

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВАНИЯ СУСПЕНЗИИ НЕНЬЮТОНОВСКОГО ПОВЕДЕНИЯ В НАМЫВНЫХ ФИЛЬТРАХ

Р.И. Ибяттов

Реферат. Исследования проводились с целью математического моделирования процесса фильтрации тонкодисперсных неньютоновских суспензий в намывных фильтрах периодического действия. Для описания реологического состояния среды использована модель степенной жидкости. В начале цикла фильтрации намывается слой вспомогательного материала, который используется в качестве фильтрующей перегородки. Тонкодисперсная суспензия в процессе фильтрации образует второй слой, по мере нарастания которого возрастает сопротивление, оказываемое потоку жидкой фазы. Фильтровальный цикл завершается после достижения критических значений давления, либо производительности в зависимости от режима работы аппарата. Уравнения фильтрации записаны в цилиндрической системе координат отдельно для каждого слоя. На границе раздела слоев учтены скачки давления и скорости, возникающие из-за отличия порозности. Для расчета толщины образуемого слоя осадка построена дифференциальная уравнение. Показано, что построенная математическая модель может быть использована для расчета фильтрации суспензий с линейной моделью реологического состояния, если выполнить предельный переход $n \rightarrow 1$. Также показано, что после предельного перехода $R \rightarrow \infty$, результаты работы позволяют моделировать процесс фильтрации неньютоновских сред в фильтрах пластинчатого типа. Численные расчеты проведены для режима фильтрации с постоянной скоростью. Исследованы закономерности влияния эквивалентной вязкости, степени нелинейности среды, а также исходной концентрации дисперсной фазы на процесс фильтрации. Показано, что при увеличении этих параметров предельное значение давления в аппарате достигается раньше, что приведет к сокращению времени фильтровального цикла.

Ключевые слова: намывной фильтр, степенная модель жидкость, фильтрация суспензии, слой осадка.

Введение. Фильтрация жидкостей с тонкодисперсными примесями встречается во многих отраслях народного хозяйства [1, 2, 3]. В качестве примера можно назвать проблему восстановления технических масел, подготовку технической воды промышленности, очистку масел растительного происхождения и сгущения фруктовых соков в пищевой промышленности. Одним из методов фильтрации тонкодисперсных суспензий является использование вспомогательных фильтрующих материалов. Вспомогательный фильтрующий материал может быть добавлен в исходную суспензию с целью повышения проницаемости слоя образуемого осадка. Тогда рассматривается процесс фильтрации трехфазной гетерогенной среды. Вспомогательный фильтрующий материал может быть использован в качестве фильтрующей перегородки. В этом случае он намывается отдельно в виде нижнего слоя в начале цикла фильтрации. Тонкодисперсная суспензия фильтруется через нижний слой, образуя слой тонкодисперсных частиц. При этом возникает задача расчета фильтрации среды через двойной слой осадка, когда толщины верхнего слоя является переменной величиной. В настоящее время изучение процесса фильтрации неньютоновских сред с тонкодисперсными частицами на многослойных проницаемых подложках остается актуальной задачей [4, 5, 6].

Цель исследований - математическое моделирование и численный расчет процесса фильтрации тонкодисперсных неньютоновских суспензий, подчиняющихся степенной модели

реологического состояния среды, в намывных фильтрах периодического действия.

Условия, материалы и методы. Многие аномально вязкие среды хорошо описываются моделью степенной жидкости. При этом обобщенное уравнение фильтрации имеет вид [7, 8, 9]

$$\sqrt[n]{V} |V|^{n-1} = -\frac{K_i}{\Psi} \nabla P \quad (1)$$

В данном уравнении параметр n указывает на степень нелинейности среды. При значении $n=1$ получаем классическое уравнение фильтрации Дарси. Через коэффициенты K_i – обозначены проницаемости слоев пористого осадка. Величина Ψ называется эквивалентной вязкостью. Она зависит не только от реологических параметров жидкости, но и от пористости и проницаемости соответствующих слоев осадка. Для вычисления эквивалентной вязкости известны разные формулы, которые справедливы при определенных диапазонах изменения скорости и конкретных моделей пористой среды [9].

Существуют разные конструкции намывных фильтров периодического действия – пластинчатые, трубчатые [10, 11, 12]. Возможны разные режимы их работы: фильтрация при постоянной разности давлений, фильтрация при постоянной скорости, а также фильтрация при переменных разности давлений и скорости. В этих аппаратах предварительно намывается нижний фильтрующий слой с достаточно высокой проницаемостью, через которого фильтруется тонкодисперсная суспензия. По мере увеличения толщины второго слоя возрастает сопротивление, оказываемое

потоку жидкой фазы. В режиме фильтрования при постоянной разности давлений уменьшается производительность, в режиме фильтрования при постоянной скорости увеличивается разность давлений. После достижения их предельных значений цикл работы аппарата прекращается. Далее выполняется промывка фильтрующего элемента, и далее цикл повторяется заново.

Результаты и обсуждение. Пусть на поверхности трубчатого фильтра образован слой вспомогательного материала толщины $\delta = const$. В процессе фильтрования тонкодисперсной суспензии происходит накопление второго слоя осадка $h(t)$. Уравнения фильтрации (1) для соответствующих слоев в цилиндрической системе координат имеют вид

$$V_\delta^n = -\frac{K_\delta}{\Psi_\delta} \frac{\partial P_\delta}{\partial r} \quad (2)$$

$$V_h^n = -\frac{K_h}{\Psi_h} \frac{\partial P_h}{\partial r} \quad (3)$$

Запишем уравнения сохранения массы

$$\frac{\partial(rV_\delta)}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(rV_h)}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

Для решения уравнений фильтрации и сохранения массы необходимо задавать граничные условия. В рабочей зоне фильтра создается давление P , которое определяется с учетом режима работы аппарата. В математической модели это давление задается на поверхности верхнего слоя осадка

$$r = R + \delta + h(t): \quad P_h = P \quad (6)$$

На границе раздела двух слоев задаются условия сшивания для давления и скорости. Поскольку пористости разных слоев осадка различаются, на границе раздела произойдет скачкообразное изменение давления и скорости фильтрации. Эти условия могут быть записаны в виде [13]

$$r = R + \delta: \quad P_h - \frac{\rho}{2} \frac{\varepsilon_\delta^2 - \varepsilon_h^2}{\varepsilon_h^2} V_\delta^2 = P_\delta, \quad \varepsilon_h V_h = \varepsilon_\delta V_\delta \quad (7)$$

где $\varepsilon_\delta, \varepsilon_h$ - пористости нижнего и верхнего слоев осадка.

На поверхности фильтрующего трубчатого элемента задается выходное давление

$$r = R: \quad P_\delta = P_0 \quad (8)$$

Решение системы уравнений (2), (3), (4) и (5) при заданных граничных условиях (6), (7), (8) не представляет труда. После интегрирования уравнения (4) имеем

$$V_\delta = \frac{C_1}{r} \quad (9)$$

После подстановки зависимости (9) можно

проинтегрировать уравнения фильтрации (2)

$$C_1^n \frac{r^{1-n}}{1-n} = -\frac{K_\delta}{\Psi_\delta} P_\delta + C_2$$

Постоянного интегрирования C_2 определим из условия (8). Тогда последнее соотношение примет вид

$$C_1^n \frac{r^{1-n} - R^{1-n}}{1-n} = \frac{K_\delta}{\Psi_\delta} (P_0 - P_\delta)$$

Отсюда найдем

$$P_\delta = P_0 - C_1^n \frac{K_\delta}{\Psi_\delta} \frac{r^{1-n} - R^{1-n}}{1-n} \quad (10)$$

