

FTAMP 64.29.15

А.М. Байтуреев¹ – основной автор, ©
Ж.А. Ертаева², А.Т. Оңлабекова³



¹МАНЭБ академигі, техн. ғылым. канд., профессор,

²Физика магистрі, директор, ³PhD, қауымдас. профессор м.а.

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0002-2752-4969> ³<https://orcid.org/0000-0003-4379-0586>



^{1,3}М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан



²«Білім» кәсіби гуманитарлық-техникалық колледжі» ЖШС,

Тараз, Қазақстан



³aika_ot@mail.ru

<https://doi.org/10.55956/UZWN8365>

МАҚТА ТАЛШЫҒЫН ТЕРМИЯЛЫҚ ӨНДЕУ ҮДЕРІСІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа. Мақалада мақта талшығын термиялық өңдеу процесінің физикалық моделі мен математикалық сипаттамасы қарастырылады. Негізгі назар жылу- және масса алмасу процесінің сыртқы есебіне ударылып, ылғалдың булануы негізінен талшық бетінде жүзеге асады деп есептеледі. Модель екі өлшемді дискретті координаталар жүйесінде: талшықтың ұзындығы мен қалыңдығы бойынша құрылған. Негізіне стационарлық ағын, ламинарлық шекаралық қабат және беткі булану үрдістерін ескеретін жылу және масса алмасу теңдеулері алынған. Әсіресе, буланудың салқындатқыш әсері – ішкі теріс жылу көзі ретінде көрінетін құбылыс ескеріліп көрсетілген. Ұсынылған модель термиялық өңдеу кезінде орын алатын жылу және масса алмасу кинетикасын, сондай-ақ шекаралық қабаттағы температура мен су буының концентрациясының өзгеруін сипаттауға мүмкіндік береді. Алынған теңдеулер мақта талшығын термиялық кептіру процесін талдау және оңтайландыру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Тірек сөздер: мақта талшығы, дифференциалдық теңдеу, жылу энергиясының теңдеуі, қозғалыс теңдеуі, ағынның тұтастық теңдеуі.



Байтуреев, А.М. Мақта талшығын термиялық өңдеу үдерісін математикалық модельдеу [Мәтін] / А.М. Байтуреев, Ж.А. Ертаева, А.Т. Оңлабекова // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2025. – №4(90). – Б.229-239. <https://doi.org/10.55956/UZWN8365>

Кіріспе. Қазіргі жағдайда Қазақстан ұлттық экономиканы тиімділігін арттыруға және әлемдік экономикаға ықпалдастыруға бағытталған ауқымды құрылымдық жаңғырту үдерісін жүзеге асыруда.

Мақта шикізатын бастапқы өңдеу саласындағы жоғары технологиялық өндірістердің теңгерімді дамуын қамтамасыз ету, сондай-ақ жеңіл өнеркәсіптің (иіру, тоқыма және тігін өндірістерін қоса алғанда) қуаттылығын арттыру мақсатында еліміздің әртүрлі өңірлерінде арнайы экономикалық аймақтар (АЭА) құрылуда. Бұл аймақтар Оңтүстік Қазақстандағы өнеркәсіптік өсімді ынталандырумен қатар, тоқыма өнеркәсібін жалпы дамытуда маңызды қозғаушы күш ретінде қарастырылады.

Жеңіл және тоқыма өнеркәсібінің дамуы өз кезегінде ауыл шаруашылығы мен ұлттық экономиканың сабақтас салаларының кеңеюіне қолайлы жағдай жасайды. Жаңа арнайы экономикалық аймақтарды ұйымдастыру жекелеген өңірлердің әлеуметтік-экономикалық дамуын жеделдетуге және жалпы ұлттық экономиканың өсуін қамтамасыз етуге ықпал ететін стратегиялық тетік болып табылады [1,2].

