

УДК 621.96

**Авраменко Андрій Миколайович**, канд. техн. наук., старш. наук. співр., відділ поршневих енергоустановок Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків, Україна. вулиця Пожарського, 2/10, Харків, Україна, 61000, Тел. +380 57 394 47 54. E-mail: [an0100@yandex.ru](mailto:an0100@yandex.ru) ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8130-1881>

### ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ РІДИНИ У АНІЗОТРОПНОМУ ПОРИСТОМУ ТІЛІ

*В роботі наведено результати порівняльного розрахункового дослідження параметрів процесу течії рідини у пористому тілі. Розглядається процес течії без урахування та з урахуванням анізотропії. Задача вирішується в тривимірній нестационарній постановці. При описі граничних умов використовуються результати експериментального дослідження.*

**Ключеві слова:** проникність, пористе тіло, витрата, закон Дарсі.

**Авраменко Андрей Николаевич**, канд. техн. наук., старш. научн. сотр., отдел поршневых энергоустановок. Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина. улица Пожарского, 2/10, Харьков, Украина, 61000. Тел. +380 57 394 47 54. E-mail: [an0100@yandex.ru](mailto:an0100@yandex.ru) ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8130-1881>

### ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ В АНИЗОТРОПНОМ ПОРИСТОМ ТЕЛЕ

*В работе приведены результаты сравнительного расчетного исследования параметров процесса течения жидкости в пористом теле. Рассматривается процесс течения жидкости без учета и с учетом анизотропии. Задача решается в трехмерной нестационарной постановке. При описании граничных условий используются результаты экспериментального исследования.*

**Ключевые слова:** проницаемость, пористое тело, расход, закон Дарси.

**Avramenko Andrey Nikolaevich**, Ph. D., Senior Researcher, department of power piston plants, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine. Str. Pozharskogo, 2/10, Kharkov, Ukraine, 61000. Tel. +380 57 394 47 54. E-mail: [an0100@yandex.ru](mailto:an0100@yandex.ru) ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8130-1881>

### IMPROVING THE ACCURACY NUMERICAL MODELING OF PROCESSES FILTRATION FLUIDS IN THE ANISOTROPIC POROUS BODY

*The paper presents the results of a comparative study estimated process parameters of fluid flow in a porous body. The process fluid flow without taking into account the anisotropy. The problem is solved in a three-dimensional non-stationary formulation. In the description of the boundary conditions used experimental results.*

**Keywords:** permeability, porous body, flow, Darcy's law.

#### Введение

С учетом современных темпов истощения мировых запасов нефти и газа разработку и освоение новых месторождений, а также оптимизацию добычи на существующих месторождениях невозможно представить без математического моделирования процессов в продуктивном пласте [1–6]. Построение гидродинамических и геологических моделей месторождения позволяет повысить уровень информированности разработчиков месторождения о процессах в призабойной зоне пласта (ПЗП) и в продуктивном пласте, а также спрогнозировать изменение дебита при дальнейшей разработке месторождения [5–7].

Численный анализ процесса фильтрации пластового флюида в поровом пространстве горной породы на примере кернов или ПЗП позволяет получить дополнительную информацию о месторождении и увеличить эффективность добычи нефти и газа.

#### Анализ публикаций

Крупные мировые нефтедобывающие компании, такие как Shell и Schlumberger используют специализированное программное обеспечение для моделирования процессов фильтрации флюида в кернах и продуктивном пласте [8]. В дальнейшем результаты

моделирования используются для выбора рациональных режимов эксплуатации добывающих скважин, прогнозной оценке дебитов и при реализации различных методов интенсификации добычи для малодебитных скважин [9, 10].

Как видно из обзора совершенствование методики численного моделирования процесса фильтрации жидкости в пористом теле и повышение точности и достоверности получаемых результатов является важной научной и практической задачей.

### Цель и задачи исследования

**Цель исследования** – провести численное моделирование процесса фильтрации жидкости в пористом теле и оценить пути повышения точности моделирования за счет учета анизотропии пористого тела.

В работе ставились такие задачи:

- провести обзор по современным подходам используемым для математического моделирования процесса фильтрации жидкости в пористом теле;
- провести экспериментальные исследования по оценке проницаемости пористого тела в выбранных направлениях;
- синтезировать расчетную область и расчетную сетку, описывающую конфигурацию образцов пористого тела и провести сравнительное численное моделирование процесса фильтрации жидкости;
- сделать выводы и рекомендации о эффективности используемой методики по учету анизотропных свойств пористого тела с целью повышения точности моделирования процесса фильтрации.

