

УДК 622.276

**МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОСИСТЕМЫ
ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ**

MODELS HYDRAULIC COMPONENTS PRODUCTIVE FORMATIONS

Хусаинов А.Т., Стрекалов А.В.

**ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый
университет», г. Тюмень, Российская Федерация**

A.T. Khusainov, A.V. Strekalov

**FSBEI NPE “Tyumen State Oil and Gas University”,
Tyumen, the Russian Federation**

e-mail: iq-tyumen@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрен характер влияния структуры поровых каналов на параметр проводимости модели образца керна. Вычислительными экспериментами установлена зависимость перепада давления на гранях образца от установившегося расхода, таким образом, для каждой структуры получена кривая гидравлической характеристики. Зависимость видимо не прослеживается, вследствие формирования той или иной структуры поровых каналов. Действительно, при одинаковом количестве, длине и диаметре поровых каналов (трубок тока) во множестве образцов породы, может наблюдаться различные соотношения проницаемости и пористости вследствие уникальности структур поровых каналов в каждом образце. В связи с этим, в моделях коллекторов невозможно построение модели взаимосвязи между микроструктурой и свойств поровых каналов с макропараметрами (коэффициент проницаемости и открытой пористости).

Конечно, чисто теоретически это подтверждает отсутствие зависимости проницаемости от пористости, однако, что наиболее интересно показывает

зависимость макропараметра проницаемости от структурных особенностей порового пространства, которое так или иначе может быть оценено для различных пород коллекторов. Тем не менее, уникальность структуры порового пространства для образцов керна, сложенных одними и теми же породами, предопределяет отсутствие явной зависимости проницаемости от пористости. Если бы была возможность исследования структуры поровых каналов, то моделирование элементов пластов, стало бы существенно точнее. Если определить граничными условиями равномерность распределения давления на гранях элементов пласта, то можно выстроить глобальную структуру гидравлической системы, составленную из подсистем, которые тоже будут структурно описаны, аналогично глобальной структуре. Таким образом, назревает иерархия в структуре, отражающая взаимосвязь между элементами моделируемого пласта различного уровня и пространственной детализации.

Abstract. The article describes the nature of the influence of pore structure on the channel conductivity parameter model of the core sample. Computational experiments the dependence of the pressure drop on the faces of the sample from the steady flow thus obtained for each structure curve hydraulic characteristics. Dependence apparently is not clear, due to the formation of a particular structure of the pore channels. Indeed the same number, length and diameter of the pore channels (flow tubes) in a plurality of rock samples can be observed different ratios permeability and porosity, pore structures due to the uniqueness of the channels in each sample. In this connection, it is impossible to build a reservoir model models the relationship between microstructure and properties of the pore channels macroparameters (ratio of open porosity and permeability).

Of course, it is theoretically confirmed the absence of the permeability depends on porosity, but most interestingly shows macroparameter permeability dependence on the structural characteristics of the pore space, which anyway can be assessed for different rock reservoirs. However, the uniqueness of the

structure of the pore space for core samples composed by the same species, determines the absence of an explicit dependence of permeability on porosity. If it were possible to study the structure of the pore channels, the simulation elements formations would be significantly more accurate. If we define the boundary conditions of uniform distribution of pressure on the faces of the elements of the formation, it is possible to build a global structure of the hydraulic system composed of subsystems, which will also be described structurally similar to the global structure. Thus, the hierarchy in the structure matures, reflecting the relationship between elements of the simulated formation of different levels and spatial detail.

Ключевые слова: поровые каналы, проницаемость, модель коллекторов, гидравлическая система, кривая гидравлической характеристики.

Key words: pore channels, filtration, model collectors, hydraulic system, hydraulic characteristics curve.

Элемент, входящий во все гидросистемы – «каналы связи» (КС) может быть представлен, как техническим устройствами (трубопроводами, открытыми каналами и т.п.), так и природными образованиями. В частности продуктивные или насыщенные флюидами пласты, представляющие НТС с анизотропной вмещающей средой, для детализации внутренних процессов, могут быть представлены системой КС. В данном случае наиболее элементарными (мелкими) КС пластов являются поровые каналы. Модели поровых каналов могут быть описаны в точном соответствии с их природными свойствами, аналогично сетям криволинейных трубопроводов переменного сечения (рисунок 1).

