

УДК 504.06

К. А. Фонарева, аспирант, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

Б. А. Сентяков, доктор технических наук, профессор, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

К. П. Ширококов, кандидат технических наук, доцент, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОРБЦИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ ВОЛОКНИСТЫМ МАТЕРИАЛОМ

Представлена математическая модель процесса сорбции нефтепродуктов волокнистым материалом на основе штапельного полиэтилентерефталатного волокна, которая позволяет обоснованно назначать параметры волокнистых сорбирующих изделий в зависимости от условий их применения.

Ключевые слова: математическое моделирование, процесс сорбции, коэффициент сорбции.

Математическое моделирование широко применяется в научных исследованиях сорбционных процессов для интерпретации результатов экспериментов, проводимых с целью определения неизвестных характеристик изучаемых процессов [1]. Математические модели, описывающие эти процессы, представляют собой уравнения с коэффициентами, зависящими от решения. В ряде случаев один или несколько коэффициентов неизвестны, и их необходимо определить из имеющейся экспериментальной информации.

В данной работе ставится задача определения коэффициента сорбции различных нефтепродуктов волокнистым сорбентом на основе штапельного полиэтилентерефталатного волокна. Представим сорбент в виде множества изогнутых близкорасположенных элементарных волокон, образующих между собой систему капилляров. Сорбент представляет собой систему элементарных капилляров с приведенным радиусом r , образованных близкорасположенными элементарными волокнами в количестве z_k , имеющими радиус кривизны R . Графическая модель такого сорбента и модель процесса сорбции показана на рис. 1 и 2. Процесс сорбции можно представить следующим образом. Пучки элементарных волокон различной длины и различного диаметра опускаются в сосуд с нефтью и водой, принудительно затопляются в эту среду, волокна начинают подниматься на поверхность, и по изогнутым близкорасположенным элементарным волокнам постепенно начинает подниматься нефть на определенную высоту h . Вода, имея меньшую вязкость, стекает обратно, а нефть, поднимаясь, начинает заполнять пространства между изогнутыми волокнами.

Поскольку элементарные волокна не полые, то на рис. 2 показано сечение элементарного капилляра.

При составлении математической модели процесса сорбции принимаем следующие допущения и ограничения:

– пучки элементарных волокон, образующие систему капилляров, имеют постоянный радиус кривизны R , который изменяется в пределах от R_{\min} до R_{\max} ;

– пучки элементарных волокон могут быть затоплены в сорбируемую среду на величину h_0 не более чем R_{\max} ;

– минимальный радиус кривизны системы капилляров R_{\min} всегда больше максимальной высоты сорбируемой жидкости над ее уровнем в сосуде, которая равна максимальному гидростатическому давлению H_{\max} ;

– сорбируемый нефтепродукт, который в дальнейшем будем называть жидкостью, имеет постоянную вязкость, и его движение по капиллярам считается установившимся, подчиняющимся известному уравнению Пуазейля.

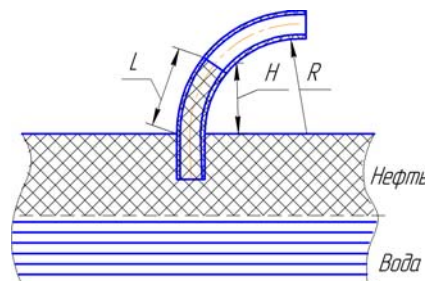


Рис. 1. Графическая модель элементарного капилляра

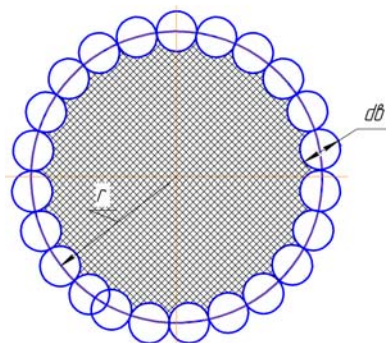


Рис. 2. Сечение элементарного капилляра

В основу следующих рассуждений положена методика вывода уравнения Уошборна [2], устанавливающего зависимость глубины проникновения жид-

кости в капилляр от продолжительности процесса, представленная в работе [3]. В работе [3] сначала единичный капилляр представлен в виде произвольно ориентированного в пространстве цилиндра переменного сечения, а затем, в силу принятых допущений и сложности решения полученных уравнений, он был преобразован в прямой круговой цилиндр, расположенный наклонно под углом к поверхности сорбируемой жидкости. Дальнейшее решение приведено к известному уравнению Уошборна для капилляра с вертикальным расположением. Предлагаемая в нашей работе графическая модель процесса сорбции жидкости волокнистым материалом максимально приближена к реальному процессу, когда волокна, образующие систему капилляров, расположены не вертикально, а имеют реальные искривления в пространстве.