Основные этапы и результаты исследования сводятся к следующему. В представленной работе для оценки проницаемости пористого тела в выбранных направлениях была разработана экспериментальная установка. Принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

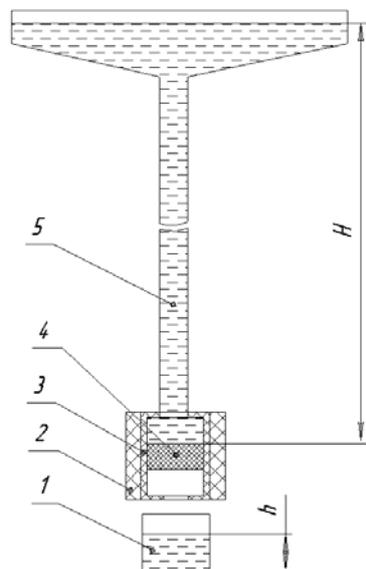


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки для определения объемного расхода жидкости через пористое тело:

- 1 – мерная ёмкость; 2 – корпус; 3 – уплотнитель (клеевой); 4 – пористое тело;  
5 – напорная магистраль

Высота столба жидкости в ходе сравнительных экспериментов поддерживалась равной 1540 мм (буква H – на рис. 1). В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Перед проведением сравнительных экспериментальных исследований образцы и рабочая жидкость термостатировались. В ходе эксперимента

контролировались параметры окружающей среды и объемный расход жидкости – уровень жидкости в мерной бюретке (буква  $h$  – на рис. 1.)

Схема отбора образцов из пористого тела для сравнительных исследований представлена на рис. 2.

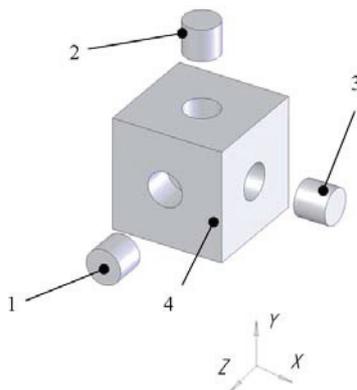


Рис. 2. Схема отбора образцов из пористого тела:  
1 – 3 – образцы; 4 – пористое тело

После отбора и механической обработки размеры трех образцов составили: диаметр образца 24 мм, высота образца 22 мм. Также в работе оценена активная пористость образцов (вычисленная по объему поглощенной жидкости), которая составила 16%. Проницаемость образцов пористого тела рассчитывалась по закону Дарси [11].

$$K = \frac{(Q \cdot \mu \cdot L)}{(\Delta P \cdot F)},$$

где  $K$  – проницаемость;  
 $Q$  – объемный расход жидкости;  
 $\mu$  – вязкость жидкости;  
 $L$  – длина образца;  
 $\Delta P$  – перепад давления;  
 $F$  – площадь фильтрации.

Результаты проведенного сравнительного экспериментального исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1  
 Результаты экспериментального определения расхода жидкости и  
 расчета проницаемости пористого тела

№ Образца	Ориентация вдоль оси	Q	K
		см <sup>3</sup> /с	мД
1	Z	0,000823	2,458
2	Y	0,000801	2,544
3	X	0,000929	2,948

Как видно из результатов проведенного сравнительного экспериментального исследования рассматриваемое в работе пористое тело имеет анизотропные свойства, которые необходимо учитывать при численном моделировании процесса фильтрации жидкости.

Далее в работе были проведены сравнительные расчетные исследования по оценке влияния анизотропных свойств пористого тела на точность результатов численного моделирования.

На рис. 3 представлены: фотография одного из образцов, расчетная область и расчетная сетка, которые в дальнейшем используются для численного моделирования процесса фильтрации.

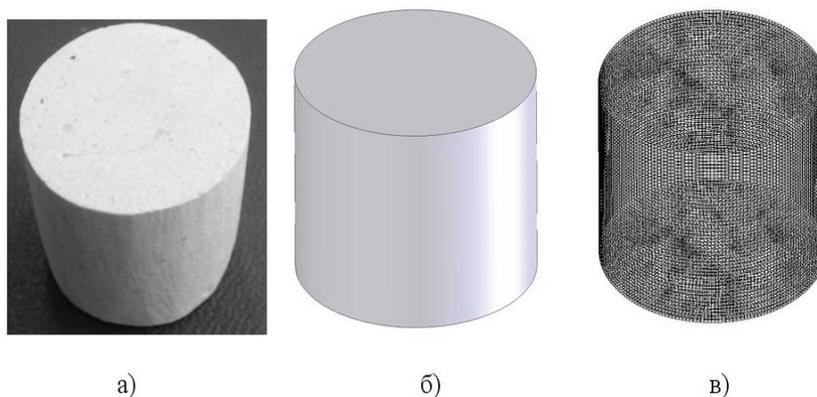


Рис. 3 – Пористое тело и описание его конфигурации при математическом моделировании процесса фильтрации жидкости:

а) – фото образца; б) – расчетная область; в) – расчетная сетка (248600 расчетных ячеек)

При описании процесса фильтрации жидкости через пористое тело в работе использовались такие модели:

– для описания теплообменных процессов между рабочим телом и стенкой модель “Thermal Energy”;

– процесс течения жидкости через пористое тело рассматривался, как ламинарный модель “Laminar”;

– в используемом программном комплексе для описания процесса течения жидкости и газа через пористое тело используются модели изотропного пористого тела “Isotropic loss model” и модель учитывающая анизотропные свойства пористого тела “Directional loss model”.

Используя дополнительные возможности программного комплекса и, с учетом цилиндрической формы исследуемого образца, в дальнейшем задача решалась в цилиндрических координатах. Первый расчетный вариант был рассмотрен без учета анизотропных свойств пористого тела (“Isotropic loss model”). В расчете рассматривался образец № 3 (см. рис. 2), а течение жидкости было выбрано в направлении оси X согласно данных проведенного ранее эксперимента.

Результаты расчетного исследования представлены на рис. 4 и табл. 2.

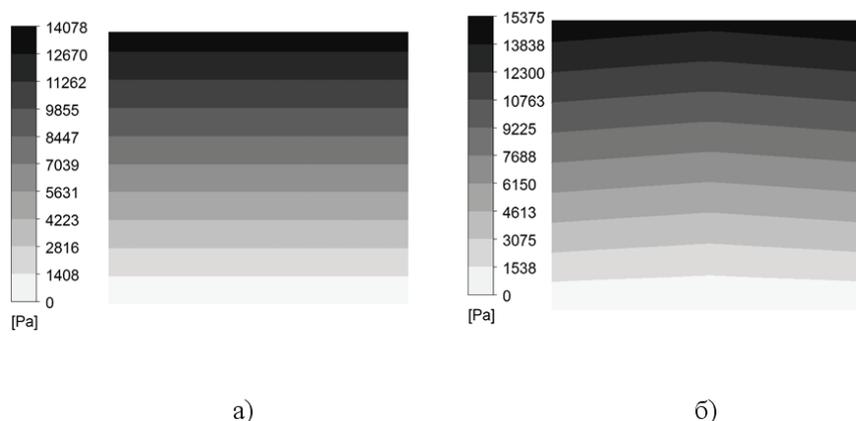


Рис. 4. Распределение давления жидкости по высоте пористого тела в меридиональном сечении (образец № 3):

а) – без учета анизотропии; б) – с учетом анизотропии

Таблица 2

Результаты сравнительного расчетного исследования

№	Направление потока	Р	$\Delta$	Прим.
		Па	%	
1	Вдоль оси X	15101,825 (эксперимент)	–	–
2	Вдоль оси X	14078	6,8	Без учета анизотропии
3	Вдоль оси X	15375,5	1,8	С учетом анизотропии

Для второго расчетного варианта в модели, описывающей расход жидкости, “Directional loss model” по радиусу расчетной области задавалась усредненная проницаемость (результатирующая в направлении осей Y и Z при постановке задачи в декартовых координатах). Значения проницаемости в направлении осей Y и Z были получены с использованием данных эксперимента (табл. 1).

Результаты моделирования процесса фильтрации жидкости через пористое тело (образец № 3) с учетом анизотропии также представлены на рис. 4.

Из результатов представленных на рис. 4 и в табл. 2 видно, что учет анизотропии пористого тела через дополнение, компьютерной модели данными о результирующей проницаемости в радиальном направлении позволило повысить точность результатов численного моделирования.

### Выводы

По результатам проведенного исследования можно отметить следующее:

- для повышения точности результатов при моделировании процесса фильтрации жидкости через анизотропное пористое тело (даже для пористых тел с экстремально низкой проницаемостью) необходимо учитывать анизотропные свойства последних;
- учет анизотропных свойств пористого тела при помощи внесения дополнительной информации о результирующей проницаемости в радиальном направлении позволило повысить точность результатов численного моделирования более чем в 3 раза.

### Список использованной литературы:

1. A. B. Dixit, J. S. Buckley, S. R. McDougall, and K. S. Sorbie. Empirical measures of wettability in porous media and the relationship between them derived from pore-scale modelling. *Transport in Porous Media*, 40: P 27–54, 2000.
2. Z. R. Liang, M. A. Ioannidis, and I. Chatzis. Permeability and electrical conductivity of porous media from 3D stochastic replicas of the microstructure. *Chemical Engineering Science*, 55:5247–5257, 2000.
3. Mattax C. C., Dalton, R. L. “Reservoir Simulation”, SPE Monograph v.13, 1990.
4. Мальцев Н. В. Прогнозирование изменения параметров работы скважины при выводе на режим // Нефть, газ и бизнес. – 2012. – № 8. – С. 72–75.
5. Мальцев Н. В. Оценка некоторых характеристик, расчет давлений и расположения границ раздела флюидов при моделировании процесса вывода скважины на режим // Нефть, газ и бизнес. – 2012. – № 9. – С. 75 – 79.
6. M. D. Jackson, P. H. Valvatne, and M. J. Blunt. Prediction of wettability variation and its impact on waterflooding using pore-to reservoir-scale simulation. Paper SPE 77543, Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 29 September–2 October, 2002.
7. D. A. DiCarlo, A. Sahni and M. J. Blunt. Three-phase relative permeability of water-wet, oil-wet and mixed-wet sandpacs. *SPE Journal*, 5(1): P 82–91, 2000.
- 8 A. B. Dixit, S. R. McDougall, and K. S. Sorbie. Analysis of relative permeability hysteresis trends in mixed-wet porous media using network models. Paper SPE 39656, Proceedings of the SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, 19–22 April, 1998.
9. Войтенко Ю.И. О возможности изменения фильтрационных и прочностных свойств плотных пород-коллекторов на мезо- и наноуровне при взрывном и термобарохимическом воздействии [Текст] / Ю. И. Войтенко, О. В. Кравченко, Д. А. Велигоцкий. – Труды международной научно-практической конференции

«Перспективы использования альтернативных и возобновляемых источников энергии в Украине (REU 2013)»: 2013. – С. 13–18.

10. Fernandes P. D. Simulation of Transient Pressure Behavior for a Well With a Finite- Conductivity Vertical Fracture [Текст] / P. D. Fernandes, T. J. Oliveira, S. D. Souza et. all. 5<sup>th</sup> Latin American CFD Workshop, Applied to the oil and gas industry. 2012. – P. 1–22.

11. Леонтьев Н. Е. Основы теории фильтрации. – М.:МГУ, 2009. – 88 с.

#### References:

1. A. B. Dixit, J. S. Buckley, S. R. McDougall, and K. S. Sorbie. Empirical measures of wettability in porous media and the relationship between them derived from pore-scale modelling. *Transport in Porous Media*, 40: P. 27–54, 2000

2. Z. R. Liang, M. A. Ioannidis and I. Chatzis. Permeability and electrical conductivity of porous media from 3D stochastic replicas of the microstructure. *Chemical Engineering Science*, 55: P. 5247–5257, 2000.

3. Mattax, C. C., Dalton, R. L. “Reservoir Simulation”, SPE Monograph v.13, 1990.

4. Maltsev N.V. forecasting of change of parameters of job of a chink at a conclusion to a mode // Oil, gas and business. – 2012. – № 8. – With. P. 72–75.

5. Maltsev N.V. rating of some characteristics, calculation of pressure and arrangements of borders of the unit of fluids at modelling process of a conclusion of a chink on a mode // Oil, gas and business. – 2012. – № 9. - With. P.75–79.

6. M. D. Jackson, P. H. Valvatne and M. J. Blunt. Prediction of wettability variation and its impact on waterflooding using pore-to reservoir-scale simulation. Paper SPE 77543, Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 29 September–2 October, 2002.

7. D. A. DiCarlo, A. Sahni and M. J. Blunt. Three-phase relative permeability of water-wet, oil-wet and mixed-wet sandpacks. *SPE Journal*, 5(1): P. 82–91, 2000.

8. A. B. Dixit, S. R. McDougall and K. S. Sorbie. Analysis of relative permeability hysteresis trends in mixed-wet porous media using network models. Paper SPE 39656, Proceedings of the SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, 19–22 April, 1998.

9. Voitenko Y. I., Kravchenko O. V., Velighotskiy D. A. (2013). About an opportunity of change filtrational and durability properties of dense breeds - collectors on meso-and nanolevel at explosive and thermobarochemical influence. Works of the international scientific - practical conference «Prospects of use of alternative and renewed energy sources in Ukraine (REU 2013)»: P. 13–18.

10. Fernandes P. D. Simulation of Transient Pressure Behavior for a Well With a Finite- Conductivity Vertical Fracture [Text] / P. D. Fernandes, T. J. Oliveira, S. D. Souza et. all. 5<sup>th</sup> Latin American CFD Workshop, Applied to the oil and gas industry. – 2012. – P. 1–22.

11. Leontyev N.E. Bas of the theory filtrations. – М.:MGU, 2009. – 88 p.

Поступила в редакцию 21.07 2015 г.