Ауыл шаруашылығы өнімдеріне сұраныстың артуы жағдайында агроөнеркәсіптік кәсіпорындар мен фермерлік шаруашылықтар алдында тек өндіріс көлемін ұлғайту ғана емес, сонымен қатар жиналған өнімді сақтау мәселесі де өткір тұр. Бұл міндетті шешудің негізгі факторларының бірі – ауыл шаруашылығы шикізатын энергия үнемдейтін термиялық өңдеу технологияларын енгізу болып табылады, олар өнімнің сапасын төмендетпей ұзақ мерзімді сақталуын қамтамасыз етеді.

Зерттеу шарттары мен әдістері. Зерттеу мақта талшығын термиялық өңдеу барысында жүретін сыртқы жылу және масса алмасу процестерін математикалық тұрғыда сипаттауға бағытталған. Негізгі назар талшық бетінде ылғалдың қаныққан бу күйінде булануы жүзеге асатын тұрақты жылдамдықтағы кептіру кезеңіне аударылды.

Зерттеудің негізін жылу және масса алмасудың негізгі процестері талшықтың беткі қабатында жүзеге асады деген болжамға негізделген физикалық модель құрайды. Екіөлшемді стационарлық есеп дискретті координаталық жүйеде қарастырылады: «х» осі талшықтың ұзындығы бойымен бағытталған, ал «у» осі оның қалыңдығын сипаттайды.

Математикалық сипаттама жылуөткізгіштік, қозғалыс мөлшері және үздіксіздік теңдеулерін қамтиды. Модельдің ерекшелігі – ылғалдың булануын теріс ішкі жылу көзі ретінде есепке алуында, ол (rm) сипатымен өрнектеледі, мұнда « g » – буланудың меншікті жылуы, ал « m » – булананатын ылғалдың жылдамдығы.

Сандық есептеулерді жүргізу үшін төртінші ретті Рунге-Кутта әдісі қолданылды. Нөлдік нүкте маңындағы функцияларды жуықтау үшін Тейлор және Маклорен қатарлары пайдаланылды [1]. Алынған теңдеулер жүйесі негізінде температура мен жылдамдық өрістеріне модельдеу жүргізіліп, шекаралық қабаттағы параметрлердің өзгеру сипатын көрсететін графиктік тәуелділіктер тұрғызылды.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Ауыл шаруашылығы шикізатын, әсіресе мақта талшығын термиялық өңдеудің негізгі кезеңдерінің бірі – кептіру процесі болып табылады. Бұл кезең жоғары энергия сыйымдылығымен және технологиялық маңыздылығымен ерекшеленеді әрі дайын өнімнің сапасын айқындайды. Мақтаны бастапқы өңдеу кәсіпорындарында пайдалану сенімділігі жоғары және қызмет көрсетуі жеңіл барабанды кептіргіш қондырғылар кеңінен қолданылады.

Аталған жұмыста жылу және масса алмасу теориясының негізгі қағидаларына сүйене отырып әзірленген математикалық сипаттамамен бірге мақта талшығын термиялық өңдеу процесінің физикалық моделі ұсынылған [1-3].

Бұл модельде талшық пен жылу тасымалдағыш арасындағы негізгі өзара әрекет талшықтың сыртқы бетінде жүзеге асады деп қабылданған. Осыған байланысты есеп сыртқы есеп ретінде қойылып, дискретті координаталық жүйеде қарастырылды: «х» осі талшықтың бойлық бағытымен, ал «у» осі оның қалыңдығы бойымен бағытталған.

Өзірленген физикалық тұжырымдамаға сәйкес математикалық модель өңделетін материалдағы жылу және масса алмасу процестерін сипаттайтын классикалық дифференциалдық теңдеулер жүйесіне негізделген.

