ и воду происходит в соответствии со следующей схемой

$$nH_2O \cdot CH_4(\epsilon u\partial \rho am) \rightarrow nH_2O(\epsilon o\partial a) + CH_4(\epsilon as)$$
 (4)

Основные уравнения, описывающие динамику равновесной смеси газа, воды и газового гидрата в пористой среде, представляют собой законы сохранения массы воды, массы газа, массы газогидрата, при этом общая насыщенность равна 1.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ m s_w \rho_w \right] + \nabla \cdot \rho_w \nu_w = q_w , \qquad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ m(1 - s_w - s_h) \rho_g \right] + \nabla \cdot \rho_g v_g = q_g \tilde{g}$$
 (6)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ m s_h \rho_h \right] = -q_h \,, \tag{7}$$

где m- пористость; s- насыщенность;  $\rho-$  плотность; v- скорость фильтрации флюида; q- количество вещества, выделяемого в единицу времени из газогидрата; t- время; индексы h, w, g обозначают гидрат, воду и газ соответственно.

Скорости фильтрации воды и газа определяются законом Дарси:

$$v_{w} = -\frac{Kk_{rw}}{\eta_{w}} \nabla \left( P - \rho_{w} \widetilde{g} z \right), \tag{8}$$

$$v_{g} = -\frac{Kk_{rg}}{\eta_{g}} \nabla \left( P - \rho_{g} \widetilde{g} z \right), \tag{9}$$

где K- проницаемость пласта в присутствии газогидрата в порах;  $k_{_{\Gamma}}-$  относительная фазовая проницаемость;  $\eta-$  динамическая вязкость флюида; P- давление;  $\tilde{g}-$  ускорение свободного падения; z- координата по вертикальной оси).

Закон сохранения энергии записывается следующим образом:

$$(\rho C)_{e} \frac{\partial T}{\partial t} - mQ\rho_{h} \frac{\partial s_{h}}{\partial t} - m(1 - s_{h} - s_{w}) \frac{\partial P}{\partial t} + + (\rho_{w} \vec{v}_{w} C_{w} + \rho_{q} \vec{v}_{q} C_{q}) \nabla T + \vec{v}_{w} \nabla P = \nabla \cdot (\lambda_{e} \nabla T) + Q_{H}$$
(10)

где C — теплоемкость; T — температура; Q — теплота диссоциации газогидрата,

$$Q_{H} = \frac{\alpha W \Psi(z)}{2\pi r} \exp\left[\alpha (b-r)\right]. \tag{11}$$

Последнее слагаемое в выражении (10) —  $Q_{\rm H}$  — плотность объемного тепловыделения, возникающего вследствие поглощения электромагнитного излучения (закон Бугера-Ламберта с учетом геометрической расходимости излучения). В выражении (11)  $\alpha$  — показатель поглощения электромагнитного излучения в среде; W — линейная мощность излучателя (Ватт на единицу длины по оси z); b — радиус скважины, r — радиальное направление.

Начальные и граничные условия следующие:

$$T(r,z,0) = T_0, P(r,z,0) = P_0, s_h(r,z,0) = s_{h0}, s_w(r,z,0) = s_{w0}.$$
 (12)

На верхней и нижней границах пласта граничные условия для уравнений (8) — (9) записываются в виде  $v_{w,a} = 0$ .

Боковая граница открыта для потоков тепла и массы T = const, P = const.

Давление внутри скважины определяется по  $\left.P(r,z,t)\right|_{r=b}=P_{b}$  .

## Результаты

Исследование модели проводилось при следующих значениях: мощность источника электромагнитного излучения  $W = 5 \text{ кВт/м}, f = 2,45 \Gamma \Gamma \text{ц}.$ 

В работе моделировался процесс диссоциации газогидрата в пористой среде газогидратной залежи при ее нагреве электромагнитным излучением в течение 10 сут (240 ч).

При проведении численного исследования модели получены пространственные и временные распределения гидратонасыщенности, водонасыщенности, газонасыщенности от времени нагрева.

Исследование модели проведено для случая репрессионного воздействия на пласт (забойное давление больше давления в пласте).

На рис. 1 представлены результаты расчетов гидратонасыщенности, водонасыщенности и газонасыщенности в пласте в зависимости от радиального расстояния от источника излучения для времени нагрева  $t=240\,\mathrm{y}$ .

