

4. Mezhgosudarstvennyj Standart GOST 31902-2012 Izdelija konditerskie. Metody opredelenija massovoj doli zhira [Methods for determining the mass fraction of fat].

5. GOST R Standart 54686 Izdelija konditerskie. Metod opredelenija massovoj doli nasyshennyh zhirnyh kislot [A method for determining the mass fraction of saturated fatty acids].

6. GOST 31754- 2012 Masla rastitel'nye, zhiry zhiivotnye i produkty ih pererabotki. Metody opredelenija massovoj doli transizomerov zhirnyh kislot [Methods for determining the mass fraction of fatty acid transisomers].

7. L.P. Nilova, A.A. Vytovtov, S.M. Maljutenkova, I.Ju. Labojko. Problemy bezopasnosti hlebobulochnyh izdelij: transizomery zhirnyh kislot/Vestnik JuUrGU. «Pishhevye i biotekhnologii». 2017. T. 5, № 2. S. 78–86 [Safety problems of bakery products: transisomers of fatty acids].

8. Briggs M. A., Petersen K. S., Kris-Etherton P. M. Saturated fatty acids and cardiovascular disease: replacements for saturated fat to reduce cardiovascular risk // Healthcare. 2017. Vol. 5. № 2. <https://doi.org/10.3390/healthcare5020029>.

9. Sovremennye tendencii razvitiya proizvodstva zhirovyh produktov: nauka, tekhnologii, biznes [Modern trends in the development of fat products production: science, technology, business]. / A. P. Nechaev [i dr.]. M.: Avtorskaja kniga, 2016. 382 s.

10. Kondrat'ev N. B. Ocenka kachestva konditerskih izdelij. Povyshenie sohrannosti konditerskih izdelij. [Evaluation of the quality of

confectionery products. Improving the safety of confectionery products]. M.: Pero, 2015. 250 s.

11. Soldatova E. A., Misteneva S. Ju., Savenkova T. V. Uslovija i kriterii obespechenija hranimospobnosti konditerskih izdelij // [Conditions and criteria for ensuring the storage capacity of confectionery products]. Pishhevaja promyshlennost'. 2019. № 5. S. 82–85. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10078>.

12. Demchenko E. A. [i dr.] Tehnika i tekhnologija pishhevyh proizvodstv. [Equipment and technology of food production] 2021. T. 51. № 4 S. 674–689.

13. Devi, A. Physicochemical, rheological and functional properties of fats and oils in relation to cookie quality: a review / A. Devi, B.S. Khatkar // Journal of food science and technology. – 2016. – Vol. 53. – No. 10. – P. 3633–3641.

14. Pareyt, B. The role of wheat flour constituents, sugar, and fat in low moisture cereal based products: a review on sugar-snap cookies / V. Pareyt, J.A. Delcour // Critical reviews in food science and nutrition. – 2008. – Vol. 48. – No. 9. – P. 824–839.

15. Hwang, H.S. Oxidation of fish oil oleogels formed by natural waxes in comparison with bulk oil / H.S. Hwang, M. Phaner, J.K. Winkler-Moser, S.X. Liu // European Journal of Lipid Science and Technology. – 2018. – Vol. 120. – No. 5. – P. 1700378.

16. Kochetkova, A.A. Pishhevye oleogeli: svoystva i perspektivy ispol'zovaniya [Food oleogels: properties and prospects of use]. A.A. Kochetkova, V.A. Sarkisjan, V.M. Kodencova, Ju.V. Frolova [i dr.] // Pishhevaja promyshlennost'. – 2019. – № 8. – S. 30–35. 5. Puşcaş, A. Oleogels in Food: a review of C.

FTAXP 65.29.33

<https://doi.org/10.48184/2304-568X-2024-4-105-121>

КОЭКСТРУЗИЯ ПРОЦЕСІНДЕГІ КӨП ДӘНДІ ШИКІЗАТТЫҢ БАЛҚЫМА АҒЫНЫН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

А.Н. ОСТРИКОВ , А.А. ОСПАНОВ , В.Н. ВАСИЛЕНКО ,
А.К. ТИМУРБЕКОВА *, М.В. КОПЫЛОВ , А.Т. АЛМАГАНБЕТОВА 

(Воронеж мемлекеттік инженерлік технологиялар университеті,
Ресей Федерациясы, 394036, Воронеж, Революция д-лы, 19
Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, 050010, Алматы қ., Абай д-лы, 8)
Автор-корреспонденттің электрондық поштасы: timurbekova_aigul@mail.ru*