Ол келесі теңдеулерден тұрады [4-6]:

жылу энергиясының теңдеуі:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \omega \operatorname{grad} t = a \nabla^2 t; \quad (1)$$

козғалыс мөлшерінің теңдеуі:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + (\bar{\omega} \operatorname{grad}) \bar{\omega} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \nabla^2 \bar{\omega}; \quad (2)$$

ағынның үздіксіздік теңдеуі:

$$\operatorname{div} \bar{\omega} = 0. \quad (3)$$

Ылғалды материалдарды термиялық өңдеу материал құрылымының ішінде жүретін ішкі энергия және ылғал тасымалын, сондай-ақ олардың қоршаған ортамен сыртқы алмасуын қамтитын жылу және масса алмасу құбылыстарының күрделі жиынтығын құрайды. Мақта талшықтарын кептіру процесінде жылу мен ылғалдың сыртқы алмасу кезеңі, яғни буланудың тұрақты жылдамдық режиміне сәйкес келетін фаза, инженерлік тұрғыдан аса маңызды болып табылады. Бұл кезеңде талшық бетінен бөлінетін су буы қаныққан күйде болады, ал талшық пен қоршаған орта шекарасындағы температура қанығу температурасына жуықтайды.

Ламинарлы шекаралық қабат жағдайында буланумен қатар жүретін ағынды сипаттайтын екіөлшемді стационарлық есеп үшін температура-жылдамдық өрісі фазалық ауысу әсерін ескеретін қосымша мүшесі бар теңдеулер жүйесімен анықталады. Атап айтқанда, (rm) өрнегі энергия балансына буланудың жасырын жылуы арқылы үлес қосады: мұнда фазалық ауысудың меншікті жасырын жылуы r мен булану массалық ағыны m (уақыт бірлігінде кеуекті ортаның көлем бірлігінен буланатын ылғал массасы ретінде анықталады) көбейтіндісі булану бетінде пайда болатын салқындау әсерінен туындайтын теріс ішкі жылу көзін сипаттайды.

$$\left. \begin{aligned} \omega_x \frac{d\omega_x}{dx} + \omega_y \frac{d\omega_y}{dy} &= \nu \frac{d^2 \omega_x}{d^2 y} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} \\ \frac{d\omega_x}{dx} + \frac{d\omega_y}{dy} &= 0 \\ p c_z g \omega_x \frac{dt_x}{dx} + \omega_y \frac{d\omega_y}{dy} &= \lambda_z \frac{d^2 t}{d^2 y} - rm \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(1)–(4) теңдеулерінде келесі белгілер қабылданған: ρ – материалдың тығыздығы, кг/м³; g – ауырлық күшінің үдеуі, м/с²; p – меншікті қысым, Н/м²; t – температура, °C; ω – сызықтық жылдамдық, м/с; ν – кинематикалық

тұтқырлық, $\text{м}^2/\text{с}$; ∇^2 – Лаплас операторы; $c_2 - p = \text{const}$ жағдайындағы меншікті жылу сыйымдылығы, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$; λ_2 – жылуөткізгіштік коэффициенті, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$; α – жылу беру коэффициенті, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; r – буланудың меншікті жылуы, $\text{Дж}/\text{кг}$; d – геометриялық өлшем, м ; m – буланатын ылғалдың көлемдік жылдамдығы, $\text{м}^3/\text{с}$.

Материал бетінен ылғалды шығару жылдамдығы (басқаша айтқанда, кептіру қарқындылығы) булану шекарасына бағытталған жылу ағынын ескеретін жылуөткізгіштік теңдеуінің негізінде анықталады:

$$m = \frac{\lambda_2}{rd^2} \cdot (t_2 - t_0) \quad (5)$$

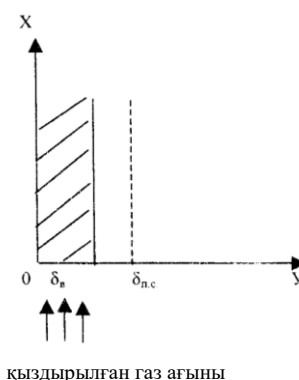
(5) өрнегіне сүйене отырып, мақта талшығының бетінен буланатын ылғал массасы шекаралық қабат шегіндегі кептіру ортасының температура градиентімен анықталады деген болжам жасауға болады. Басқаша айтқанда, булану қарқындылығы талшық бетіне бағытталған жылу ағынының шамасына тікелей тәуелді, яғни:

