УДК 502.36:532.546.3

DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.6

Д. В. ЗЕЛЕНЦОВ
К. Л. ЧЕРТЕС

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ АЭРАЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

THEORETICAL FEATURES AND PRACTICAL APPLICATION OF AERATION OF MULTICOMPONENT DYNAMIC GEOLOGICAL ENVIRONMENTS

Представлена математическая модель фильтрации газа через пористую среду, описывающая движение воздуха при высоконапорной принудительной аэрации, которая нужна для поддержания высокой скорости метаболизма нефтеразрушающих микроорганизмов. Аэрация необходима для создания аэробной среды при применении перспективного метода санации геосреды путем нагнетания в толщу линз нефтепродуктов специального состава, содержащего нефтеразрушающие микробиальные добавки. Получено уравнение фильтрации в полярных координатах с учетом экспериментальных данных, описывающее динамику движения газа в пористой среде в условиях принудительной высоконапорной аэрации. Выявлены функциональные зависимости, при получении значений которых можно решить полученное уравнение фильтрации.

Ключевые слова: *фильтрация, геосреда, высоконапорная аэрация, пористость, проницаемость*

A mathematical model of gas filtration through a porous medium is described, which describes the movement of air during high-pressure forced aeration, which is needed to maintain a high metabolic rate of oil-destroying microorganisms. Aeration is necessary to create an aerobic environment when applying a promising method of sanitation of the geological environment by injecting a special composition containing oil-destroying microbial additives into the lenses of oil products. The equation of filtration in polar coordinates is obtained, taking into account the experimental data, which describes the dynamics of gas movement in a porous medium under conditions of forced high-pressure aeration. The functional dependences are revealed, when obtaining the values of which one can solve the obtained filtration equation.

Keywords: *filtration, geological environment, high-pressure aeration, porosity, permeability*

Значительное число предприятий нефтеперерабатывающего комплекса функционирует продолжительное время. Одним из отрицательных результатов их производственной деятельности является образование в геологических массивах, на которых они построены, техногенных образований в виде линз нефтепродуктов. Для ликвидации подобных линз бурятся скважины, через которые откачиваются накопленные в породе нефтепродукты. Однако часть продуктов остается в породе, находясь при этом в динамическом состоянии, в связи с тем, что гидрогеологические условия нестационарные. Соответственно возникает необходимость их санации с целью снижения концентраций углеводородов в грунтах до нормативных значений, не наносящих вред окружающей среде. Перспективным методом для санации геосреды является нагнетание в толщу линз специального состава, содержащего нефтеразрушающие микробиальные добавки. Так как микроорганизмы, входящие в такой состав, являются аэробными, возникает необходимость в принудительной аэрации для поддержания высокой скорости метаболизма микроорганизмов.

В результате аэрации происходит движение воздуха в толще породы, фильтрация санирующего состава, что ведет к непрерывному изменению структуры геосреды вследствие биодеструкции углеводородов, изменения градиента давления, накоплению или удалению в порах дисперсных частиц [1–5], т. е. имеется нестационарный процесс фильтрации в динамической среде. Основными характеристиками фильтрующей среды являются пористость, коэффициент проницаемости, а характеристиками фильтрата (в данном случае сжимаемой жидкости) – плотность газа, температура, средняя скорость движения среды в порах.

Наиболее полно теория движения газа в пористой среде рассмотрена в трудах [1–4]. Простейший случай – это фильтрация газов при ламинарном режиме в неизменной пористой среде, которая является частным случаем задачи фильтрации при любом режиме движения.

Общее основное уравнение ламинарной фильтрации имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k\rho}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k\rho}{\mu}\frac{\partial p}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k\rho}{\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\right)=m\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k\rho^2}{\mu}X\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k\rho^2}{\mu}Y\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k\rho^2}{\mu}Z\right), \quad (1)$$

где k – коэффициент проницаемости, м[2]; ρ – плотность жидкости, кг/м[3]; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с; m – пористость материала; X, Y, Z – массовые силы.

В случае сжимаемой жидкости (газа) плотность $\rho = f(p,T)$. Вводя новую функцию давления (расход)

$$q = \int \rho dp \,, \tag{2}$$

получим следующие уравнения:

$$\left.\begin{aligned} \rho\frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial q}{\partial x} \\ \rho\frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial q}{\partial y} \\ \rho\frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{\partial q}{\partial z} \end{aligned}\right\} . \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{dp}{dq}\frac{\partial q}{\partial t} . \tag{4}$$

Подставляя уравнения (3) и (2) в (1), а также считая вязкость газа величиной постоянной, а массовые силы равными X=Y=Z=0, получим уравнение движения газа в неизменной пористой среде

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial q}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial q}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial q}{\partial z}\right) = m\mu\frac{\partial \rho}{\partial q}\frac{\partial q}{\partial t} . \tag{5}$$

В результате термогенеза мы имеем не неизменную пористую среду, а деформируемую пористую среду, т. е. среду с постоянно меняющимися во времени параметрами, определяющими из которых являются пористость m и температура t. Общее уравнение неразрывности для движения в неизменной пористой среде

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial(m\rho)}{\partial t} = 0 . \tag{6}$$

В случае деформируемой пористой среды уравнение (6) примет вид

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \left(m\frac{d\rho}{dp} + \frac{\rho}{\alpha_1}\right)\frac{\partial p}{\partial t} = 0 , \tag{7}$$

где α_1 – модуль, характеризующий пористую среду.

Проведенные опыты показали, что в случае высоконапорной аэрации движение воздуха в геосреде может происходить не в ламинарном, а в турбулентном режиме движения [6]. В связи с этим рассмотрим основное уравнение теории фильтрации

$$Re = f(\Omega), \tag{8}$$

где Ω – число фильтрации; Re – число Рейнольдса.

$$\Omega = \frac{\rho k^{3/2} P}{\mu^2 h} , \tag{9}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{v\rho\sqrt{k}}{\mu} , \tag{10}$$

где v – скорость фильтрации, м/с; h – вектор (направление скорости) фильтрации, м.

Используя (9) и (10), по аналогии с (3) получим систему уравнений для скоростей турбулентной фильтрации по осям x, y, z:

$$\left.\begin{aligned} \rho\frac{\sqrt{k}u}{\mu} &= \theta\frac{\partial q}{\partial x} \\ \rho\frac{\sqrt{k}v}{\mu} &= \theta\frac{\partial q}{\partial y} \\ \rho\frac{\sqrt{k}w}{\mu} &= \theta\frac{\partial q}{\partial z} \end{aligned}\right\} , \tag{11}$$

где θ – функциональная зависимость для числа фильтрации.

$$\theta(p) = \frac{f\left(\frac{k^{3/2}}{\mu^2}\sqrt{\Delta_1 q}\right)}{\sqrt{\Delta_1 q}} , \tag{12}$$

где $\Delta_1 q$ – изменение расхода.

$$\Delta_1 q = \left(\frac{\partial q}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial z}\right)^2 . \tag{13}$$

Подставляя уравнения (7) и (11) в (1), считая вязкость газа величиной постоянной, а массовые силы равными X=Y=Z=0, получаем основное уравнение турбулентной фильтрации сжимаемой жидкости (газа) в деформируемой пористой среде

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu}{\sqrt{k}}\theta\frac{\partial q}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu}{\sqrt{k}}\theta\frac{\partial q}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu}{\sqrt{k}}\theta\frac{\partial q}{\partial z}\right) + \left(m\frac{d\rho}{dp} + \frac{\rho}{\alpha_1}\right)\frac{\partial p}{\partial t} = 0 , \tag{14}$$

где $\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial q}\cdot\frac{\partial q}{\partial t}$, процесс политропный $\rho = \rho(q(t))$.

Как правило, расходные и геометрические характеристики процесса фильтрации, а также свойства фильтрующейся жидкости (газа) являются известными либо легко определяемыми. Основная трудность состоит в вычислении параметров среды, через которую происходит фильтрация, таких как пористость m, проницаемость k, модуль α_1.Учитывая большую сложность в определении значения модуля α_1, а также низкую вязкость газа, возникает потребность исключить модуль α_1; принимая $\left(\frac{\mu}{\sqrt{k}}\right) = const$, преобразуем и частично упрощаем уравнение (14), в результате чего получим

$$\frac{\partial\theta}{\partial x}\cdot\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial\theta}{\partial y}\cdot\frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial\theta}{\partial z}\cdot\frac{\partial q}{\partial z} + \theta\cdot\nabla^2 q + \frac{m\sqrt{k}}{\mu}\frac{\partial\rho}{\partial t} = 0 . \tag{15}$$

Вводя градиенты

$$\vec{\nabla}\theta = \left(\frac{\partial\theta}{\partial x};\frac{\partial\theta}{\partial y};\frac{\partial\theta}{\partial z}\right) \text{ и } \vec{\nabla}q = \left(\frac{\partial q}{\partial x};\frac{\partial q}{\partial y};\frac{\partial q}{\partial z}\right),$$

из (15) получим уравнение

$$\vec{\nabla}\theta\cdot\vec{\nabla}q + \theta\cdot\nabla^2 q + \frac{m\sqrt{k}}{\mu}\frac{\partial\rho}{\partial t} = 0 . \tag{16}$$