При частоте излучения источника, равной 2,45 ГГц кривая разложения газового гидрата ведет себя следующим образом. На расстоянии от скважины чуть больше 6 м виден резкий скачок двух кривых: красной — вниз, черной — вверх. Данное резкое изменение описывается фазовым переходом второго рода для газогидрата и газа, что говорит нам о возможности применения теории перколяции для нашей модели.

На рис. 2 демонстрируется динамика распространения области объемного тепловыделения от 24 до 240 ч действия источника сверхвысокочастотного излучения на продуктивный пласт. Полная диссоциация газогидрата на газ и воду видна по поведению кривых.

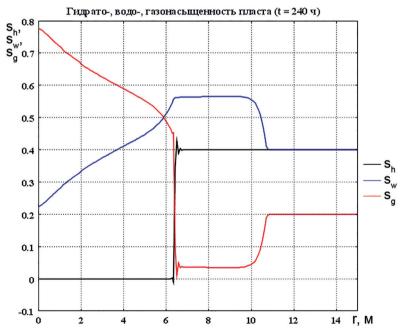


Рис. 1. Зависимость гидрато-, водо- и газонасыщенности от радиального расстояния Fig. 1. The dependence of hydrate, water and gas saturation on radial distance

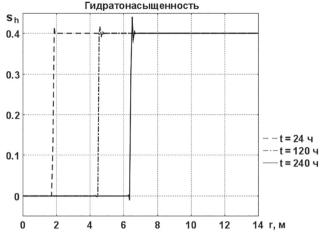


Рис. 2. Зависимость гидратонасыщенности от радиального расстояния для трех времен нагрева Fig. 2. The hydrate saturation in the reservoir for three times of heating

На основе экспериментальных данных, полученных с модели нагрева ЭМИ в течение 240 ч и с помощью интерполяции удается эмпирическим путем вывести уравнение для кривой и построить линии аппроксимации.

На рис. 3 кривая с угловым коэффициентом b, равным 96,44, демонстрирует скачкообразное изменение гидратонасыщенности от 0 до 40%, что свидетельствует о резком фазовом переходе

второго рода с объемной зоной тепловыделения. Резкий переход гидрата из твердого состояния в газообразное обеспечивается наличием СВЧ-источника электромагнитного излучения с частотой 2,45 ГГц. Синяя линия аппроксимации описывает фазовый переход второго рода без теплообмена. В случае изменения коэффициента от 10 до 1 функцией f(x) описывается фазовый переход первого рода.

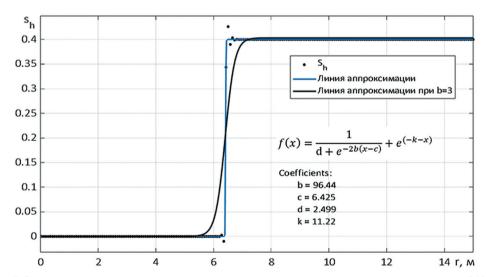


Рис. 3. Зависимость гидратонасыщенности от радиального расстояния для времени нагрева t = 240 ч Fig. 3. The dependence of hydrate saturation on radial distance for heating time t = 240 h

Полученное уравнение в дальнейшем будет использовано для моделирования динамики разложения газового гидрата в других средах в зависимости от геометрии пласта, частоты и мощности источника излучения [26 — 28].

### Заключение

Прикладное значение данной работы состоит в использовании предложенной модели при воздействии на пласт и нагреве электромагнитным излучением частотой f = 2,45 ГГц и мощностью W = 5 кВт для стимулирования добычи газа из газогидратных залежей. В ходе исследования заложена основа для применения теории перколяции в качестве дополнения к модели воздействия на пласт, содержащий газовые гидраты, сверхвысокочастотного электромагнитного из-

лучения. Аппроксимации данных, полученные с помощью компьютерного моделирования и управления коэффициентами, позволяют изменять условия фазового перехода. Данная методика свидетельствует о потенциале ее дальнейшего применении для исследований на основе решетчатой модели теории перколяции.