$$m = \frac{\lambda_2}{rd^2} \cdot \frac{dt}{dy} \quad (6)$$

Дифференциалдық теңдеулер жүйесіне (4) тиісті бастапқы және шекаралық шарттарды қолдану, сондай-ақ осы жүйені аналитикалық шешу нәтижесінде келесі функционалдық тәуелділікті алуға болады:

$$4[f'(\eta)]^2 - 3f(\eta)f''(\eta) = 2f''(\eta) + 4 \quad (7)$$

Мақта талшығын термиялық кептіру процесінің графикалық интерпретациясы 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1. Мақта талшығын термиялық өңдеу процесінің сұлбалық бейнесі

Одан әрі аналитикалық зерттеу жүргізу үшін $f(\eta)$ функциясын $\eta=0$ нүктесінің маңында Тейлор қатарына жіктеп қарастырайық:

$$f(\eta) = f(0) + \eta \cdot f'(0) + \frac{\eta^2 f''(0)}{2!} + \dots + \quad (8)$$

$$f(\eta) = \frac{b\eta^2}{2}. \quad (9)$$

(9) теңдеуде келтірілген «b» белгісіз коэффициентін анықтау үшін (7) теңдеуінің сандық шешімі қолданылады. Осы мақсатта бастапқы (7) теңдеуі оған эквивалентті дифференциалдық теңдеулер жүйесіне түрлендіріледі, бұл шекаралық есептерді шешудің стандартты сандық әдістерін қолдануға мүмкіндік береді:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dt}{d\eta} &= S; \\ \frac{dS}{d\eta} &= Z; \\ \frac{dZ}{d\eta} &= 2S^2 - \frac{3}{2}fZ - 2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

(10) теңдеулер жүйесін сандық интегралдау үшін шешімнің қажетті дәлдігін қамтамасыз ететін төртінші ретті Рунге-Кутта әдісі қолданылды. Жүргізілген есептеулер нәтижесінде ылғал тасымалының векторлық жылдамдық компоненттері – ω_x және ω_y , анықталды. Алынған мәндер кейіннен жылуөткізгіштік процесін сипаттайтын (4) теңдеулер жүйесінің үшінші теңдеуіне қойылады:

$$\omega_x = (\nu \cdot cx^3)^{1/2} f'(\eta) \left(\frac{cx}{\nu} \right)^{1/2} = cx^2 f'(\eta); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \omega_y &= -\frac{3}{2}(\nu c)^{1/2} x^{1/2} f'(\eta)^{1/2} (\nu cx^3)^{1/2} f'(\eta)^{1/2} \frac{\eta}{x} = \\ &= -\frac{1}{2}(\nu cx)^{1/2} [3f(\eta) + \eta f'(\eta)]; \end{aligned} \quad (12)$$

$$pc_p g \left[\omega_x \frac{dt}{dx} + \omega_y \frac{dt}{dy} \right] = \lambda_z \frac{d^2 t}{dy^2} - rm. \quad (13)$$

Бұл тәсіл мақта талшығын термиялық өңдеу моделінде жылуалмасу мен массаалмасу процестерінің өзара байланысын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

«с» белгісіз коэффициенті [4-10] дереккөзіне сәйкес келесі өрнектен анықталады:

$$c = \frac{u_z}{d^{1/3}}. \quad (14)$$

(6) теңдеуді (13) теңдеуге келтіру арқылы келесі өрнек алынады:

$$pc_p g \left[\omega_x \frac{dt}{dx} + \omega_y \frac{dt}{dy} \right] = \lambda_z \frac{d^2 t}{dy^2} - \left[\frac{\lambda_z}{d^2} \cdot \frac{dt}{dy} \right]. \quad (15)$$

(15) теңдеуді талдау барысында “х” координатасы бойымен газ температурасының градиенті елеусіз аз деп есептеледі. Осыған байланысты (16) теңдеу ықшамдалып, келесі түрге келтіріледі:

$$\lambda_z \frac{d^2 t}{dy^2} - \left(\frac{\lambda_z}{d^2} + \rho c_p g \omega_y \right) \cdot \frac{dt}{dy} = 0. \quad (16)$$

Қабылданған белгілеуді ескере отырып:

$$\frac{dt}{dy} = Z. \quad (17)$$

(16) теңдеу бірінші ретті қарапайым дифференциалдық теңдеуге айналады:

$$\lambda_z \frac{d^2 t}{dy^2} - \left[\frac{\lambda_z}{d^2} + \rho c_p g \omega_y \right] \cdot Z = 0. \quad (18)$$

(13) теңдеуден:

$$\begin{aligned} \omega_y &= -\frac{1}{2} (v c x)^{1/2} \left[\frac{3b}{2} \left(\frac{c x}{v} \right)^{1/2} y + \left(\frac{c x}{v} \right)^{1/2} y b \left(\frac{c x}{v} \right)^{1/2} y \right] = \\ &= -\frac{1}{2} b c x \left[\frac{3}{2} y + \left(\frac{c x}{v} \right)^{1/2} \cdot y^2 \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

(19) өрнекті (18) теңдеуге қойып, айнымалыларды бөліп алғаннан кейін келесі өрнекті аламыз:

$$\lambda_z \frac{dz}{Z} = - \left\{ \frac{\lambda_z}{d^2} \cdot \frac{1}{2} \rho c_p g b c x \left[\frac{3}{2} y + \left(\frac{c x}{v} \right)^{1/2} y^2 \right] \right\} d_y. \quad (20)$$

(20) теңдеуді интегралдау нәтижесінде келесі өрнек алынады:

$$\ln Z = a_1 y - a_2 y^2 - a_3 y^3 + \ln F_1, \quad (21)$$

мұндағы: F_1 – интегралдау тұрақтысы.

$$a_1 = \frac{\lambda_z}{d^2}; \quad a_2 = \frac{3}{8 \lambda_z} \rho c_p g b c x; \quad a_3 = \frac{1}{6 \lambda_z} \rho c_p g b c x \left(\frac{c x}{v} \right)^{1/2}.$$

бұл жерде:

$$\frac{Z}{F_1} = \exp(a_1 y - a_2 y^2 - a_3 y^3). \quad (22)$$

(22) теңдеуді (17) теңдеуге қойып, екінші рет интегралдау жүргізсек:

$$t = \int F_1 \exp(a_1 y - a_2 y^2 - a_3 y^3) dy + G, \quad (23)$$

мұндағы: G – интегралдау тұрақтысы.

Аталған интегралды есептеу үшін интеграл астындағы функция Маклорен қатарына жіктеледі.

Осы мақсатта келесідей белгілейміз:

$$a_1 y - a_2 y^2 - a_3 y^3 = q \quad (24)$$

Осыдан:

$$e^q = 1 + q + \frac{q^2}{2!} + \frac{q^3}{3!} + \dots + \frac{q^n}{n!} \quad (25)$$

y айнымалысының кіші мәндері үшін қатарды бірінші ретті мүшелермен шектеуге болады. Шынында да,

$$\text{егер } q = 0,1, \text{ онда } \exp(0,1) = 1,1 \quad (26)$$

Жуық өрнекпен алмастыру:

$$e^q = 1 + q = 1 + 0,1 = 1,1 \quad (27)$$

келесі қателікті тудырады:

$$100 \cdot \frac{1,11 - 1,1}{1,1} = 0,9\%. \quad (28)$$

Осылайша, (24) теңдеуді ескере отырып, (25) теңдеуден келесі өрнекті аламыз:

$$\exp(q) = 1 + a_1 y - a_2 y^2 - a_3 y^3. \quad (29)$$

(29) теңдеуді (23) теңдеуге қойсақ, келесі өрнек алынады:

$$t = F \int (1 + a_1 y + a_2 y^2 - a_3 y^3) dy + G.$$

Интегралдау нәтижесінде:

$$t = F_1 \left[y + \frac{(a_1 y^2)}{2} - \frac{(a_2 y^3)}{3} - \frac{(a_3 y^4)}{4} \right] + G. \quad (30)$$

Белгісіз интегралдау коэффициенттері F_1 және G шекаралық шарттардан анықталады:

$$\text{a) } y = 0 \quad t = t_n = t_{\text{насыщ}}, \quad (31)$$

бірінші шекаралық шарттан $G=t_n$ екені шығады;

$$б) \lambda_z (dt/dy)|_{y=\delta} = \alpha \cdot (t_z - t) \quad (32)$$

Екінші шекаралық шарттан:

$$\begin{aligned} \lambda_z F_1(1+a_1\delta-a_2\delta^2-a_3\delta^3) = \\ = \alpha \left[t_z - F_1 \left(\delta + \frac{(a_1\delta^2)}{2} - \frac{(a_2\delta^3)}{3} - \frac{(a_3\delta^3)}{4} \right) - t_s \right]. \end{aligned} \quad (33)$$

келесі нәтиже алынады:

$$F = \frac{\alpha(t_z - t_s)}{\lambda_z(1+a_1\delta-a_2\delta^2-a_3\delta^3) + \alpha \left[\delta + \left(\frac{a_1}{2} \right) \delta^2 - \left(\frac{a_2}{3} \right) \delta^3 - \left(\frac{a_3}{4} \right) \delta^4 \right]}. \quad (34)$$

Шекаралық қабаттың қалыңдығы (19) және (12) өрнектерінің негізінде анықталады.

(19) теңдеуден:

$$f(\eta) = b\eta = b(cx/\nu)^{1/2} y, \quad (35)$$

ал (12) теңдеуден және жылдамдық өрістеріне арналған шекаралық шарттарды қолдана отырып, мұнда:

а) $\omega = \omega_y = 0$ болады, егер $y = 0$;

б) $\omega_x \rightarrow u_z$ болады егер $y \rightarrow \delta$,

мұндағы: u_z – будың жылдамдығы, δ – шекаралық қабаттың қалыңдығы.

Осыны есепке ала келесі өрнек алынады:

$$\omega_x = u_z = cx^2 f'(\eta) \quad (36)$$

Осыдан:

$$f'(\eta) = u_z / cx^2 \quad (37)$$

(35) және (37) өрнектерін теңестіре отырып, келесі теңдеуді аламыз:

$$u_z / (cx^2) = b(cx/\nu)^{1/2} \cdot y|_{y=\delta} \quad (38)$$

Қажетті түрлендірулерді орындағаннан кейін, келесі нәтиже шығады:

$$\delta = \frac{\nu^{1/2} a^{1/2}}{b(u_r^{1/2} \cdot x^2 \cdot x^{1/2})} = \left(\frac{1}{bx^2} \right) \left(\frac{\nu d}{u^r \cdot x} \right)^{1/2} \quad (39)$$

Теңдеулер жүйесін сандық түрде есептеу барысында мақта талшығы бетінің температурасының координата бойынша өзгеру тәуелділіктері анықталып, ылғалдың булану жылдамдығының таралуы тұрғызылды. Термиялық өңдеудің бастапқы кезеңінде булану процесі тұрақты жылдамдықпен жүретіні, ал талшық бетінің температурасы бу қанығу температурасына өте жақын болатыны анықталды.

Шекаралық қабаттағы температураның таралуын сипаттайтын аналитикалық теңдеулер алынып, кептіру процесінің тиімділігіне әсер ететін негізгі параметрлер – кептіру ортасының температура градиенті мен шекаралық қабаттың қалыңдығы екендігі айқындалды. Жүргізілген талдау булану процесінің талшық бетінде айтарлықтай салқындау әсерін тудыратынын көрсетті, бұл кептіру жабдықтарын жобалау және оңтайландыру кезінде міндетті түрде ескерілуі тиіс.

Қорытынды. Аталған жұмыста мақта талшығын термиялық өңдеу процесін сипаттайтын, кептірудің тұрақты жылдамдық кезеңіндегі сыртқы жылу және масса алмасуды қамтитын физика-математикалық модель ұсынылды. Алынған аналитикалық және сандық нәтижелер шекаралық қабат шегіндегі температураны және булану қарқындылығын жоғары дәлдікпен бағалауға мүмкіндік береді, бұл кептіру процесінің энергия тиімділігін арттыру мен дайын өнім сапасын жақсарту үшін аса маңызды.

Термиялық кептіру кезіндегі сыртқы жылу және масса алмасу кинетикасы шекаралық қабат бойынша ылғал буы концентрациясының өзгеруімен, сондай-ақ ылғалды материал бетіне жақын аймақтағы кептіру агентінің температурасының өзгеруімен анықталатыны көрсетілді.

Әзірленген модель текстиль өнеркәсібі кәсіпорындарындағы кептіру қондырғыларының жұмыс режимдерін оңтайландыру үшін пайдаланылуы мүмкін. Алдағы зерттеулерде модельді ішкі жылу және ылғал тасымалы процестерін ескере отырып кеңейту, сондай-ақ алынған нәтижелерді эксперименттік тұрғыда тексеру жоспарлануда.

Осылайша, қойылған есепті тиісті тұжырымдамада шешу нәтижесінде мақта талшығын термиялық өңдеу процесін бағалауға мүмкіндік беретін әртүрлі теңдеулер алынды.

Әдебиеттер тізімі

1. Байтуреев, А.М. Интенсификация процесса сушки хлопка-сырца [Текст]: монография / А.М. Байтуреев. – Тараз: Тараз университеті, 2017. – 168 с.
2. Мирошниченко, Г.И. Основы проектирования машин первичной обработки хлопка [Текст] / Г.И. Мирошниченко. – М.: Машиностроение, 1972. – 487 с.
3. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М., 1973. – 904 с.
4. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии [Текст]. Ч. 1 / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 2002. – 400 с.
5. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии [Текст]. Ч. 2 / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 2002. – 368 с.
6. Ульдяков, А.И. Сушка хлопка-сырца [Текст] / А.И. Ульдяков. – М., 1975. – 142 с.
7. Хранение и переработка сельскохозяйственной продукции [Текст]: научный журнал. – Алматы, 2002. – № 3. – С. 11-16.
8. Калдыбаев, Т.Д. Математические модели подготовки хлопка-сырца к сушке [Текст] / Т.Д. Калдыбаев // Хлопковая промышленность. – Ташкент, 1989. – № 3.
9. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса [Текст] / А.В. Лыков. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 684 с.
10. Байтуреев, А.М. Математическое моделирование и решение оптимизационной задачи при определении температуры сушильного агента на выходе из

сушильного барабана [Текст] / А.М. Байтуреев // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2009. – № 3. – С. 70-73.

Материал редакцияға 17.06.25 түсті, 26.12.25 қабылданды.

А.М. Байтуреев¹, Ж.А. Ертаева², А.Т. Онлабекова¹

¹Таразский университет им. М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан

²ТОО Профессиональный гуманитарно-технический колледж «Білім»,
Тараз, Казахстан

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ ХЛОПКОВОГО ВОЛОКНА

Аннотация. В статье рассматривается физическая модель и математическое описание процесса термообработки хлопкового волокна. Основное внимание уделено внешней задаче тепломассообмена, предполагая, что испарение влаги происходит преимущественно с поверхности волокна. Модель построена в двумерной дискретной системе координат: вдоль длины и толщины волокна. В основу положены уравнения тепло- и массопереноса, учитывающие стационарное течение, ламинарный пограничный слой и испарение с поверхности. Особое внимание уделено учету охлаждающего эффекта испарения, проявляющегося в виде внутреннего отрицательного источника тепла. Разработанная модель позволяет описывать кинетику тепломассообмена при термообработке, включая изменения температуры и концентрации водяных паров в пограничном слое. Полученные уравнения могут быть использованы для анализа и оптимизации процесса термической сушки хлопкового волокна.