Подача воздуха для аэрации в толщу геосреды (либо удаление свалочного газа) осуществляется через вертикальные скважины или горизонтальные коллекторы. Потери давления по длине рабочей зоны (через которую осуществляется подача воздуха (газа) сравнительно малы по отношению к потерям в геосреде, и ими можно пренебречь. Таким образом, начальные давления и расход по одной из координат будут неизменными, что позволяет перейти к плоской задаче $q=q(x,y)$, а так как газ будет распространяться по окружности, то можно перейти к полярным координатам $x=r\cdot\cos\phi$; $y=r\cdot\sin\phi$; $r^2=x^2+y^2$; $\phi=\mathrm{arctg}(x/y)$. Тогда слагаемые уравнения (16) примут вид

$$\vec{\nabla}\theta\cdot\vec{\nabla}q=\frac{\partial\theta}{\partial r}\frac{\partial q}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial\theta}{\partial\phi}\frac{\partial q}{\partial\phi}, \quad (17)$$

$$\nabla^2 q=\frac{\partial^2 q}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial q}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 q}{\partial\phi^2}. \quad (18)$$

Подставляя (17) и (18) в (16), получим уравнение фильтрации в полярных координатах

$$\frac{\partial\theta}{\partial r}\frac{\partial q}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial\theta}{\partial\phi}\frac{\partial q}{\partial\phi}+\frac{\partial^2 q}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial q}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 q}{\partial\phi^2}+\frac{m\sqrt{k}}{\mu}\frac{\partial\rho}{\partial t}=0. \quad (19)$$

Проведенные эксперименты [5, 6] показали, что зависимость (13) можно описать эмпирическим уравнением

$$\Delta_1 q = A\cdot\ln r + B. \quad (20)$$

Принимая в уравнении (12) $D=\frac{k^{3/2}}{\mu^2}$, и с учетом (20) получим

$$\frac{\partial\theta}{\partial r}=\frac{D\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(\sqrt{\Delta_1 q}\right)-f\left(D\sqrt{\Delta_1 q}\right)\frac{\partial}{\partial r}\left(\sqrt{\Delta_1 q}\right)}{\Delta_1 q}=$$
$$=\frac{A\left(D-f\left(D\sqrt{\Delta_1 q}\right)\right)}{2r\left(\Delta_1 q\right)^{3/2}}. \quad (21)$$

Подставляя (21) в (19) и принимая $\frac{\partial\theta}{\partial\phi}=0$, получим

$$\left[\frac{A\left(D-f\left(D\sqrt{\Delta_1 q}\right)\right)}{2r\left(\Delta_1 q\right)^{3/2}}+\frac{f\left(D\sqrt{\Delta_1 q}\right)}{r\sqrt{\Delta_1 q}}\right]\frac{\partial q}{\partial r}+$$
$$+\frac{\partial^2 q}{\partial r^2}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 q}{\partial\phi^2}+\frac{m\sqrt{k}}{\mu}\frac{\partial\rho}{\partial t}=0. \quad (22)$$

Выводы. 1. Получено уравнение фильтрации (22) в полярных координатах с учетом экспериментальных данных. Полученное уравнение имеет решение, хотя это и представляет определенную трудность.

2. Для решения уравнения фильтрации (22) необходимо знать значение функции $f\left(D\sqrt{\Delta_1 q}\right)$ и явную зависимость для плотности $\frac{\partial\rho}{\partial t}=\frac{\partial\rho}{\partial q}\cdot\frac{\partial q}{\partial t}$, что является дальнейшим этапом исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Альтшуль А.Д., Киселев П.Н.* Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1975. 248 с.

2. *Лейбензон Л.С.* Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М: Гостехиздат, 1947. 245 с.

3. *Маскет М.* Течение однородных жидкостей в пористой среде / пер. с англ. М: Dynamics, 2004. 628 с.

4. *Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б.* Подземная гидравлика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 736 с.

5. Обработка осадков нефтесодержащих сточных вод / О.В. Тупицына, Д.В. Зеленцов, Б.М. Гришин, С.Ю. Андреев, К.Л. Чертес. Самара: СамГТУ, 2012. 112 с.

6. *Zelentsov D.V., Chertes K.L., Tupitsyna O.V.* Theoretical basis and experimental study of the aeration characteristics of the composting mixtures during the design and construction of the aeration system of the oily waste biodegradation complex // Procedia Engineering. 2016. Т. 153. С. 903–908.

Об авторах:

ЗЕЛЕНЦОВ Данила Владимирович
кандидат технических наук, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194

ZELENTSOV Danila V.
PhD in Engineering Science, Head of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair
Samara State Technical University
Academy of Architecture and civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: dvzelentsov@mail.ru

ЧЕРТЕС Константин Львович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры химической технологии и промышленной экологии
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

CHERTES Konstantin L.
Doctor of Engineering Science, Professor
of the Chemical Technology and Industrial Ecology Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: chertes2007@yandex.ru

Для цитирования: *Зеленцов Д.В., Чертес К.Л.* Теоретические особенности и практическое приложение аэрации многокомпонентных динамических геологических сред // Градостроительство и архитектура. 2018. Т.8, №3. С. 26-28. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.6.
For citation: *Zelentsov D.V., Chertes K.L.* Theoretical Features and Practical Application of Aeration of Multicomponent Dynamic Geological Environments // Urban Construction and Architecture. 2018. V. 8, 3. Pp. 26-28. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.6.