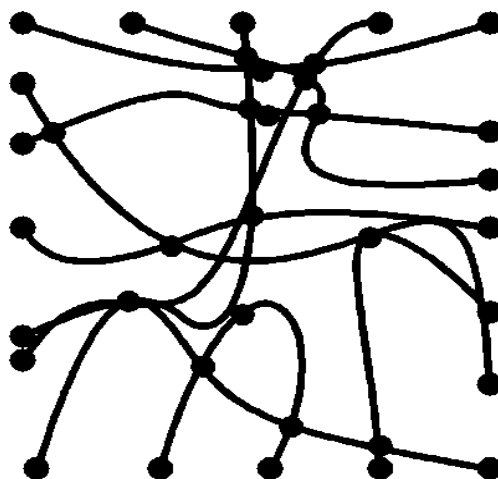


Рисунок 1. Структура элемента порового пласта в сечении

Так, модели поровых каналов можно описать теми же замыкающими отношениями – гидравлическими характеристиками $\Delta p = f(q)$, а структуру коллектора матрицей инцидентий.

Ранее предпринимались попытки описания коллектора в виде модели параллельных трубок тока (рисунок 2). Однако такая модель соотношений поровых каналов не отражает их структурных связей, вследствие чего расчет макропараметра – проницаемости ведется на основании количества трубок, их шероховатостей и диаметров [1]. Причиной непригодности такой модели является однозначная взаимосвязь модельной открытой пористости, определяемой количеством и диаметром трубок, с расчетной проницаемостью.

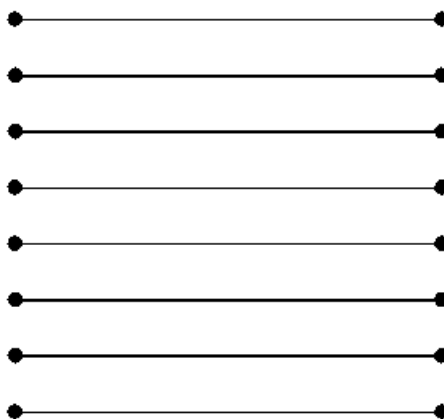


Рисунок 2. Трубчатая модель элемента порового пласта в сечении

Многочисленными исследованиями установлено, что чаще всего такой зависимости в природе не наблюдается, за исключением некоторых исследований кернов (рисунок 3), результаты которых также не отражают четкой зависимости.

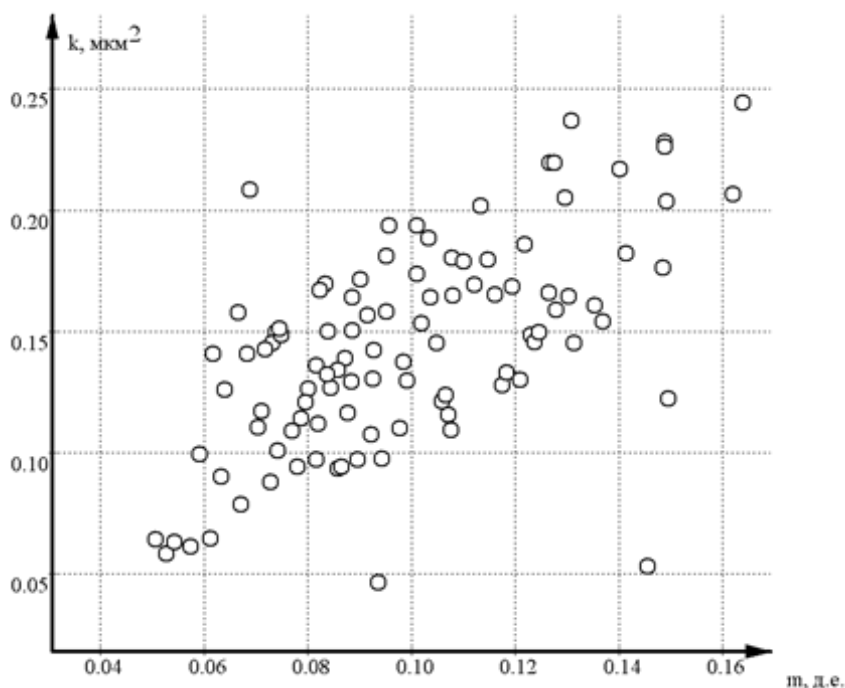


Рисунок 3. Экспериментальные точки зависимости коэффициента проницаемости от открытой пористости Северо-Покурского месторождения пласт АВ₁₋₂