Объемный расход жидкости по каждому капилляру, образованному элементарными волокнами сорбента, расположенными на поверхности жидкости, может быть определен по уравнению Пуазейля:

$$Q = \pi r^4 \Delta P / 8\eta L, \quad (1)$$

где r – эффективный радиус капилляра; ΔP – разность давлений, под которой происходит впитывание жидкости сорбентом; η – вязкость сорбируемой жидкости; L – длина капилляра.

Эффективный радиус капилляра r определяется в соответствии с графической моделью сорбента по данным работы [4]. Например, если капилляр образован четырьмя, тремя или шестью элементарными волокнами соответственно, то

$$r = (4 - \pi)d_b / 2\pi, \quad r = (1,73 - \pi/2)d_b / \pi$$

$$\text{или } r = (5,2 - \pi)d_b / 4\pi, \quad (2)$$

где d_b – диаметр элементарного волокна.

Разность давлений ΔP , под которой происходит впитывание жидкости сорбентом, определяется следующим образом:

$$\Delta P = P_k - P_h. \quad (3)$$

Известно, что движение жидкости по капиллярам происходит в результате действия капиллярного давления P_k , которое зависит от угла смачивания θ жидкостью стенки капилляра и поверхностного натяжения жидкости σ . Величина этого давления определяется по формуле Лапласа:

$$P_k = 2\sigma \cos \theta / r. \quad (4)$$

Так как в принятой графической модели рассматриваемого процесса капилляры расположены в вертикальной плоскости и имеют известный радиус кривизны R , то гидростатическое давление P_h в выражении (3) определяется по формуле

$$P_h = \rho g H, \quad (5)$$

где ρ – плотность жидкости; g – ускорение силы тяжести; H – гидростатическое давление.

Рассмотрев схему на рис. 1, выразим гидростатическое давление H через длину участка капилляра L , впитавшего жидкость, и радиус его кривизны R :

$$H = R \sin(360L/2\pi R). \quad (6)$$

Подставив значение H из (6) в (5), получим выражение для определения гидростатического давления в функции радиуса кривизны капилляра:

$$P_h = \rho g R \sin(360L/2\pi R). \quad (7)$$

Подставив в уравнение (1) значение разности давлений ΔP , под которой происходит впитывание жидкости сорбентом, определенное из выражений (3), (4) и (7), определим величину скорости впитывания жидкости сорбентом, которая является переменной по мере увеличения длины L участка капилляра, впитавшего жидкость:

$$Q = \pi r^4 (2 \cos \theta / r - \rho g R \sin(360L/2\pi R)) / 8\eta L. \quad (8)$$

Заметим, что максимальное гидростатическое давление в капилляре может быть определено из условия равенства давлений P_k и P_h , когда процесс впитывания прекращается, по формуле Жюрена при пренебрежении плотностью воздушной среды:

$$H_{\max} = 2\sigma \cos \theta / r \rho g. \quad (9)$$

Действительная скорость впитывания жидкости сорбентом, свободно размещенным на поверхности жидкости, без принудительного затопления его в жидкость, будет определяться по формуле

$$Q_{\max} = \pi r^4 (2 \cos \theta / r - \rho g R \sin(360L_{\max}/2\pi R)) / 8\eta L_{\max} Q_{\max}, \quad (10)$$

где $L_{\max} = 2\pi R \arcsin(H_{\max}/R) / 360$.

Коэффициент сорбции при этом определяется по формуле

$$K_{cc} = m_{nc} / m_b, \quad (11)$$

где m_{nc} – масса свободно впитавшейся жидкости (в нашем случае – нефтепродукта), которая определяется как произведение суммарного объема всех капилляров образца сорбента с известными размерами и известной условной плотностью при $H = H_{\max}$; m_b – масса образца сорбента, участвующего в процессе сорбции.