Аналогично проинтегрируем уравнения (3) и (5). Если интеграл уравнения (5) представим в виде

$$V_h = \frac{C_3}{r}$$

то решения уравнения (3), с учетом граничного условия (6), запишется так

$$C_3^n \cdot \frac{r^{1-n} - (R + \delta + h)^{1-n}}{1-n} = \frac{K_h}{\Psi_h} (P - P_h) \quad (11)$$

Условие сшивания скоростей $\varepsilon_h V_h = \varepsilon_\delta V_\delta$ на границе $r = R + \delta$ дает зависимость $\varepsilon_h C_3 = \varepsilon_\delta C_1$. При этом постоянная интегрирования C_3 выражается через константу C_1 в виде:

$$C_3 = \frac{\varepsilon_\delta^n}{\varepsilon_h^n} C_1^n$$

Тогда зависимость (11) можно представить следующим образом

$$P_h = P - C_1^n \frac{\varepsilon_\delta^n}{\varepsilon_h^n} \frac{K_h}{\Psi_h} \frac{r^{1-n} - R^{1-n}}{1-n} \quad (12)$$

Полученные соотношения для давлений (10) и (12) должны выполнять граничное условие (7), с помощью которого определяется постоянное интегрирования C_1 . После определения C_1 , в результате несложных преобразований, для расчета скоростей фильтрации окончательно получим

$$-V_h^n r^n \left[\frac{\Psi_h (R + \delta + h)^{1-n} - (R + \delta)^{1-n}}{K_h (1-n)} + \frac{\varepsilon_h^n \Psi_\delta (R + \delta)^{1-n} - R^{1-n}}{\varepsilon_\delta^n K_\delta (1-n)} \right] + \frac{\rho}{2} \frac{\varepsilon_\delta^2 - \varepsilon_h^2}{\varepsilon_\delta^2} V_h^2 = P - P_0, \quad (13)$$

$$V_\delta = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_\delta} V_h \quad (14)$$

Уравнения (13), (14) позволяют вычислять скорость фильтрации сплошной фазы суспензии в аппаратах трубчатого типа. Полученные уравнения могут быть преобразованы для расчета фильтровальных аппаратов пластинчатого типа. Для этого необходимо выполнить предельный переход $R \rightarrow \infty$. Предварительно проведем необходимые преобразования.

Несложно показать, что

$$(R + \delta)^{1-n} - R^{1-n} = R^{1-n} \left[\left(1 + \frac{\delta}{R} \right)^{1-n} - 1 \right]$$

$$(R + \delta + h)^{1-n} - (R + \delta)^{1-n} = (R + \delta)^{1-n} \left[\left(1 + \frac{h}{R + \delta} \right)^{1-n} - 1 \right]$$

Выполним предельный переход $R \rightarrow \infty$, используя замечательный предел

$$\lim_{x \rightarrow 0} (1 + x)^n = 1 + nx.$$

после замены переменных $1/R = x$ или $1/(R + \delta) = x$. С учетом того, что при условии $R \rightarrow \infty$ имеет место предел $r/R \rightarrow 1$, получим

$$\frac{r^n}{1-n} \left[(R + \delta)^{1-n} - R^{1-n} \right] = \delta$$

$$\frac{r^n}{1-n} \left[(R + \delta + h)^{1-n} - (R + \delta)^{1-n} \right] = h$$

Тогда, уравнение (13) для фильтровальных аппаратов пластинчатого типа примет вид

$$\frac{\rho}{2} \frac{\varepsilon_\delta^2 - \varepsilon_h^2}{\varepsilon_\delta^2} V_h^2 - V_h^n \left(\frac{\Psi_h}{K_h} \frac{\varepsilon_\delta^n}{\varepsilon_h^n} h + \frac{\Psi_\delta}{K_\delta} \delta \right) = P - P_0 \quad (15)$$

а уравнение (14) остается в силе.

Если фильтруемая среда подчиняется линейному реологическому закону состояния, то уравнения (13) также необходимо преобразовывать, используя предельный переход $n \rightarrow 1$. С помощью замечательного предела

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{a^x - 1}{x} = \ln a$$

можно показать, что имеет место равенства

$$\lim_{n \rightarrow 1} \frac{(R + \delta)^{1-n} - R^{1-n}}{1-n} = \ln \frac{R + \delta}{R}$$

$$\lim_{n \rightarrow 1} \frac{(R + \delta + h)^{1-n} - (R + \delta)^{1-n}}{1-n} = \ln \frac{R + \delta + h}{R + \delta}$$

Тогда уравнение (13) преобразуется к виду

$$\frac{\rho}{2} \frac{\varepsilon_\delta^2 - \varepsilon_h^2}{\varepsilon_\delta^2} V_h^2 - V_h^n \left(\frac{\Psi_h}{K_h} \ln \frac{R + \delta + h}{R + \delta} + \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_\delta} \frac{\Psi_\delta}{K_\delta} \ln \frac{R + \delta}{R} \right) = P - P_0 \quad (16)$$

Построим уравнение для расчета толщины слоя осадка. При заданной концентрации дисперсных частиц \dot{a}_T , их приток на элементарную площадку $\Delta S = (R + \delta + h)\Delta l$ составляет

$$q(t) = \int_0^t \alpha_T V \Delta S dt$$

Продифференцируем данное соотношение с учетом условия $(1 - \dot{a}_T)V = \varepsilon_h V_h$ на границе осадок-суспензия

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon_h \alpha_T}{1 - \alpha_T} V_h \Delta S \quad (17)$$

С другой стороны за время Δt объем слоя осадка на единичной площадке ΔS изменится на величину $\Delta q = (1 - \varepsilon_h)\Delta S \Delta h$

Разделим обе части данного равенства на Δt и выполним предельный переход $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\frac{dq}{dt} = (1 - \varepsilon_h)\Delta S \frac{dh}{dt} \quad (18)$$

Приравняв правых частей соотношений (17) и (18), для расчета изменения толщины

верхнего слоя осадка получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\alpha_T \varepsilon_h}{(1 - \alpha_T)(1 - \varepsilon_h)} V_h \quad (19)$$

Построенное уравнение решается с начальным условием $h=0$ при $t=0$.

Численные расчеты по построенным математическим моделям были проведены в безразмерных переменных

$$\tilde{r} = \frac{r}{R}, \quad \tilde{\delta} = \frac{\delta}{R}, \quad \tilde{h} = \frac{h}{R}, \quad \tilde{V}_i = \frac{V_i}{V_*}, \quad \tilde{K}_i = \frac{K_i}{R^2}, \quad \tilde{P} = \frac{P - P_0}{\rho V_*^2}, \quad \tilde{t} = \frac{V_*}{R} t$$

где V_* - характерная скорость, которая вычисляется через число Рейнольдса. В частности, после перехода к безразмерным переменным, уравнение (13) примет следующий вид (знаки тильда ~ опущены)

$$\frac{\varepsilon_\delta^2 - \varepsilon_h^2}{2\varepsilon_\delta^2} V^{2-n} - V^n \left(\frac{1}{\text{Re}_i K_h} \frac{(1 + \delta + h)^{1-n} - (1 + \delta)^{1-n}}{1-n} + \frac{\varepsilon_h^n}{\varepsilon_\delta^n} \frac{1}{\text{Re}_i K_\delta} \frac{(1 + \delta)^{1-n} - 1}{1-n} \right) = P$$

где $\text{Re}_i = \frac{R V_*^{2-n} \rho}{\Psi_i}$

При этом вид уравнения (19) не изменится.

Некоторые результаты расчетов, для режима фильтрования с постоянной скоростью, приведены на рисунках 1-3. В режиме фильтрования с постоянной скоростью, по мере увеличения толщины осадка, происходит возрастание давления в аппарате.

На процесс фильтрации сильно влияют реологические параметры суспензии Ψ_i и n . Эквивалентная вязкость среды обратно пропорциональна числу Рейнольдса Re . На рис. 1 показано влияние параметра Re на интенсивность возрастания давления. Как видим, более интенсивный рост давления наблюдается при малых значениях числа Re . Следовательно, при увеличении эквивалентной вязкости среды, предельное значение давления в аппарате достигается раньше, что приведет к сокращению времени фильтровального цикла. Влияние степени нелинейности среды n показано на рис. 2. При увеличении этого параметра давление в аппарате растет быстрее, следовательно, сокращается время достижения критического давления.