Такая зависимость видимо не прослеживается, вследствие формирования той или иной структуры поровых каналов. Действительно при одинаковом количестве, длине и диаметре поровых каналов (трубок тока) во множестве образцов породы, может наблюдаться различные соотношения проницаемости и пористости, вследствие уникальности структур поровых каналов в каждом образце. В связи с этим, в моделях коллекторов невозможно построение модели взаимосвязи между микроструктурой и свойств поровых каналов с макропараметрами (коэффициент проницаемости и открытой пористости) [2].

Рассмотрим характер влияния структуры поровых каналов на параметр проводимости модели образца керна, моделируемого аналогично модели

ТГС сетью трубопроводов малого сечения определенной структуры, причем, варьируя структурой сети, будем сохранять суммарный объем, длину и диаметры труб, посредством декомпозиции звеньев. Вычислительными экспериментами установим зависимость перепада давления на гранях образца от установившегося расхода. Таким образом, для каждой структуры получим кривую гидравлической характеристики образца $\Delta p = f(q)$, связывающую перепад давления на двух гранях от суммарного расхода ТС сквозь образец от одной грани до другой. По углу наклона кривой $\Delta p = f(q)$ к оси расхода будем определять гидросопротивление – R , а по обратной ему величине $\varepsilon = \frac{1}{R}$ проводимость. Условно зададим для всех трубок поровых каналов – 5 (рисунок 4) диаметр $d_5 = 0,001$ м, длину $L = 0,01$ м и абсолютную шероховатость $\Delta_a = 0,0004$ м [3].

Суммарный объем КС будет постоянным для всех моделей на рисунке 5 и рисунке 6. Точки физического пересечения каналов показаны точками.

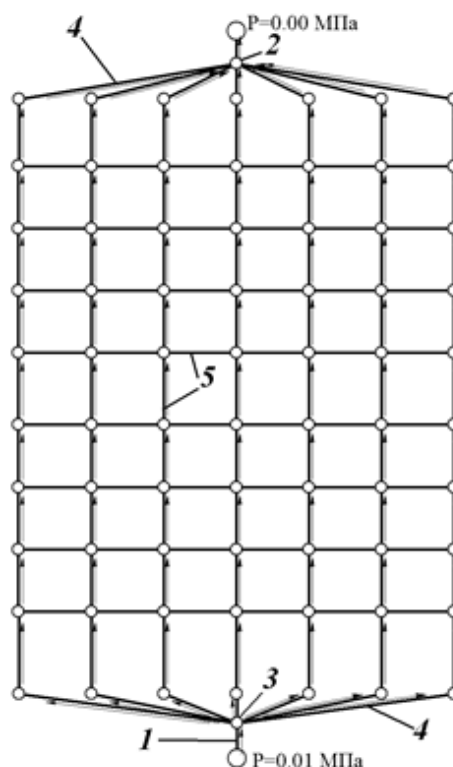


Рисунок 4. Структура 1 образца модели керна в сечении и соответствующее потокораспределение

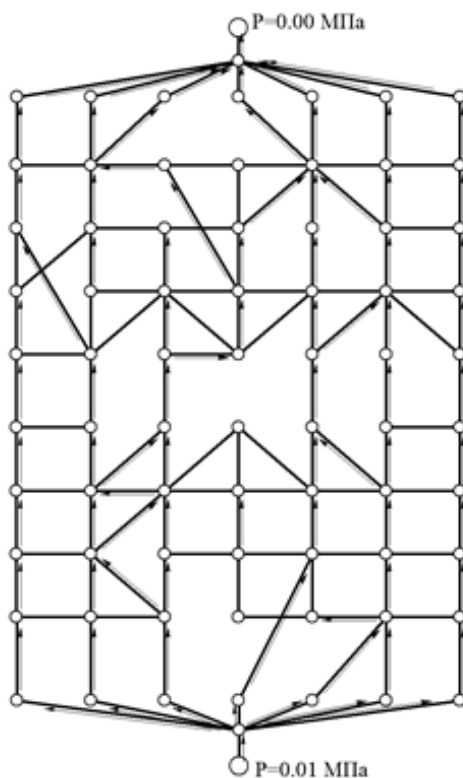


Рисунок 5. Структура 2 образца модели керна в сечении и соответствующее потокораспределение

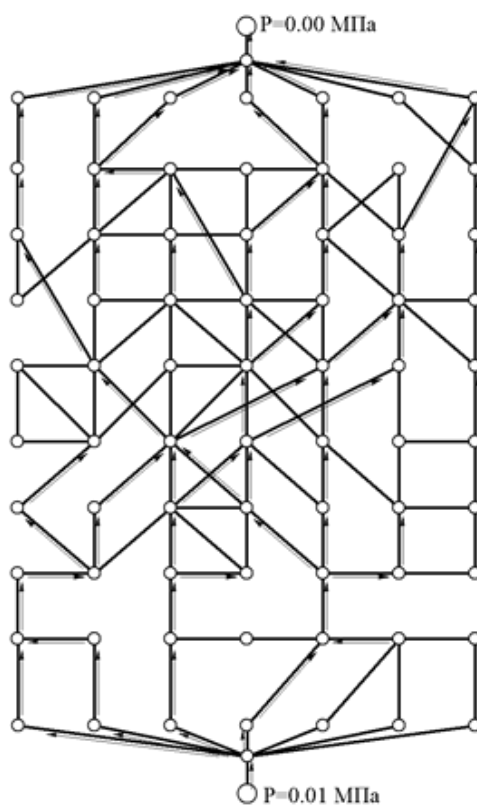


Рисунок 6. Структура 3 образца модели керна в сечении и соответствующее потокораспределение

Для удобства проведения вычислительных экспериментов сведем потоки на выходе и входе в образец поровыми каналами в один коллектор с давлением с одной стороны в 0,01 МПа, а с другой стороны в 0,00 МПа. Изменяя сопротивление на первом участке – 1 (рисунок 4) при входе потока, получим несколько установившихся расходов ТС и соответствующих им перепадов давления между узлом – 3 и узлом – 2. В качестве текучей среды возьмем воду. Во избежание воздействия трубок – 4 на потокораспределение модели сети, их сопротивление зададим малым по сравнению с трубками поровых каналов: $d_4 = 0,01$ м.

После проведения вычислительных экспериментов имеем три функции $\Delta p = f(q)$ связывающие перепад давления на гранях образца и расход, установившийся между ними. На рисунке 7 показаны графики данных функции [4]. Из графиков видно, что угол наклона кривых существенно изменяется для различных структур модели ядра при постоянном суммарном объеме поровых каналов. Это связано с возникновением в структурах на рисунке 5 и рисунке 6 так называемых перегруженных участков и узлов смешивания потоков.

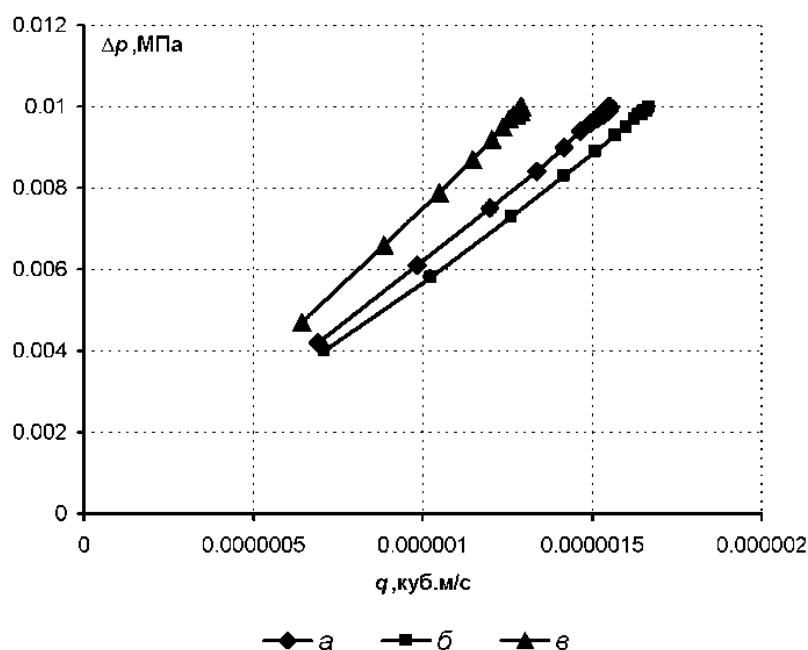


Рисунок 7. Зависимости перепада давления при установившемся расходе через модель ядра: а – структура 1; б – структура 2; в – структура 3