Масса свободно впитавшейся жидкости m_{nc} образцом сорбента с известной массой m_b зависит от длины L_{\max} участка капилляра, впитавшего жидкость, количества z_k образованных элементарными волокнами капилляров и площади их поперечного сечения πr^2 :

$$m_{nc} = 2\pi^2 r^2 \rho z_k R \arcsin(H_{\max}/R) / 360. \quad (12)$$

В реальных условиях применения рассматриваемого волокнистого сорбента на основе полиэтилен-терефталатного волокна для сорбции нефтепродуктов с поверхности воды целесообразным является

принудительное погружение сорбента в водоем, на поверхности которого разлит нефтепродукт. При этом можно увеличить коэффициент сорбции, следовательно, и эффективность сбора нефтепродукта. Тогда коэффициент сорбции $K_{сп}$ определяется из условия полного заполнения пространства между всеми элементарными волокнами образца сорбента без принятия во внимание явления капиллярного эффекта, о котором постоянно шел разговор выше:

$$K_{сп} = m_{нп} / m_в, \quad (13)$$

где масса нефтепродукта, сорбированного с поверхности воды принудительно, $m_{нп}$, определяется из (12) при условии $H_{max} = R$:

$$m_{нп} = \pi^2 r^2 \rho z_k R / 2. \quad (14)$$

Масса образца волокнистого материала, сорбированного указанное в (14) массовое количество жидкости, может быть определена по формуле

$$m_в = z_k m_1, \quad (15)$$

где m_1 – масса каждого из множества волокон, из которых состоит образец волокнистого материала, определяемая как произведение объема каждого единичного волокна диаметром $d_в$ и длиной $\pi R / 2$ на его плотность $\rho_в$, которая после преобразований определяется по формуле

$$m_1 = \pi^2 d_в^2 R \rho_в / 8. \quad (16)$$

Подставив (16), (15) и (14) в (12), коэффициент сорбции определим выражением

$$K_{сп} = 4r^2 \rho / d_в^2 \rho_в. \quad (17)$$

Если предположить, что каждый единичный капилляр волокнистого сорбента образован некоторым количеством элементарных волокон диаметром $d_в$, размещенных на окружности, радиус которой равен эффективному радиусу капилляра r , то имеет силу равенство

$$2\pi r = z_k d_в, \quad (18)$$

откуда эффективный радиус капилляра определяется выражением

$$r = z_k d_в / 2\pi. \quad (19)$$

При расчете коэффициента сорбции по формуле (17) с учетом выражения (19) представилась сложность в определении количества z_k элементарных волокон, образующих единичные капилляры. Для определения z_k предложено использовать полученные ранее результаты экспериментального исследования процесса сорбции нефти полиэтиленерефталатным волокном, представленные в таблице.

Результаты расчета количества элементарных волокон, образующих единичный капилляр

№ опыта	Диаметр волокна $d_в$, м	Масса собранной нефти $m_{нп}$, кг	Масса образца волокна $m_в$, кг	Коэффициент сорбции (эксперимент) $K_{сп}$	Эффективный радиус капилляра r , м	Количество элементарных волокон z_k	Коэффициент сорбции (по формуле (17)) $K_{сп}$
1	0,000010	0,0723	0,00270	26,78	0,000034	21	25,5
2	0,000030	0,093	0,00301	31,23	0,00011	23	33
3	0,000051	0,10138	0,00262	38,7	0,00021	25	35,1
4	0,000130	0,03671	0,00429	8,56	0,00025	12	11,4

Анализируя результаты, представленные в таблице, можно заметить, что с увеличением среднего диаметра элементарных волокон от 10 до 51 мкм коэффициент сорбции увеличивается от 26,78 до 38,1, а при дальнейшем увеличении среднего диаметра элементарных волокон от 51 до 130 мкм – уменьшается до 8,56. Заметим также, что количество z_k элементарных волокон, образующих единичные капилляры, зависит от диаметра $d_в$ волокон. Расхождение результатов эксперимента и расчета не превышает для среднего диаметра элементарных волокон от 10 до 51 мкм 10 %, а для среднего диаметра элементарных волокон – от 130 мкм 25 %. Получены математические зависимости, позволяющие вычислить коэффициент сорбции нефти волокнистым материалом в зависимости от его плотности и среднего диаметра элементарных волокон. Математическая

модель процесса сорбции нефтепродуктов волокнистыми материалами позволит прогнозировать сорбционные свойства новых материалов.

Библиографические ссылки

1. Туйкина С. Р. Определение коэффициентов сорбции решением обратной задачи // Математическое моделирование. – 1997. – № 8. – С. 96–104.
2. Воюцкий С. С. Физикохимические основы пропитывания и ипрегнирования волокнистых систем водными дисперсиями полимеров. – Л. : Химия, 1969. – 336 с.
3. Волков В. А. Поверхностно-активные вещества в синтетических моющих средствах и усилителях химической чистки. – М. : Легпромбытиздат, 1985. – 250 с.
4. Консейсао А. А., Самойлов Н. А., Хлесткин Р. Н. Сорбент “DULROMABSORB” для сбора нефтепродуктов с мест аварийных разливов // Химия и технология топлив и масел. – 2007. – № 2. – С. 42–46.