Ключевые слова: хлопковое волокно, дифференциальное уравнение, уравнение тепловой энергии, уравнение движения, уравнение сплошности потока.

А.М. Baitureev¹, Zh.A. Yertaeva², A.T. Onlabekova¹

¹M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan

²Professional Humanitarian and Technical College "Bilim", Taraz, Kazakhstan

MATHEMATICAL MODELING OF THE THERMAL TREATMENT PROCESS OF COTTON FIBER

Abstract. The article addresses the physical model and mathematical description of the thermal treatment process of cotton fiber. The main focus is on the external heat and mass transfer problem, assuming that moisture evaporation occurs predominantly from the fiber surface. The model is constructed in a two-dimensional discrete coordinate system along the fiber's length and thickness. The foundation of the model comprises heat and mass transfer equations that consider steady-state flow, a laminar boundary layer, and surface evaporation. Special attention is given to accounting for the cooling effect of evaporation, manifested as an internal negative heat source. The developed model enables the description of heat and mass transfer kinetics during thermal treatment, including changes in temperature and water vapor concentration within the boundary layer. The resulting equations can be applied for the analysis and optimization of the cotton fiber thermal drying process.

Keywords: cotton fiber, differential equation, heat energy equation, momentum equation, continuity equation.

References

1. Baitureev, A.M. Intensifikatsiya protsessa sushki khlopka-syrtsa [Intensification of the drying process of raw cotton]: monografiya. – Taraz: Taraz University, 2017. – 168 p. [in Russian].
2. Miroshnichenko, G.I. Osnovy proektirovaniya mashin pervichnoi obrabotki khlopka [Fundamentals of designing machines for primary cotton processing]. – Moscow: Mashinostroenie, 1972. – 487 p. [in Russian].
3. Loitsyanskii, L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid and gas mechanics]. – Moscow, 1973. – 904 p. [in Russian].
4. Khranenie i pererabotka sel'skokhozyaistvennoi produktsii [Storage and processing of agricultural products]. – Almaty, 2002. – No. 3. – P. 11-16. [in Russian].
5. Kaldybaev, T.D. Matematicheskie modeli podgotovki khlopka-syrtsa k sushke [Mathematical models of raw cotton preparation for drying] // Khlopkovaya promyshlennost' [Cotton Industry]. – Tashkent, 1989. – No. 3. [in Russian].
6. Dytnerskii, Yu.I. Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii. Chast' 1 [Processes and apparatuses of chemical technology. Part 1]. – Moscow: Khimiya, 2002. – 400 p. [in Russian].
7. Dytnerskii, Yu.I. Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii. Chast' 2 [Processes and apparatuses of chemical technology. Part 2]. – Moscow: Khimiya, 2002. – 368 p. [in Russian].
8. Ul'dyakov, A.I. Sushka khlopka-syrtsa [Drying of raw cotton]. – Moscow, 1975. – 142 p. [in Russian].
9. Lykov, A.V. Teoriya teplo- i massoperenosa [Theory of heat and mass transfer]. – Moscow–Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. [in Russian].
10. Baitureev, A.M. Matematicheskoe modelirovanie i reshenie optimizatsionnoi zadachi pri opredelenii temperatury sushil'nogo agenta na vykhode iz sushil'nogo barabana [Mathematical modeling and solution of an optimization problem in determining the drying agent temperature at the outlet of a drying drum] // Khimicheskaya tekhnologiya. Kontrol' i upravlenie [Chemical Technology. Control and Management]. – Tashkent, 2009. – No. 3. – P. 70-73. [in Russian].