Модель позволяет поставить проблему прогнозирования динамики емкостных характеристик пластов при фильтровании различных активных растворов, что дает возможность оптимизировать процесс и способствует повышению нефтеотдачи пласта. На основе полученных данных возможно возникновение дополнительных эффектов, которые можно спрогнозировать, основываясь на положениях перколяционной теории.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Amez I., León D., Ivannikov A., Kolikov K., Castells B. Potential of CBM as an energy vector in active mines and abandoned mines in Russia and Europe // Energies. 2023, vol. 16, no. 3, article 1196. DOI: 10.3390/en16031196.
- 2. Zhukovskiy Y. L., Batueva D. E., Buldysko A. D., Gil B., Starshaia V. V. Fossil energy in the framework of sustainable development: Analysis of prospects and development of forecast scenarios // Energies. 2021, vol. 14, no. 17, article 5268. DOI: 10.3390/en14175268.
- 3. Dvoynikov M., Buslaev G., Kunshin A., Sidorov D., Kraslawski A., Budovskaya M. New concepts of hydrogen production and storage in Arctic region // Resources. 2021, vol. 10, no. 1. DOI: 10.3390/resources10010003.
- 4. Лисин Э., Рогалев Н., Оклей П. Разработка модели оценки влияния структуры производственных мощностей энергосистемы на региональную энергобезопасность // Terra Economicus. 2019. № 17(2). С. 96—111. DOI: 10.23683/2073-6606-2019-17-2-96-111.
- 5. Gizatullin R., Dvoynikov M., Romanova N., Nikitin V. Drilling in gas hydrates: Managing gas appearance risks // Energies. 2023, vol. 16, no. 5, article 2387. DOI: 10.3390/en16052387.
- 6. Циглиану П. П., Ромашева Н. В., Фадеева М. Л., Петров И. В. Инженерные проекты в топливно-энергетическом комплексе России: актуальные проблемы, факторы и рекомендации по развитию // Уголь. 2023. № 173. С. 45 51. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-45-51.
- 7. Lisin E., Kurdiukova G. Energy supply system development management mechanisms from the standpoint of efficient use of energy resources // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 666, no. 6, article 062090. DOI: 10.1088/1755-1315/666/6/062090.
- 8. *Makogon Y. F.* Natural gas hydrates A promising source of energy // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2010, vol. 2, no. 1, pp. 49 59. DOI: 10.1016/j.jngse.2009.12.004.
- 9. Chong Z. R., Yang S. H. B., Babu P., Linga P., Li X.-S. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges // Applied Energy. 2016, vol. 162, pp. 1633—1652. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.12.061.