K. A. Fonareva, Post-graduate, Votkinsk Branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University
 B. A. Sentyakov, DSc in Engineering, Professor, Votkinsk Branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University
 K. P. Shirobokov, PhD in Engineering, Associate Professor, Votkinsk Branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University

The paper presents the mathematical model of the process of oil sorption by fibrous material based on polyethylene terephthalate staple fibers. The model allows to assign reasonably the parameters of fibrous sorbent products depending on conditions of their application.

Key words: mathematical modeling, process of sorption, sorption coefficient.

УДК 629.027

В. А. Дюнов, кандидат технических наук, Пермский военный институт внутренних войск МВД России
С. Н. Казанцев, Пермский военный институт внутренних войск МВД России
А. Д. Проданов, курсант, Пермский военный институт внутренних войск МВД России
Я. Э. Алксне, курсант, Пермский военный институт внутренних войск МВД России

УПРАВЛЯЕМАЯ ПОДВЕСКА С МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМИ АМОРТИЗАТОРАМИ

Описываются возможности управления характеристиками подвески за счет установки амортизаторов с магнитоологическими жидкостями.

Ключевые слова: автомобиль, подвеска, устойчивость, плавность хода, амортизатор.

В условиях эксплуатации автомобилей их средняя скорость движения существенно зависит от подвески. Поэтому важно знать, как уменьшить уровень вибронегруженности автомобиля и снизить ограничивающее воздействие перегрузок на скоростной режим.

Большое значение на плавность хода автомобиля оказывает коэффициент демпфирования [1]. Он характеризует степень затухания колебаний, возникающих в упругой системе от какого-либо внешнего возбуждающего воздействия. При одной и той же частоте свободных колебаний они могут затухать за больший или меньший отрезок времени в зависимости от значения коэффициента демпфирования. При большем его значении (при установке более мощных амортизаторов) колебания затухают быстрее. В случае установившихся вынужденных колебаний амплитуда их тем меньше, чем больше коэффициент демпфирования.

В практике эксплуатации автомобилей неизбежны случаи их использования с недогрузкой (с массой, уменьшенной по сравнению с номинальной). Также непостоянно и состояние дорожного покрытия, вызывающее колебания. В этом случае частота собственных колебаний может увеличиваться, а плавность хода и быстроходность ухудшаться. Для устранения этого недостатка необходимо применять упругие элементы с нелинейной характеристикой, у которых отношение жесткости подвески к массе автомобиля практически постоянно в рабочем диапазоне изменения массы.

Таким свойством обладают, в частности, пневматические и пневмогидравлические подвески, все чаще применяемые как на легковых автомобилях, так и на автомобилях большой грузоподъемности. Они позволяют не только улучшить плавность хода, но и снизить металлоемкость движителя, так как

они легче и более компактны, чем рессорные. Конструкция таких подвесок хорошо известна и отработана [2].

Одним из современных направлений развития управляемых подвесок являются подвески с магнитоологическими амортизаторами. Магнитоологические амортизаторы могут устанавливаться вместо обычных гидравлических амортизаторов без существенных доработок конструкции автомобиля. Конструкция таких подвесок отработана в настоящее время хуже, хотя они устанавливаются на ряд зарубежных автомобилей (Audi, Ferrari, Cadillac, Chevrolet).

Конструктивно магнитоологический амортизатор представляет собой гидравлический амортизатор, в поршне которого расположен электромагнит, (рис. 1). Ферромагнитная жидкость (ФМЖ), используемая в амортизаторе, представляет собой коллоидный раствор высокодисперсных ферромагнитных материалов в различных носителях. Под воздействием магнитного поля частицы ферромагнитных материалов выстраиваются по линиям магнитного поля, в результате чего в зоне магнитного поля изменяется вязкость и плотность жидкости. Так, статическая вязкость ФМЖ составляет 0,002-0,003 Па·с, но в магнитном поле увеличивается до 0,003-0,0045 Па·с. Физическая плотность ФМЖ обычно равна 0,9-1,1 г/см³, но под воздействием магнитного поля может составлять 8-9 г/см³ и более. Очевидным является и изменение динамической вязкости ферромагнитной жидкости, при этом изменять вязкость возможно с частотой 1000 раз/сек., то есть регулирование характеристик происходит фактически мгновенно [3, 4].

Главным показателем всех амортизаторных жидкостей, качественно влияющим на характеристику сопротивления амортизаторов, является коэффициент кинематической вязкости [5]: