

UDC 004.02;51-7;667

I.E. FURTAT

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

YU.O. FURTAT

G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering

KINETICS OF NON-ISOTHERMAL ADSORPTION AT CONSTANT CONCENTRATION ON THE SURFACE OF THE THREAD

To describe the process of dyeing textile materials, in the general case, it is not enough to consider the kinetics of dye adsorption by a single fiber. This assumption is valid in the case of low intensity low temperature processes, when the diffusion coefficient of the dye to the fiber is several orders of magnitude smaller than the diffusion coefficient in the space between the fibers. In this case, the mass transfer process is determined by the transfer in the fiber. As the temperature rises or with other methods of intensifying the process, there is a sharp increase in the diffusion coefficient in the fiber, while the diffusion coefficient in the liquid phase outside the fiber changes to an incomparably lesser extent, i.e. the difference in the values of the diffusion coefficients in the fiber and outside the fiber decreases sharply. If we take into account the significant difference in the linear dimensions of the fiber and thread, it becomes obvious that there comes a moment when the relaxation time of the diffusion in the fiber, defined as $\tau_f = \frac{r_f^2}{D_f^2}$, becomes less than the relaxation time in the thread, defined as $\tau_t = \frac{r_t^2}{D_t^2}$. Given these conditions for the comparability of the relaxation times of diffusion along the fiber and thread, it is completely incorrect to describe the process of dyeing a textile material by considering the kinetics of the process in a separate fiber.

The following scheme of the process is more rigorous: transfer of the dye to the surface of the thread, diffusion in the space between the fibers, adsorption by the inner surface of the fiber, and chemical interaction, if any.

Such a formulation of the problem has much in common with the problems of diffusion in granular porous media [1], which are of great importance for the quantitative description of the dynamics of sorption both in general theoretical terms and for describing various technological processes: filtration through a layer grains of various shapes, diffusion extraction of substances from porous media, etc.

Existing equations that describe the processes of diffusion in porous systems containing microporous inclusions don't take into account the restrictions on the shape of the microporous inclusion and, in general, on the geometry of the system. Naturally, the solution of these equations requires a certain specification both in relation to the shape of the microporous inclusion and in relation to the nature of diffusion.

When considering such processes, it is necessary to proceed from the solution of the problem of diffusion into a microporous inclusion. The process of mass transfer in a fiber is considered as a diffusion process with an apparent diffusion coefficient. In the general case, this statement of the problem should be supplemented by taking into account the interaction of double electrical layers of the dye particle and fibers, which slows down (for the same surface charges) the process of dye transfer

In the meantime, in order to simplify the problem, the following model of the process is proposed: we consider molecular diffusion into an infinitely long end-impermeable cylinder (thread) with many infinitely long microporous cylindrical inclusions (fibers) uniformly distributed over its cross section. In this case, a problem is considered that is symmetrical in the section.

The kinetic problem is solved for four cases corresponding to the following process conditions:

1. Isothermal mode, constant concentration of dye on the surface of the thread. This task corresponds to dyeing from baths of constant concentration.

2. Isothermal mode, variable concentration on the surface. Corresponds to dyeing from baths of variable concentration, fixing from a film in an environment of saturated steam or in an environment of superheated steam, or heated air at relatively low temperatures (when the heating time of the material is much less than the fixation time).

3. Non-isothermal mode, constant concentration on the surface. Corresponds to dyeing from an aerosol medium.

4. Non-isothermal mode, variable surface concentration. This most complex case corresponds to high-intensity, high-temperature methods of fixing at temperatures of the material at the end of the process, close to the temperature of its softening or destruction.

This article considers the third case, which corresponds to aerosol dyeing of fabrics.

Key words: diffusion, micropores, mass transfer, fiber, concentration.

І.Е. ФУРТАТ

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ю.О. ФУРТАТ

Інститут проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова
Національної академії наук України

КІНЕТИКА НЕІЗОТЕРМАЛЬНОЇ АДСОРБЦІЇ ЗА ПОСТІЙНОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ БАРВНИКА НА ПОВЕРХНІ НИТКИ

Для опису процесу фарбування текстильних матеріалів недостатньо розглядати кінетику адсорбції барвника окремим волокном. Таке припущення справедливе у разі малоінтенсивних низькотемпературних процесів, коли коефіцієнт дифузії барвника волокна на кілька порядків менше коефіцієнта дифузії у просторі між волокнами. У цьому разі процес масопереносу визначається перенесенням у волокні. У міру підвищення температури або за інших способів інтенсифікації процесу відбувається різке збільшення коефіцієнта дифузії у волокні, тоді як коефіцієнт дифузії у рідкій фазі поза волокном змінюється незрівнянно меншою мірою, тобто різниця у величинах коефіцієнтів дифузії у волокні та поза волокном різко зменшується. Якщо врахувати значну різницю в лінійних розмірах волокна і нитки, стає очевидним, що настає момент, коли час релаксації дифузії у волокні, що визначається як $\tau_f = \frac{r_f^2}{D_f^2}$, стає менше часу релаксації нитки, що визначається як $\tau_i = \frac{r_i^2}{D_i^2}$. До цих умов суміс-

ності часів релаксації дифузії по волокну і нитки абсолютно некоректно опис процесу фарбування текстильного матеріалу шляхом розгляду кінетики процесу в окремому волокні.

Суворішою є така схема процесу: перенесення фарбника до поверхні нитки, дифузія в просторі між волокнами, адсорбція внутрішньою поверхнею волокна і хімічна взаємодія, якщо таке має місце.

Така постановка задачі має багато спільного з проблемами дифузії в гранульованих пористих середовищах [1], які мають велике значення для кількісного опису динаміки сорбції як у загальнотеоретичному плані, так і для опису різних технологічних процесів: фільтрації через зерна шару різної форми, дифузійного вилучення речовин з пористих середовищ тощо.

Існуючі рівняння, які описують процеси дифузії у пористих системах, що містять мікропористі включення, не враховують обмеження на форму мікропористого включення і взагалі геометрію системи. Природно, що розв'язання цих рівнянь вимагає певної конкретизації як щодо форми мікропористого включення і щодо характеру дифузії.

Під час розгляду таких процесів необхідно виходити з розв'язання задачі дифузії в мікропористе включення. Процес масопереносу у волокні розглядається як дифузійний із коефіцієнтом дифузії, що здається. Загалом дана постановка завдання повинна бути доповнена з урахуванням взаємодії подвійних електричних шарів частинки барвника та волокон, що уповільнює (за однойменних зарядів поверхонь) процес перенесення барвників

Поки ж з метою спрощення завдання пропонується така модель процесу: розглядається молекулярна дифузія в нескінченно довгий непроникний із торців циліндр (нитка) з безліччю нескінченно довгих мікропористих циліндричних включень (волокон), однорідно розподілених за його перерізом.

Вирішення кінетичної задачі проводиться для чотирьох випадків, що відповідають таким умовам проведення процесу:

1. Ізотермічний режим, стала концентрація барвника на поверхні нитки. Це завдання відповідає фарбуванню з ванн постійної концентрації.

2. Ізотермічний режим, змінна концентрація поверхні. Відповідає фарбуванню з ванн змінної концентрації, фіксації з півки в середовищі насиченої пари або серед перегрітої пари, або нагрітого повітря за відносно низьких температур (коли час прогрівання матеріалу значно менше часу фіксації).

3. Неізотермічний режим, постійна концентрація поверхні. Відповідає фарбуванню із середовища аерозолю.

4. Неізотермічний режим, змінна концентрація поверхні. Цей найбільш складний випадок відповідає високоінтенсивним, високотемпературним способам фіксації за температур матеріалу в кінці процесу, близьких до температури його розм'якшення або деструкції.

У статті розглядається третій випадок, що відповідає аерозольному фарбуванню тканин.

Ключові слова: дифузія, мікропори, масоперенос, волокно, концентрація.

Formulation of the problem

Solving the modeling equation that describes the process of the kinetics of non-isothermal adsorption ([2, (19)] under the boundary condition [2, (6)]), even with a linear adsorption isotherm, encounters significant mathematical difficulties.

Research goal

Kinetics of non-isothermal adsorption can be described by equation [2, (10)]. Let us now show that the contribution of the thermal diffusion term in [2, (10)] to the overall mass transfer is insignificant, quite justified given the ratio of the characteristic relaxation times $\sigma_2/\tau_2 \approx 10^{-3} \div 10^{-2}$.

Main material

Let us first consider the case of sorption at a constant concentration on the surface of the thread, and let the initial condition be $c|_{t=0} = c_0$, and the fibers are free from dye. By definition, there is a thermodiffusion flux per unit surface per unit time.

$$j_T = DK_1 \frac{\partial T}{\partial r} \approx DK_1 \frac{\Delta T}{R_2}, \quad (1)$$

where ΔT is the temperature difference between the surface and the center of the thread. Then the amount of substance M_T transferred through the outer surface of the thread due to thermal diffusion during the relaxation time is

$$M_T = j_T S \sigma_2 = \frac{2DK_1 \Delta T V_2 \sigma_2}{\tau_2}.$$

The total amount of substance M transferred through the surface of the thread by the time equilibrium is reached is obviously (given the initial condition) equal to the amount of substance adsorbed by the fibers. Since the concentration at equilibrium is c_0 , then

$$M = \rho K c_0 V_2. \text{ That 's why } \frac{M_T}{M} = \frac{2\sigma_2}{\tau_2} K_1 \frac{\Delta T}{\rho K c_0}.$$

For aqueous solutions K_1 is of the order of $10^{-8} \div 10^{-6}$ kg/m K.

For concentrations of the order of 3 % $\Delta T \sim 200$ K, $K \approx 20$ (which is consistent with the actual values of quantities used in dyeing practice) we have $\frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-3} \cdot 200}{0.5 \cdot 20 \cdot 0.03} = 1.3\%$.

If the concentration in the space between the fibers at $t = 0$ is zero, then to the amount of the substance adsorbed by the fibers, it is necessary to add the mass distributed in the space between the latter, so instead of $M = \rho K c_0 V_2$ we have $M = (\rho K + 1 - \rho) c_0 V_2$, which, naturally, does not affect the value of the estimate.

For sorption from a limited volume, such estimates are easier to make at zero initial conditions inside the filament. Obviously, the thermal diffusion flux is estimated using formula (1). As for the mass of matter transferred from the outer volume V into the filament, the order of magnitude can be determined from the difference in matter $\Delta M'$ in volume V at the initial and final moments of time. If the concentration in volume V at $t = 0$ is c_0 , then $M_1 = c_0 V$. Regardless of the mechanism of mass transfer inside the thread, the concentration in the external volume at $t \sim \tau'$ (τ' is the characteristic time of the process): at $\tau_1/\tau_2 \ll 1$ $\tau' \approx \tau_2 (1 + b/2)$, and when $\tau_1/\tau_2 \gg 1$ $\tau' \sim \tau_1$ $c_1 = c_0 b_1 / \left(b_1 + \frac{1}{2} \right)$, thus $M_2 = c_1 V = c_0 b_1 V / \left(b_1 + \frac{1}{2} \right)$ and therefore

$$\Delta M = M_1 - M_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_0 V}{b_1 + \frac{1}{2}}.$$

and then

$$\frac{M_T}{\Delta M} = \frac{2\sigma_2}{\tau_2} K_1 \frac{\Delta T}{c_0} \left[\frac{1}{K_p + 1 - \rho} + \frac{V_2}{V} \right].$$

The value of V in dyeing processes is determined by the volume occupied by the solution on the surface of the fabric or thread before the material is supplied to the heat chamber. In order of magnitude, the thickness Δ of the solution film is $2 \cdot 10^{-5}$ m, so from $V = \pi \left[(R_2 + \Delta)^2 - R_2^2 \right] L$ (L is the length of the thread) we obtain

$$\frac{V_2}{V} \sim \frac{1}{2\Delta/R_2 + (\Delta/R_2)^2} \approx 1$$

at $R = 5 \cdot 10^{-5}$ m. At $K = 20$, $c_0 = 3\%$, $\Delta T \approx 200\text{K}$, $\rho = 0.5$, $M_T/\Delta M \approx 13\%$. In fact, $M_T/\Delta M$ estimate is much lower, since the diffusion coefficients in the space between the fibers are of the order of $10-10\text{m}^2/\text{s}$. Thus, the estimates given provide grounds for not taking into account the thermal diffusion term in equation [2, (10)] when describing the coloring process.

Let's first consider the case when the characteristic time of diffusion in the filament significantly exceeds the corresponding time for the fiber throughout the entire process. The equation describing this case can be obtained from [2, (19)] if we use the asymptotic representation for $\psi(t_1) = \sum_k \exp(-\alpha_k^2 t_1)$ for large times. Assuming that $\psi(t_1) = \sum_k \exp(-\alpha_k^2 t_1) \approx \frac{1}{4} \left(\sigma(t_1) - \frac{1}{8} \sigma'(t_1) \right)$ and substituting this expression into [2, (19)], we obtain in the variable

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \frac{\partial(Kc)}{\partial t} - \frac{\rho}{8(1-\rho)} \frac{R_1^2}{D} \left[\frac{\partial^2(Kc)}{\partial t^2} - \frac{1}{D_1} \frac{\partial(Kc)}{\partial t_1} \frac{\partial D_1}{\partial t} \right] = D\Delta c. \tag{2}$$

From the asymptotic expression $\psi(t_1)$ and [2, (23)] it can be seen that the expression in square brackets in [2, (23)] is small compared to the other terms and with its help we can estimate the first approximation described by the equation

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \frac{p}{1-p} \frac{\partial(c_1 K)}{\partial t} \approx \frac{\Delta c_1}{\tau_2}. \tag{3}$$

Therefore, let us put in (2) $c = c_1 + c_2$, where $c_2 \ll c_1$, and $c_2|_{r=R_2} = 0$; $c_2|_{t=0} = c_{01} \left(1 + \frac{1}{f(0)} \right) = 0$, if $c_1|_{t=0} = c_{01}$.

Neglecting quantities of the third order of smallness in (2), we obtain the following equation for

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} + \frac{\rho}{1-p} \frac{\partial(Kc_2)}{\partial t} - \frac{\rho}{8(1-\rho)} \frac{R_1^2}{D_1(t)} \left[\frac{\partial^2(c_1 K)}{\partial t^2} - \frac{1}{D_1} \frac{\partial(Kc_1)}{\partial t_1} \frac{\partial D_1}{\partial t} \right] = \frac{\Delta c_2}{\tau_2}. \tag{4}$$

$$c_1 = \frac{c_{01}}{f} + \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \left(c_0 - \frac{c_{01}}{f(\theta)} \right) \left[1 - \sum_{k=1}^{\infty} A_k(r) \exp \left(-\frac{\alpha_k^2}{\tau_2} \int_0^t \frac{d\theta'}{f(\theta')} \right) \right] d\theta, \tag{5}$$

where $f(t) = 1 + K^* = 1 + \frac{\rho}{1-\rho} K$; $K^* = \rho K / (1-\rho)$. Substituting (2) into (1) and using the method of separation of variables, we obtain that

$$c = c_1 + c_2 = \sum_{k=1}^{\infty} A_k(r) \varphi_k(t) \left[1 + \frac{1}{\varphi_k(t)} \left(c_{01} \left(1 - \frac{1}{f(0)} \exp \left(- \int_0^t \frac{\alpha_k^2 + \frac{df}{f(\theta')}}{\tau_2} d\theta' \right) \right) \right) \right] +$$

$$+ \frac{\rho R_1^2}{8(1-\rho)} \int_0^t \frac{d}{d\theta} \left(\frac{1}{D_1(\theta)} \frac{d(K\varphi_K)}{d\theta} \right) \exp \left(- \int_0^t \frac{\alpha_k^2 + \frac{df}{f(\theta')}}{\tau_2} d\theta' \right) d\theta$$

where

$$\varphi_k(t) = \frac{1}{f} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \left[1 - \exp \left(- \frac{\alpha_k^2}{\tau_2} \int_0^t \frac{d\theta'}{f} \right) \right] d\theta.$$

From the condition

$$\left| \frac{1}{\varphi_k(t)} \left(c_{01} \left(1 - \frac{1}{f(0)} \exp \left(- \int_0^t \frac{\alpha_k^2 + \frac{df}{f(\theta')}}{\tau_2} d\theta' \right) \right) \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{\rho K_1^2}{8(1-\rho)} \int_0^t \frac{d}{d\theta} \left(\frac{1}{D_1(\theta)} \frac{d(K\varphi_K)}{d\theta} \right) \exp \left(- \int_0^t \frac{\alpha_k^2 + \frac{df}{f(\theta')}}{\tau_2} d\theta' \right) \right| \ll 1 \tag{6}$$

and the limits of applicability of (5) are determined.

As follows from (5), the effective relaxation time, determined from the condition, $\frac{1}{\tau_2} \int_0^t \frac{d\theta}{f} = 1$ decreases with increasing temperature. This means a simultaneous increase in the effective mass transfer rate. But increasing temperature also increases the rate of diffusion in the fiber. Since the change in the latter is faster than the change in the rate of mass transfer in the filament, then from (5) the lower limit of temperature values is determined, starting from which the process is already limited by mass transfer in the filament, i.e. equation (5) is valid. But then (6), obviously, goes into [3, (9)], and the value of the parameter K in [3, (9)] is determined by the initial temperature T_0 .

To determine the final temperature, we rewrite (1) in the form

$$\frac{\partial(1+K^*)c_2}{\partial t} - \frac{R_1^2}{8} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{D_1(t)} \frac{\partial}{\partial t} (K^* c_1) \right) = D\Delta c_2.$$

At sufficiently long times, when the concentration difference across the cross section of the filament is already insignificant, it is obvious that

$$\frac{\partial(1+K^*)c_2}{\partial t} \sim \frac{R_1^2}{8} \frac{\partial}{\partial t} \frac{1}{D_1(t)} \frac{\partial}{\partial t} (K^* c_1),$$

that's why

$$(1 + K^*)c_2 \approx \frac{R_1^2}{8} \frac{1}{D_1(t)} \frac{\partial}{\partial t} (K^* c_1),$$

so

$$c_2 \sim \frac{R_1^2}{8(1 + K^*)} \frac{1}{D_1(t)} \frac{\partial (K^* c_1)}{\partial t}. \tag{7}$$

If $K^* = \text{const}$ and $D_1(t) = \text{const}$, then (7) coincides with [3, (7)]. If we go to a dimensionless variable in (7), $t_2 = \frac{1}{\tau_2} \int_0^t \frac{d\theta}{f}$, then it will be rewritten as

$$c_2 \sim \frac{R_1^2}{8(1 + K^*)\tau_2 D_1} \frac{\partial (K^* c_1)}{\partial t_2}. \tag{8}$$

But by order of magnitude, $\partial (K^* c_1) / \partial t_2 \sim K^* c_1$, therefore

$$\frac{c_2}{c_1} \sim \frac{R_1^2 K^*}{8(1 + K^*)^2 \tau_2 D_1}, \tag{9}$$

meaning that (9) near equilibrium coincides with [3, (7)].

Multiplying (5) by ρK and integrating over the volume of the thread, we obtain an expression for the mass adsorbed by the fibers

$$M = \frac{\rho K V_2}{f} \left[c_{01} + 4 \int_0^{t_2} (c_0 f(\theta_2) - c_{01}) \sum_k \exp(-\alpha_k^2 (t_2 - \theta_2)) d\theta_2 \right]. \tag{10}$$

If the initial condition is $c|_{t=0} = c_0$, and the inclusions are free of adsorbate, then the solution to equation (3) looks like this:

$$c_1 = \frac{c_0}{f} \left[1 + \int_0^{t_2} (f(\theta_2) - 1) \sum_k A_k(r) \alpha_k^2 \exp(-\alpha_k^2 (t_2 - \theta_2)) \right]. \tag{11}$$

To calculate using equation (10), a program was compiled and calculations were carried out at various temperatures T_c and heat transfer coefficient $\alpha = 10.0$ W/K. The calculation procedure contains three stages: first, the integral is calculated, $t_2 = \frac{1}{\tau_2} \int_0^t \frac{d\theta}{f}$, after which the function $f(\theta)$ is constructed, and, finally, the integral is calculated on the right side of (7). M falls with increase of T_c as observed in experiments. In fact, this is inherent in the functional dependence of K .

Let us now consider the second limiting case, when the process is determined by the rate of mass transfer in the fiber. The equation describing this approximation could be formally obtained from [2, (19)] using the asymptotics of the function $\psi(t_1)$ at small values of time t . This is a direct method, however, associated with great mathematical difficulties. The considerations outlined below allow us to significantly simplify the task.

Since the process is limited by the rate of diffusion in the fiber, then, to a first approximation, the concentration in the space between the fibers is equal to c_0 and, thus, the latter are in equivalent conditions. A small difference in concentration, arising due to the finite time of diffusion in the thread and allowing, therefore, to estimate the first approximation, can be obtained from [2, (19)], replacing c in the integral term with c_0 . Obviously, this replacement is all the more justified

the lower the rate of diffusion in the fiber compared to the rate of mass transfer in the space between the fibers.

Then [2, (19)] will be rewritten as

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + c_0 \psi_1(t) &= D \Delta c \\ \psi_1(t) &= \frac{4\rho}{(1-\rho)R_1^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t K(\theta) D_1(\theta) \sum_k \exp\left(-\frac{\alpha_k^2}{R_1^2} \int_0^t D_1(\theta') d\theta'\right) d\theta. \end{aligned} \tag{12}$$

At $c|_{t=0} = c_{01}$ the solution has the form

$$\begin{aligned} c &= c_0 - (c_0 - c_{01}) \sum_{k=1}^{\infty} A_k(r) \exp\left(-\frac{\alpha_k^2 t}{\tau_2}\right) - \\ &- \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \varphi^*(\theta) \sum_{k=1}^{\infty} A_k(r) \exp\left(-\frac{\alpha_k^2 (t-\theta)}{\tau_2}\right) d\theta, \end{aligned} \tag{13}$$

so the limits of applicability of the first approximation are determined by the condition $(c_0 - c_{01}) \sum_{k=1}^{\infty} A_k(r) \exp\left(-\frac{\alpha_k^2 t}{\tau_2}\right)$ if we neglect the term for times $t \sim \tau_2$

$$\left| \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \varphi^*(\theta) \sum_{k=1}^{\infty} A_k(r) \exp\left(-\frac{\alpha_k^2 (t-\theta)}{\tau_2}\right) d\theta \right| \ll 1 \tag{14}$$

Similar to the previous case, from here we can determine the limiting temperature value, below which the process is still limited by inclusion diffusion. For times $t \sim \tau_2$ (14) is transformed to the form

$$\frac{\rho \left(1 - \left(\frac{r}{R_2}\right)^2\right) \tau_2 D_1(t_1)}{(1-\rho)R_1^2} \frac{\partial}{\partial t_1} \int_0^{t_1} K(\theta_1) \sum_k \exp(-\alpha_k^2 (t_1 - \theta_1)) d\theta_1. \tag{15}$$

Integration over volume as a first approximation leads to the following expression for the mass absorbed by the entire system

$$M_2 = \frac{M - (1-\rho)c_0V}{c_0V} = 4\rho \int_0^t K(\theta_1) \sum_k \exp(-\alpha_k^2 (t_1 - \theta_1)) d\theta_1. \tag{16}$$

In fact, the right side of (16) determines the kinetics of adsorption by all fibers. A characteristic feature of (16) is a decrease of $M_2(t)$ with the increase of T_c , which is in qualitative agreement with experimental data.

Conclusions

The method, proposed in this articles, allows for easier solving of the modeling equation that describes the process of the kinetics of non-isothermal adsorption in case of the aerosol dyeing of fabrics, calculating the process parameters, such as the mass of the dyeing agent.

Bibliography

1. Sorption by Solids with bidisperse pore structures / E. Ruchenstein, A.S. Vaidynathan, G.R. Youngquist. *Journal of Chemical Engineering Science*. 1971. Vol. 26. № 9. P. 1305–1318.

2. Фуртат І.Е., Фуртат Ю.О. Моделювання дифузійного переносу барвника у волокнистому текстильному матеріалі. *Наука і техніка сьогодні. Серія «Техніка»*. 2023. № 6(20). С. 102–113.
3. Фуртат І.Е., Фуртат Ю.О. Моделювання ізотермічної адсорбції барвника у волокнистому текстильному матеріалі. *Наука і техніка сьогодні. Серія «Техніка»*. 2023. № 8(22). С. 296–309.

References

1. Ruchenstein, E., Vaidynathan, A.S., & Youngquist, G.R. (1971). Sorption by Solids with bidisperse pore structures. *Journal of Chemical Engineering Science*, vol. 26 (№ 9), 1305–1318 [in Ukrainian].
2. Furtat, I.E., & Furtat, Yu.O. (2023). Modeliuvannia dyfuziinoho perenosu barvnyka u voloknystomu tekstylnomu materiali [Modeling of the Diffusion Transfer of the Dye in a Fibrous Textile Material]. *Nauka i tehnika siogodni – Science and Technics Today*, 6(20), 102–113 [in Ukrainian].
3. Furtat, I.E., & Furtat, Yu.O. (2023). Modeliuvannia izotermichnoi adsorbtsii barvnyka u voloknystomu tekstylnomu materiali [Modeling of Isothermal Adsorption of Dye in Fibrous Textile Material]. *Nauka i tehnika siogodni – Science and Technics Today*, 8(22), 296–309 [in Ukrainian].

Furtat Iryna Eduardivna – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Thermal and Alternative Energy of the Educational and Scientific Institute of Energy Saving and Energy Management of the National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". E-mail: i.e.furtat@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2197-8150.

Furtat Yurii Olehovych – PhD in Technical Sciences, Leading Researcher of the Department of Modeling of Energy Processes and Systems of the G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering. E-mail: saodhar@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0775-5460.

Фуртат Ірина Едуардівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: i.e.furtat@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2197-8150.

Фуртат Юрій Олегович – к.т.н., провідний науковий співробітник відділу моделювання енергетичних процесів і систем Інституту проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова Національної академії наук України. E-mail: saodhar@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0775-5460.