- 10. Shurunov A., Sheremeev A., Kaeshkov I., Kolesnikov M., Bikkulov M., Uchuev R., Solodov S., Islamov R., Saitgareev I. Application of the HW with MSHF investigations to manage the development of low-permeability reservoirs / Society of Petroleum Engineers SPE Russian Petroleum Technology Conference, RPTC 2020. 2020. DOI: 10.2118/201911-MS.
- 11. Сластунов С. В., Коликов К. С., Мешков А. А., Садов А. П., Хаутиев А. М.-Б. Совершенствование технологии предварительной пластовой дегазации на основе гидрорасчленения разрабатываемых угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 6. С. 34-45. DOI:  $10.25018/0236_1493_2021_6_0_34$ .
- 12. Zhao J., Liu Y., Guo X., Wei R., Yu T., Xu L., Sun L., Yang L. Gas production behavior from hydrate-bearing fine natural sediments through optimized stepwise depressurization // Applied Energy. 2020, vol. 260, article 114275. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.11427.
- 13. Wang B., Dong H., Liu Y., Lv X., Liu Y., Zhao J., Song Y. Evaluation of thermal stimulation on gas production from depressurized methane hydrate deposits // Applied Energy. 2018, vol. 227, pp. 710 718. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.08.005.
- 14. Lekomtsev A. V., Ilyushin P. Y., Stepanenko I. B., Mekhanoshina O. R., Bakaneev V. S., Korobov G. Yu., Kang W. Technology of stable water-oil emulsion breaking by magnetic impact // Chemical and Petroleum Engineering. 2021, vol. 57, no. 1-2, pp. 98 105. DOI: 10.1007/s10556-021-00901-4.
- 15. Дерябин С. А., Кондратьев Е. И., Рзазаде Ульви Азар оглы, Темкин И. О. Язык моделирования архитектуры цифрового предприятия: методологический подход к проектированию систем Индустрии 4.0 // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 2. С. 97 110. DOI: 10.25018/0236 1493 2022 2 0 97.
- 16. Beloglazov I., Krylov K. An interval-simplex approach to determine technological parameters from experimental data // Mathematics. 2022, vol. 10, no. 16, article 2959. DOI: 10.3390/math10162959.
- 17. *Iakovleva E., Belova M., Soares A.* Specific features of mapping large discontinuous faults by the method of electromagnetic emission // Resources. 2020, vol. 9, no. 11, article 135. DOI: 10.3390/resources9110135.
- 18. Темкин И. О., Клебанов Д. А., Дерябин С. А., Конов И. С. Построение интеллектуальной геоинформационной системы горного предприятия с использованием методов прогнозной аналитики // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3. С. 114 125. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125.
- 19. *Iakovleva E., Belova M., Soares A., Rassõlkin A.* On the issues of spatial modeling of non-standard profiles by the example of electromagnetic emission measurement data // Sustainability. 2022, vol. 14, no. 1, article 574. DOI: 10.3390/su14010574.
- 20. Бардин И. В. Модели описания и решения задач системного анализа при мониторинге чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса, автореферат дис. ... кандидата технических наук. СПб., 2010. 25 с.
- 21. Ming Li, Run-Ran Liu, Linyuan Lu, Mao-Bin Hu, Shuqi Xu, Yi-Cheng Zhang Percolation on complex networks: Theory and application // Physics Reports. 2021, vol. 907, pp. 1–68. DOI: 10.1016/j.physrep.2020.12.003.
- 22. Brunk N. E., Twarock R. Percolation theory reveals biophysical properties of virus-like particles // ACS Nano. 2021, vol. 15, no. 8, pp. 12988 12995. DOI: 10.1021/acsnano.1c01882.
- 23. Жуков Д. О., Хватова Т. Ю., Зальцман А. Д. Моделирование стохастической динамики изменения состояний узлов и перколяционных переходов в социальных сетях с учетом самоорганизации и наличия памяти // Информатика и ее применения. 2021. Т. 15. № 1. С. 102 110. DOI: 10.14357/19922264210114.
- 24. Иудин Д. И., Гелашвили Д. Б., Розенберг Г. С. Биологические и экологические аспекты теории перколяции // Успехи современной биологии. 2010. Т. 130. № 5. С. 446 460.

- 25. Сысоев С. М., Алексеев М. М., Петров Е. А. Численное моделирование процесса разложения газогидрата в пористой среде, вызванного сверхвысокочастотным электромагнитным нагревом // Вестник кибернетики. 2021. № 2(42). С. 60-71. DOI: 10.34822/1999-7604-2021-2-60-71.
- 26. Шабаров А. Б., Шаталов А. В., Марков П. В., Шаталова Н. В. Методы определения функций относительной фазовой проницаемости в задачах многофазной фильтрации // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Т. 4. № 1. С. 79 109. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-1-79-109.
- 27. Galechyan A., Kadet V., Zemtsov Y. Percolation model of two-phase flow under the influence of microdispersed water-gas mixture in oil reservoir / EAGE 2020 Annual Conference & Exhibition Online. EAGE Publications BV, 2020, vol. 2020, no. 1, pp. 1 5. DOI: 10.3997/2214-4609.202011710.
- 28. *Кравченко М. Н., Кадет В. В., Ярыш В. В., Диева Н. Н., Лищук А. Н.* Перколяционный подход к гидродинамическому моделированию заводнения с использованием активных агентов // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. 2020. № 1. С. 29 35. DOI: 10.5510/OGP20200100419. 

   28. Кравченко М. Н., Кадет В. В., Ярыш В. В., Диева Н. Н., Лищук А. Н. Перколяционный подход к гидрованию заводнения с использованием за использова

### REFERENCES

- 1. Amez I., León D., Ivannikov A., Kolikov K., Castells B. Potential of CBM as an energy vector in active mines and abandoned mines in Russia and Europe. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 3, article 1196. DOI: 10.3390/en16031196.
- 2. Zhukovskiy Y. L., Batueva D. E., Buldysko A. D., Gil B., Starshaia V. V. Fossil energy in the framework of sustainable development: Analysis of prospects and development of forecast scenarios. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 17, article 5268. DOI: 10.3390/en14175268.
- 3. Dvoynikov M., Buslaev G., Kunshin A., Sidorov D., Kraslawski A., Budovskaya M. New concepts of hydrogen production and storage in Arctic region. *Resources*. 2021, vol. 10, no. 1. DOI: 10.3390/resources10010003.
- 4. Lisin E., Rogalev N., Okley P. The impact model of the production capacities structure of the energy system and the regional energy security. *Terra Economicus*. 2019, no. 17(2), pp. 96—111. [In Russ]. DOI: 10.23683/2073-6606-2019-17-2-96-111.
- 5. Gizatullin R., Dvoynikov M., Romanova N., Nikitin V. Drilling in gas hydrates: Managing gas appearance risks. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 5, article 2387. DOI: 10.3390/en16052387.
- 6. Tsyglianu P. P., Romasheva N. V., Fadeeva M. I., Petrov I. V. Engineering projects in the russian fuel and energy complex: actual problems, factors and recommendations for development. *Ugol*'. 2023, no. 173, pp. 45 51. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-45-51.
- 7. Lisin E., Kurdiukova G. Energy supply system development management mechanisms from the standpoint of efficient use of energy resources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 666, no. 6, article 062090. DOI: 10.1088/1755-1315/666/6/062090.
- 8. Makogon Y. F. Natural gas hydrates A promising source of energy. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2010, vol. 2, no. 1, pp. 49 59. DOI: 10.1016/j.jngse.2009.12.004.
- 9. Chong Z. R., Yang S. H. B., Babu P., Linga P., Li X.-S. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. *Applied Energy*. 2016, vol. 162, pp. 1633 1652. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.12.061.
- 10. Shurunov A., Sheremeev A., Kaeshkov I., Kolesnikov M., Bikkulov M., Uchuev R., Solodov S., Islamov R., Saitgareev I. Application of the HW with MSHF investigations to manage the development of low-permeability reservoirs. *Society of Petroleum Engineers SPE Russian Petroleum Technology Conference, RPTC 2020.* 2020. DOI: 10.2118/201911-MS.
- 11. Slastunov S. V., Kolikov K. S., Meshkov A. A., Sadov A. P., Khautiev A. M.-B. Improvement of pre-drainage technology based on hydraulic dissection of coal beds. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 6, pp. 34 45. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236 1493 2021 6 0 34.

- 12. Zhao J., Liu Y., Guo X., Wei R., Yu T., Xu L., Sun L., Yang L. Gas production behavior from hydrate-bearing fine natural sediments through optimized stepwise depressurization. *Applied Energy*. 2020, vol. 260, article 114275. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.11427.
- 13. Wang B., Dong H., Liu Y., Lv X., Liu Y., Zhao J., Song Y. Evaluation of thermal stimulation on gas production from depressurized methane hydrate deposits. *Applied Energy*. 2018, vol. 227, pp. 710 718. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.08.005.
- 14. Lekomtsev A. V., Ilyushin P. Y., Stepanenko I. B., Mekhanoshina O. R., Bakaneev V. S., Korobov G. Yu., Kang W. Technology of stable water-oil emulsion breaking by magnetic impact. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021, vol. 57, no. 1-2, pp. 98 105. DOI: 10.1007/s10556-021-00901-4.
- 15. Deryabin S. A., Kondratev E. I., Rzazade Ulvi Azar ogly, Temkin I. O. Digital Mine architecture modeling language: Methodological approach to design in Industry 4.0. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 2, pp. 97 110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236 1493 2022 2 0 97.
- 16. Beloglazov I., Krylov K. An interval-simplex approach to determine technological parameters from experimental data. *Mathematics*. 2022, vol. 10, no. 16, article 2959. DOI: 10.3390/math10162959.
- 17. Iakovleva E., Belova M., Soares A. Specific features of mapping large discontinuous faults by the method of electromagnetic emission. *Resources*. 2020, vol. 9, no. 11, article 135. DOI: 10.3390/resources9110135.
- 18. Temkin I. O., Klebanov D. A., Deryabin S. A., Konov I. S. Construction of intelligent geoinformation system for a mine using forecasting analytics techniques. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3, pp. 114–125. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125.
- 19. Iakovleva E., Belova M., Soares A., Rassõlkin A. On the issues of spatial modeling of non-standard profiles by the example of electromagnetic emission measurement data. *Sustainability*. 2022, vol. 14, no. 1, article 574. DOI: 10.3390/su14010574.
- 20. Bardin I. V. Modeli opisaniya i resheniya zadach sistemnogo analiza pri monitoringe chrezvychaynykh situatsiy na ob"ektakh neftegazovogo kompleksa [Models for describing and solving problems of system analysis in monitoring emergency situations at oil and gas facilities], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, 2010, 25 p.
- 21. Ming Li, Run-Ran Liu, Linyuan Lu, Mao-Bin Hu, Shuqi Xu, Yi-Cheng Zhang Percolation on complex networks: Theory and application. *Physics Reports.* 2021, vol. 907, pp. 1—68. DOI: 10.1016/j.physrep.2020.12.003.
- 22. Brunk N. E., Twarock R. Percolation theory reveals biophysical properties of virus-like particles. *ACS Nano*. 2021, vol. 15, no. 8, pp. 12988 12995. DOI: 10.1021/acsnano.1c01882.
- 23. Zhukov D. O., Khvatova T. Y., Zaltsman A. D. Modeling of the stochastic dynamics of changes in node states and percolation transitions in social networks with self-organization and memory. *Informatics and its Applications*. 2021, vol. 15, no. 1, pp. 102 110. [In Russ]. DOI: 10.14357/19922264210114.
- 24. Iudin D. I., Gelashvili D. B., Rosenberg G. S. Biological and ecological aspects of the theory of percolation. *Advances in current biology*. 2010, vol. 130, no. 5, pp. 446 460. [In Russ].
- 25. Sysoev S. M., Alekseev M. M., Petrov E. A. Numerical simulation of the decomposition of gas hydrate in a porous medium using microwave heating. *Proceedings in Cybernetics*. 2021, no. 2(42), pp. 60 71. [In Russ]. DOI: 10.34822/1999-7604-2021-2-60-71.
- 26. Shabarov A. B., Shatalov A. V., Markov P. V., Shatalova N. V. Methods for determining relative phase permeability functions in multiphase filtration problems. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy.* 2018, vol. 4, no. 1, pp. 79 109. [In Russ]. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-1-79-109.
- 27. Galechyan A., Kadet V., Zemtsov Y. Percolation model of two-phase flow under the influence of microdispersed water-gas mixture in oil reservoir. *EAGE 2020 Annual Conference & Exhibition Online*. EAGE Publications BV, 2020, vol. 2020, no. 1, pp. 1 5. DOI: 10.3997/2214-4609.202011710.