Конечно, чисто теоретически это подтверждает отсутствие зависимости проницаемости от пористости, однако, что наиболее интересно показывает зависимость макропараметра проницаемости от структурных особенностей порового пространства, которое так или иначе может быть оценено для различных пород коллекторов. Тем не менее, уникальность структуры порового пространства для образцов керна, сложенных одними и теми же породами, предопределяет отсутствие явной зависимости проницаемости от пористости. Если бы была возможность исследования структуры поровых каналов, то моделирование элементов пластов, стало бы существенно точнее [5].

Ввиду отсутствия возможности исследования такого детального строения пластов, приходится довольствоваться макро-описанием их отдельных частей: учитывая детальность строения пласта, приходится обобщать свойства поровых каналов в макроэлементах – ячейках.

Для такого обобщения Дарси выявлена закономерность:

$$\Delta p = f(q) = \mu \frac{L}{kF} q, \quad (1)$$

отражающая взаимосвязь между структурой поровых каналов и их свойствами в виде макропараметра проницаемости – k , а также на его основе, отражающая зависимость перепада давления Δp необходимого для установившегося течения жидкости с динамической вязкостью μ и расходом q через образец порового коллектора с заданной площадью сечения – F и длиной – L . Данная закономерность зачастую не подтверждается фактом для особых условий фильтрации, например, при больших расходах и реологических свойствах ТС, а распространение данной закономерности на дифференциальную форму записи:

$$\frac{dp}{dl} = \mu \frac{\omega}{k}, \quad (2)$$

где dl – бесконечно малая длина элемента пласта; dp – бесконечно малый перепад давления при средней скорости потока – ω , является

безосновательным, так как эксперимент Дарси проводился на конечном образце. Использование закона Дарси для бесконечно малых элементов коллектора не отражает микропараметров его поровых каналов и структурных особенностей их взаимодействия, вследствие чего они не могут быть описаны макропараметром проницаемости k .

Потери гидравлической энергии при фильтрации ТС через породу связаны с несколькими факторами.

1. Потери давления вследствие многократной деформации потоков в поровых каналах.

2. Потери давления на смешивание и разделения потоков с различными микро скоростями.

3. Потери давления при трении потоков о стенки поровых каналов.

4. Потери давления при внутреннем трении молекул ТС и кластеров жидкостей.

5. Потери давления вследствие капиллярного взаимодействия молекул ТС и стенок поровых каналов.

6. Привнесение в поток ТС механических частиц, формирующих поровые каналы (породы).

Все перечисленные факторы, согласно Дарси интегрируются в коэффициенте проницаемости, который является мерой обратной степени влияния элемента породы на гидравлическую энергию фильтруемого через нее потока ТС: $k = \frac{1}{\lambda}$, где λ – удельное гидравлическое сопротивление породы.

Вследствие перечисленных факторов при фильтрации ТС сквозь пористую среду гидравлическая энергия потока частично переходит в тепловую энергию породы и самого потока [6].

Таким образом, законом Дарси можно описать воздействие на ТС только конечных макроэлементов пласта – ячеек. Размеры ячеек определяют с одной стороны степень детализации процессов, а с другой

структуру их внутренней организации и порядок вхождения в общую модель.

С некоторым приближением, элемент пласта можно представить структурной пространственной решеткой, составленной из более мелких элементов (рисунок 8) [7].

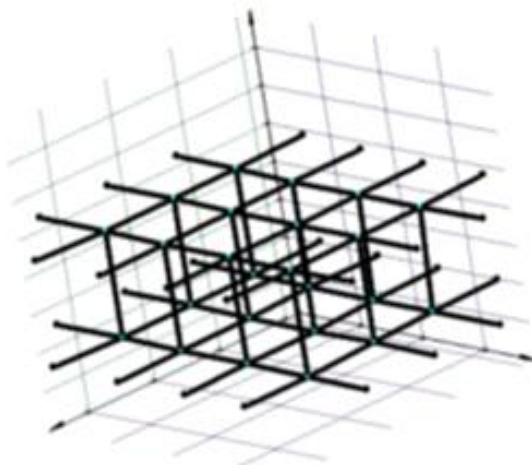


Рисунок 8. Структура элемента порового пласта

Такая структура может подойти для моделей идеальных грунтов с равномерной компоновкой, таких как, например, грунт Сликтера. Реальные пористые и порово-трещиноватые породы имеют сложную неравномерную структуру и могут быть отражены моделями микроэлементов (размерами ячеек до 10 мкм^3) с неравномерной структурой, например, как это показано на рисунке 9 [8].

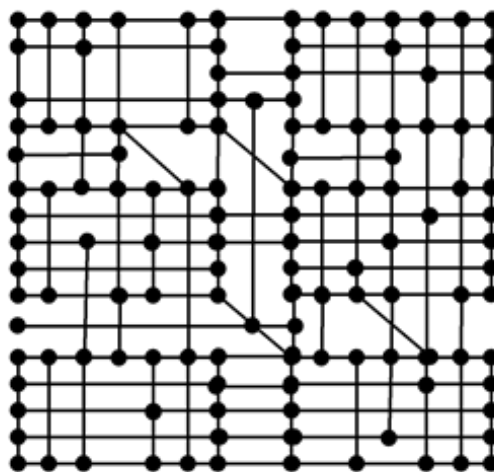


Рисунок 9. Структура элемента порового пласта в сечении

Если определить граничными условиями равномерность распределения давления на гранях элементов пласта, то можно выстроить глобальную структуру ГС, составленную из подсистем, которые тоже будут структурно описаны, аналогично глобальной структуре. Таким образом, назревает иерархия в структуре, отражающая взаимосвязь между элементами моделируемого пласта различного уровня и пространственной детализации. На рисунке 10 отражен пример однородной иерархичной структуры модели пласта, из которой видно как объединяются микроэлементы (например, размером до 10 мкм^3) в макроэлементы (например, размером $100\text{--}1000000 \text{ мкм}^3$) и так далее [9].

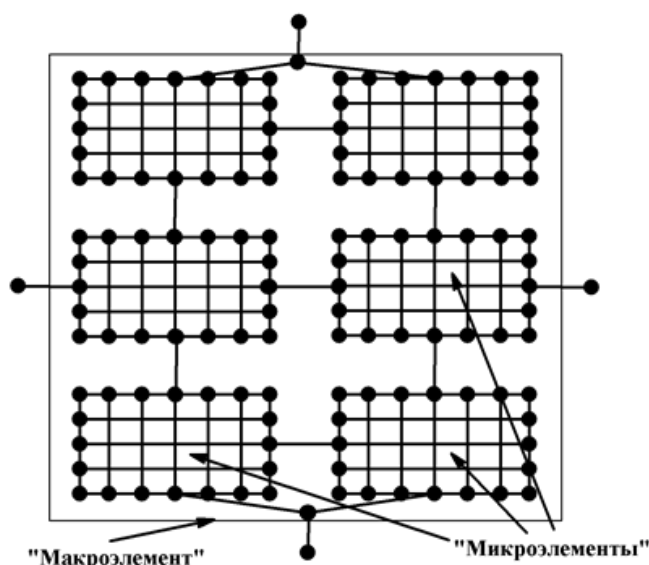


Рисунок 10. Структура взаимосвязей элементов порового пласта в сечении

Выводы

Необходимость в таком способе описания элементов обусловлена невозможностью детального описания всего объема пласта, поэтому приходится прибегать к приемам приближенной передачи взаимосвязи между элементами. При использовании такого приема нет необходимости в решении задачи потокораспределения одной крупной системой уравнений. Для нахождения потокораспределения достаточно распределить потоки в структуре макроэлементов, а при необходимости

детализации распределения потоков в более мелких элементах, достаточно, относительно найденного глобального потокораспределения решить задачу потокораспределения в нужном микроэлементе, при этом описав граничные условия, связывающие модель микроэлемента и модель макроэлементов.

Список используемых источников

1 Стрекалов А.В. Математические модели гидравлических систем для управления системами поддержания пластового давления. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. 586 с.

2 Минаев Ю.Н., Филимонова О.Ю. Методы и алгоритмы идентификации и прогнозирования в условиях неопределенности. М.: «Горячая линия-Телеком», 2003. 208 с.

3 Фантони И., Лозано Р. Нелинейное управление механическими системами с дефицитом управляющих воздействий. М.: «К-Динамика», 2013. 312 с.

4 Бержерон Л. От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети. Общий графический метод расчета; Пер. с франц. М.: «Машгиз», 1962. С. 87-95.

5 Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. М.: «Недра», 1981. С.248.

6 С. Мекид Повышение структурного интеллекта кластеров датчиков в промышленном производстве// Датчики и системы. 2007. №4. С. 50-55.

7 Черри Е., Миллар У. Некоторые новые понятия и теоремы в области нелинейных систем. Автоматическое регулирование: сб. материалов конференции (Кренфилд. 1951г.); Под ред. М.З. Литвина-Седого. М.: изд-во иностр. лит., 1954. 261 с.

8 Кёниг Г., Блекуэлл В. Теория электромеханических систем. Массачусетс. JL: 1965. 424 с.

9 Хасилев В.Я. Элементы теории гидравлических цепей// Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1964. № 1. 69 с.

References

1 Strekalov A.V. Matematicheskie modeli gidravlicheskih sistem dlya upravleniya sistemami podderzhaniya plastovogo davleniya. Tyumen': OAO «Tyumenskiy dom pechati», 2007. 586 с. [in Russian].

2 Minaev Yu.N., Filimonova O.Yu. Metody i algoritmy identifikatsii i prognozirovaniya v usloviyakh neopredelennosti. M.: «Goryachaya liniya-Telekom», 2003. 208 s. [in Russian].

3 Fantoni I., Lozano R. Nelineynoe upravlenie mekhanicheskimi sistemami s defitsitom upravlyayushchikh vozdeystviy. M.:«K-Dinamika», 2013. 312 с. [in Russian].

4 Berzheron L. Ot gidravlicheskogo udara v trubakh do razryada v elektricheskoy seti. Obshchiy graficheskiy metod rascheta; Per. s frants. M.: «Mashgiz», 1962. С. 87-95. [in Russian].

5 Foks D.A. Gidravlicheskiy analiz neustanovivshegosya techeniya v truboprovodakh. M.: «Nedra», 1981. S.248. [in Russian].

6 S. Mekid Povyshenie strukturnogo intellekta klasterov datchikov v promyshlennom proizvodstve// Datchiki i sistemy. 2007. №4. С. 50-55. [in Russian].

7 Cherri E., Millar U. Nekotorye novye ponyatiya i teoremy v oblasti nelineynykh sistem. Avtomaticheskoe regulirovanie: sb. materialov konferentsii (Krenfeld. 1951g.); Pod red. M.Z. Litvina-Sedogo. M.: izd-vo inostr. lit., 1954. 261 s. [in Russian].

8 Kyenig G., Blekuell V. Teoriya elektromekhanicheskikh sistem. Massachusets. JL: 1965. 424 s. [in Russian].

9 Khasilev V.Ya. Elementy teorii gidravlicheskih tsepey//Izv. AN SSSR. Energetika i transport, 1964. № 1. 69 s. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Хусаинов А.Т., аспирант кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», ФГБОУ ВПО ТГНГУ, г. Тюмень, Российская Федерация

A.T. Khusainov, Post-graduate Student of the Chair “Development and Exploitation of Oil and Gas Fields”, FSBEI HPE TSOGU, Tyumen, the Russian Federation

Стрекалов А.В., д-р техн. наук, проф. кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», ФГБОУ ВПО ТГНГУ, г. Тюмень, Российская Федерация

A.V. Strekalov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair “Development and Exploitation of Oil and Gas Fields”, FSBEI HPE TSOGU, Tyumen, the Russian Federation

e-mail: iq-tyumen@mail.ru