При фильтровании суспензий с повышенной концентрации нарастание слоя осадка происходит более интенсивно. В результате этого быстрее растет давление в аппарате и сокращается длительность фильтровального цикла (рис.3).

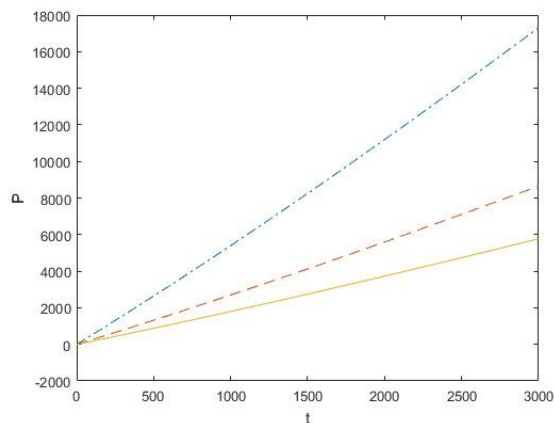


Рис. 1. Изменение безразмерного давления от безразмерного времени при различных значениях числа Рейнольдса для $n=0.5$, $\dot{\alpha}=0.01$: $Re=100$ – штрихпунктирная линия, $Re=200$ – пунктирная линия, $Re=300$ – сплошная линия.

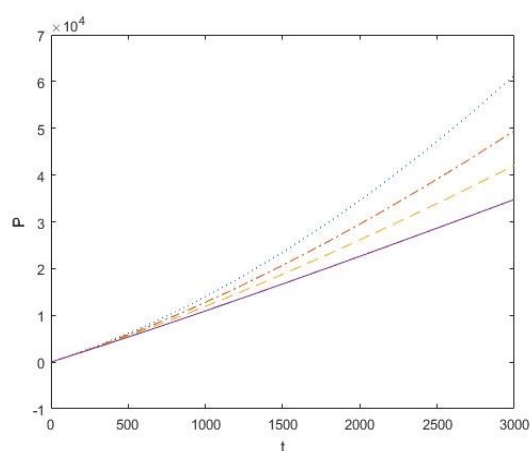


Рис. 2. Изменение безразмерного давления от безразмерного времени при различных значениях параметра нелинейности n для $Re=100$, $\dot{\alpha}=0.01$: $n=1.7$ – пунктирная линия, $n=1.2$ – штрихпунктирная линия, $n=0.8$ – штриховая линия, $n=0.3$ – сплошная линия.

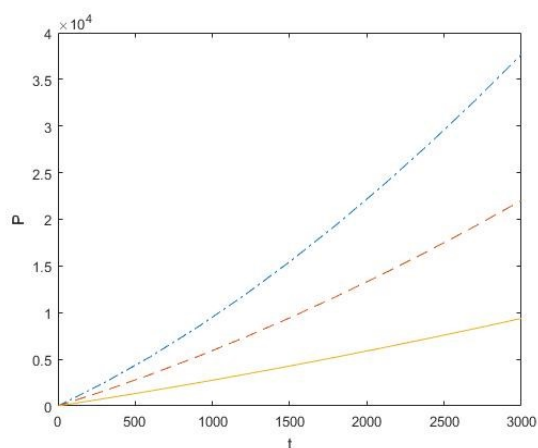


Рис. 3. Изменение безразмерного давления от безразмерного времени при различных значениях концентрации $\dot{\alpha}$ для $Re=100$, $n=1.5$: $\dot{\alpha}=0.015$ – штрихпунктирная линия, $\dot{\alpha}=0.01$ – штриховая линия, $\dot{\alpha}=0.005$ – сплошная линия.

Выводы. Построена математическая модель фильтрования тонкодисперсных суспензий, подчиняющихся степенной модели реологического состояния среды, в намывных фильтрах периодического типа. Для режима фильтрования с постоянной скоростью приве-

дены результаты численных расчетов. Установлены закономерности влияния эквивалентной вязкости, степени нелинейности среды, а также исходной концентрации дисперсной фазы, на длительность фильтровального цикла.

Литература

1. Ахмадиев Ф.Г., Фарахов М.И., Бекбулатов И.Г., Исынов Ч.Х. Математическое моделирование процесса фильтрации двухфазных суспензий в трубчатых фильтрах в неизотермических условиях // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50. – № 1. – С. 44.
2. Ибяттов, Р. И. О моделировании случайных процессов в агропромышленном комплексе / Р. И. Ибяттов, Б. Г. Зиганшин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 17. – № 1(65). – С. 50-55.
3. Багайсков Ю.С. Разработка состава композиционного материала трубчатых фильтров для очистки технических жидкостей // Технология машиностроения. – 2013. - № 6. – С. 41-43.
4. Булышев Е.М., Худобин Л.В. Высокопроизводительные намывные фильтры // Водоочистка. – 2019. - № 6. – С. 51-62.
5. Ибяттов Р.И., Холпанов Л.П., Ахмадиев Ф.Г. Течение многофазной среды по проницаемой поверхности с образованием осадка // Инженерно-физический журнал. – 2005. – № 2. – С. 65-72.
6. Ибяттов Р.И., Холпанов Л.П., Ахмадиев Ф.Г., Бекбулатов И.Г. Математическое моделирование течения многофазной гетерогенной фазы по проницаемой трубе // Теоретические основы химической технологии. – 2005. – № 5. – С. 533-541.
7. Ю. Ф. Лачуга, Р. И. Ибяттов, Б. Г. Зиганшин. Моделирование траектории движения зерна по рабочим органам пневмомеханического шелушителя // Российская сельскохозяйственная наука. – 2020. – № 4. – С. 73-76.
8. Жуков В.Г., Чесноков В.М., Лукин Н.Д. Получение кумулятивной функции удельной поверхности пористых сред по заданной гистограмме частотного распределения размеров пор // Достижения науки и техники АПК. – 2019. – Т. 33. – № 11. – С. 82-87.
9. Бернадинер М.Г., Ентов В.М. Гидродинамическая теория фильтрации аномальных жидкостей. М.: Наука, 1975. – 200 с.
10. Балашов В.А., Тябин Н.В. Фильтрация неньютоновских жидкостей, подчиняющихся степенному реологическому закону // Теоретические основы химической технологии. – 1989. – № 6. – С. 844-846.
11. Севинс Дж. Неньютоновское течение в пористой среде // Механика: Сборник переводов. М.: Мир. 1974. Вып. 2. – С. 59-115.
12. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск, 1984. – 164 с.
13. Ю. Ф. Лачуга, Р. И. Ибяттов, Ю. Х. Шогенов // Метод расчета траектории движения зерна в пневмомеханическом шелушителе // Российская сельскохозяйственная наука. – 2021. – № 6. – С. 64-67.

Сведения об авторах:

Ибяттов Равиль Ибрагимович – доктор технических наук, профессор, e-mail: r.ibyatov@mail.ru
ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», г. Казань, Россия.