28. Kravchenko M. N., Kadet V. V., Yarysh V. V., Dieva N. N., Lishchuk A. N. Percolation approach to hydrodynamic modeling of flooding through active agents. *SOCAR Proceedings*. 2020, no. 1, pp. 29 – 35. [In Russ]. DOI: 10.5510/OGP20200100419.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Егор Аркадьевич $^1$  — аспирант, младший научный сотрудник, e-mail: petrov ea@surgu.ru, ORCID ID: 0000-0002-4151-197X, Джариев Исмаил Эльшан оглы $^{1}$  — аспирант, младший научный сотрудник, e-mail: dzhariev ie@surgu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4068-1050, Попов Олег Русланович — канд. техн. наук, Южное отделение МОО «Академия информатизации образования», e-mail: cs41825@aaanet.ru, ORCID ID: 0000-0001-6209-3554, Сысоев Сергей Михайлович<sup>1</sup> — канд. физ.-мат. наук. e-mail: sysoev sm@surgu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5180-571X, <sup>1</sup> Сургутский государственный университет. Для контактов: Петров E.A., e-mail: petrov\_ea@surgu.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.A. Petrov<sup>1</sup>, Graduate Student, Junior Researcher. e-mail: petrov ea@surqu.ru. ORCID ID: 0000-0002-4151-197X, I.E. Dzhariev<sup>1</sup>, Graduate Student, Junior Researcher. e-mail: dzhariev ie@surqu.ru. ORCID ID: 0000-0003-4068-1050, O.R. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Southern branch of NGO «Academy of Informatization of Education», 344006, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: cs41825@aaanet.ru, ORCID ID: 0000-0001-6209-3554. S.M. Sysoev<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), e-mail: sysoev sm@surgu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5180-571X. <sup>1</sup> Surgut State University, 628412, Surgut, Russia. **Corresponding author**: E.A. Petrov, e-mail: petrov ea@surgu.ru.

Получена редакцией 15.03.2023; получена после рецензии 17.04.2023; принята к печати 10.05.2023. Received by the editors 15.03.2023; received after the review 17.04.2023; accepted for printing 10.05.2023.