NUMERICAL CALCULATION OF FILTRATION OF NON-NEUTONIAN SUSPENSION IN PRE-WASH FILTERS

R.I. Ibyatov

Abstract. The research was carried out with the aim of mathematical modeling of the process of filtering finely dispersed non-Newtonian suspensions in intermittent pre-wash filters. The power-law fluid model is used to describe the rheological state of the medium. At the beginning of the filtration cycle, a layer of auxiliary material is washed, which is used as a filtering partition. A finely dispersed suspension during the filtration process forms a second layer, as it grows, the resistance to the flow of the liquid phase increases. The filtration cycle ends after reaching the critical values of pressure or productivity, depending on the operating mode of the device. Filtration equations are written in a cylindrical coordinate system separately for each layer. At the interface between the layers, pressure and velocity jumps arising due to the difference in porosity are taken into account. To calculate the thickness of the formed sediment layer, a differential equation was built. It is shown that the constructed mathematical model can be used to calculate the filtration of suspensions with a linear model of the rheological state, if the passage to the limit is performed. It is also shown that after passing to the limit, the results of the work allow modeling the process of filtering non-Newtonian media in plate-type filters. Numerical calculations are carried out for the filtration mode with a constant speed. The regularities of the effect of equivalent viscosity, the degree of medium nonlinearity, as well as the initial concentration of the dispersed phase on the filtration process were studied. It is shown that with an increase in these parameters, the pressure limit in the apparatus reaches earlier, which will lead to a reduction in the filter cycle time.

Key words: priming filter, power model liquid, suspension filtering, sediment layer.

References

1. Akhmadiev FG, Farakhov MI, Bekbulatov IG, Isyanov ChKh. [Mathematical modeling of filtering process of two-phase suspensions in tubular filters under non-isothermal conditions]. *Teoreticheskie osno-vy khimicheskoi tekhnologii*. 2016; Vol.50. 1. 44 p.
2. Ibyatov, R. I. On modeling random processes in the agro-industrial complex / R. I. Ibyatov, B. G. Ziganshin // *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*. – 2022. – Т. 17. – № 1(65). – Pp. 50-55.
3. Bagaikov YuS. [Development of the composition of the composite material of tubular filters for the purification of technical liquids]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2013; 6. 41-43 p.
4. Bulyshev EM, Khudobin LV. [High-performance pre-wash filters]. *Vodoochistka*. 2019; 6. 51-62 p.
5. Ibyatov RI, Kholpanov LP, Akhmadiev FG, Bekbulatov IG. [Mathematical modeling of the flow of a multiphase heterogeneous fluid through a permeable pipe]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*. 2005; 5. 533-541 p.
6. Ibyatov R.I., Kholpanov L.P., Akhmadiev F.G., Bikbulatov I.G. Mathematical modeling of the flow of a multiphase heterogeneous phase through a permeable pipe // *Theoretical foundations of chemical technology*. - 2005. – No. 5. – pp. 533-541.
7. Yu. F. Lachuga, R. I. Ibyatov, B. G. Ziganshin. Modeling of the grain movement trajectory by the working body of a pneumomechanical husker // *Russian agricultural science*. – 2020. – No. 4. – pp. 73-76.

8. Zhukov VG, Chesnokov VM, Lukin ND. [Obtaining the cumulative function of the specific surface area of porous media from a given histogram of the frequency distribution of pore sizes]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2019; Vol. 33. 11. 82-87 p.

9. Bernadiner MG, Entov VM. . Gidrodinamicheskaya teoriya fil'tratsii anomal'nykh zhidkosti. [Hydrodynamic theory of filtration of anomalous liquids]. Moscow: Nauka. 1975; 200 p.

10. Balashov VA, Tyabin NV. Teoreticheskie os-novy khimicheskoi tekhnologii. [Filtration of non-Newtonian liquids subject to a power rheological law]. 1989; 6. 844-846 p.

11. Sevins Dzh. Nen'yutonovskoe techenie v poristoi srede. [Non-Newtonian flow in a porous medium]. Mekhanika: Sbornik perevodov. Moscow: Mir. 1974; Issue 2. 59-115 p.

12. Gol'dshtik M.A. Protsessy perenosa v zernistom sloe. [Transfer processes in a granular layer]. Novosibirsk. 1984; 164 p.

13. Yu. F. Lachuga, R. I. Ibyatov, Yu. Kh. Shogenov // Method of calculating the trajectory of grain movement in a pneumomechanical husker // Russian Agricultural Science. – 2021. – No. 6. – pp. 64-67.

Authors:

Ibyatov Ravil Ibragimovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: r.ibjatov@mail.ru
Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.