Коэкструзиялық процестің рационалды параметрлерін анықтау үшін экструдер арнасындағы көп дәнді қоспасының балқыма ағынының математикалық моделі жасалды. Математикалық модель қозғалыс теңдеуі мен энергияның сақталу теңдеуін және шекаралық шарттарды, сонымен қатар зерттелетін қоспаның балқыма ағынының реологиялық заңын қамтиды. Есептеулер нәтижесінде шнектің геометриялық параметрлері: экструдер арнасының тереңдігі мен ені, ағынның орташа жылдамдығы және жұмыс камерасының ұзындығы бойынша экструдаттың температурасы анықталды. Экструдаттың есептелген температурасын салыстыру $T_k = 136,2$ °C және оның тәжірибелік мәні $T_k = 135$ °C жоғары сәйкестікті көрсетеді. Экструдер арнасы арқылы қарастырылатын аймақта зерттелетін қоспа балқымасының тұтқыр сұйықтығының ағуының математикалық моделінің сандық шешімі

экструдаттық балқыманың жылдамдығы мен қысымының өзгеру сипатын белгілеуге мүмкіндік береді. Алынған тәуелділіктер қос шнекті экструдерді есептеу және жобалау үшін негіз болды, оның әрбір шнегі үш аймақтан тұрады: бірінші қысу аймағы, ол үш бөлімді қамтиды: тиеу, сығымдау және мөлшерлеу; екі бөлімнен тұратын декомпрессиялық-экстракциялық аймақ: декомпрессия және экстракция; және екі секцияны қамтитын екінші қысу аймағы: гомогендеу және айдау. Қос шнекті экструдерді қолдану әртүрлі көп компонентті құрамдағы экструдталған бұйымдарды өндіру үшін экструдердің технологиялық мүмкіндіктерін кеңейтеді; жылуден қамтамасыз етуді реттеу арқылы өңделетін өнімнің құрамдас бөліктерінің физикалық-химиялық өзгерістерінің қажетті тереңдігін қамтамасыз етеді.

Негізгі сөздер: коэкструзия, математикалық модель, ағын, балқыма, конструкция, үш аймақты экструдер.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА МУЛЬТИЗЛАКОВОГО СЫРЬЯ В ПРОЦЕССЕ КОЭКСТРУЗИИ

А.Н. ОСТРИКОВ, А.А. ОСПАНОВ, В.Н. ВАСИЛЕНКО, А.К. ТИМУРБЕКОВА,
М.В. КОПЫЛОВ, А.Т. АЛМАГАНБЕТОВА*

(Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Российская Федерация, 394036, Воронеж, пр. Революции, 19

Казахский национальный аграрный исследовательский университет,
Республика Казахстан, 050010, Алматы, пр. Абая, 8)

Электронная почта автора-корреспондента: timurbekova_aigul@mail.ru*

Разработана математическая модель течения расплава мультизлаковой смеси в канале экструдера для определения рациональных параметров процесса коэкструзии. Математическая модель включает уравнение движения и уравнение сохранения энергии и граничные условия, а также реологический закон течения расплава исследуемой смеси. В результате расчетов были определены геометрические параметры шнека: глубина и ширина канала экструдера, средняя скорость течения и температура экструдата по длине рабочей камеры. Сравнение расчетной температуры экструдата $T_k = 136,2$ °C и ее экспериментального значения $T_k = 135$ °C, показывает высокую адекватность. Численное решение математической модели течения вязкой жидкости расплава исследуемой смеси на рассматриваемом участке через канал экструдера позволяет установить характер изменения скорости и давления расплава экструдата. Полученные зависимости легли в основу расчета и проектирования конструкции двухшнекового экструдера, каждый из шнеков которого состоит из трех зон: первой зоны компрессии, которая включает три участка: загрузки, сжатия и дозирования; декомпрессионно-экстракционной зоны, которая включает два участка: декомпрессии и экстракции; и второй зоны компрессии, которая включает два участка: гомогенизации и нагнетания. Использование двухшнекового экструдера позволит расширить технологические возможности экструдера по производству экструдированных продуктов различного поликомпонентного состава; обеспечить необходимую глубину физико-химических превращений компонентов обрабатываемого продукта за счет регулирования теплоподвода.

Ключевые слова: коэкструзия, математическая модель, течение, расплав, проектирование, трехзонный экструдер.

MATHEMATICAL MODELING OF MULTI-CEREAL RAW MATERIAL MELT FLOW IN THE COEXTRUSION PROCESS

*A.N. OSTRIKOV, A.A. OSPANOV, V.N. VASILENKO, A.K. TIMURBEKOVA,
M.V. KOPYLOV, A.T. ALMAGANBETOVA*

(Voronezh State University of Engineering Technologies,
Russian Federation, 394036, Voronezh, Revolution Ave., 19

Kazakh National Agrarian Research University,
Kazakhstan, 050010, Almaty, Abay Ave., 8)

Corresponding author e-mail: timurbekova_aigul@mail.ru*

A mathematical model of the melt flow of a multi-cereal mixture in an extruder channel has been developed to determine the rational parameters of the coextrusion process. The mathematical model includes the equation of motion

and the equation of energy conservation and boundary conditions, as well as the rheological law of the melt flow of the mixture under study. As a result of the calculations, the geometric parameters of the screw, the depth and width of the extruder channel, the average flow rate and the temperature of the extrudate along the length of the working chamber were determined. A comparison of the calculated extrudate temperature $T_k = 136.2^\circ\text{C}$ and its experimental value $T_k = 135^\circ\text{C}$ shows high adequacy. The numerical solution of the mathematical model of the flow of a viscous liquid melt of the studied mixture in the considered section through the extruder channel allows us to establish the nature of the change in the speed and pressure of the extrudate melt. The obtained dependencies formed the basis for the calculation and design of the twin-screw extruder design, each screw of which consists of three zones: the first compression zone, which includes three sections: loading, compression and dosing; decompression-extraction zone, which includes two sections: decompression and extraction; and the second compression zone, which includes two sections: homogenization and injection. The use of a twin-screw extruder will expand the technological capabilities of the extruder for the production of extruded products of various polycomponent compositions; ensure the necessary depth of physicochemical transformations of the components of the processed product due to the regulation of heat supply.

Keywords: coextrusion, mathematical model, flow, melt, design, three-zone extruder.

Kіpіcne

Басты бағыттардың бірі белгілі функционалды компонентпен (ақуыз, май, дәрумен және т.б.) байытылған, тағамдық және биологиялық құндылығы жоғары коэкструдирленген өнімдерді дайындау болып табылады. Бұл сырты дәнді дақылдан тұратын, ішінде салмасы (май, ақуыз, жеміс-жидек немесе хош иістендіргіштер) бар өнімдер. Тұтынушылардың коэкструдирленген өнімдерге деген қызығушылығының артуы функционалды жаңа өнімдер ассортиментінің артуымен шартталған. Коэкструдирленген өнімдер (салмасы бар жастықшалар мен түтікшелер және т.б.) жүгері үлпектерінен кейін дайын таңғы ас түрлері арасында екінші орынға ие [1-5].

Коэкструзиялау полимер өңдеуде қолдану аясында ең заманауи технологиялардың бірі болып табылады. Түрлі биополимерлі материалдарды көпқабатты құрылымдарда біріктіру арқылы күрделі қолданысқа арналған, кең спектрлі қасиеттері бар өнімдерді алуға болады. Құрамында балласт заттары (50...70 %) (тағамдық талшықтар) жоғары түрлі экструдирленген өнімдерді шығару көптеген қант диабеті, атеросклероз және жүректің ишемиялық ауруы сияқты адам ауруларының алдын алуда маңызды рөл атқарады [6-9].

Экструдаттар технологиясында түрлі өсімдік тектес ақуызды қолдану құрамында ақуыздың жоғары дәрежесі бар, құрамында аминқышқылы теңдестірілген өнімдерді алуға мүмкіндік береді. Оған қоса берілген өнімдер түрлерінің ассортиментін кеңейтуге мүмкіндік береді. Алайда нарықтағы экструдирленген өнімдер аминқышқылдық құрамы бойынша теңдестірілмеген, себебі көбіне бір ғана компоненттен тұрады. Осыған орай тамақ өндірісіндегі негізгі бағыттардың бірі тағамдық

және биологиялық құндылығы жоғары, белгілі бір функционалды компонентпен байытылған өнімдерді шығару болып табылады [10-15].

Шнектің айналмалы кеңістігіндегі балқыманың ағыны бұрын зерттелген [3, 5, 8, 13]. Ең маңызды ақпараттың бірі матрицаның пішінді арнасында биополимер балқымасының қозғалыс сипаты болып табылады. Осы ақпараттың негізінде пішінді түйін конструкциясының оптималды жобалау мен өндірісі мүмкін болады. Жобалау кезінде матрица алды аймағындағы экструдердің тұрақты жұмысы мен қажетті кері қысым (5...7 МПа) болу үшін пішінді арнаның ұзындығы мен диаметр ара қатысын анықтау қажет.

А. Hammer және басқа да зерттеушілер [6] тік бұрышты арналар арқылы өтетін екі қуатты сұйықтықтың бірлескен экструзиялау үдерісін модельдеудің гибридіті амалын ұсынды. Олар ағын жағдаятын толығымен сипаттайтын төрт тәуелсіз ықпал ететін параметрді анықтады: бірінші сұйықтықтың қуат индексі (i), екінші сұйықтықтың қуат индексі (ii), бөлім шекарасының өлшемсіз орны (iii) және қысым градиенттерінің өлшемсіз қатынасы (iv). Түсірім әдісінің көмегімен кернеулердің сандық шешімдері алынды (i), фаза аралық жылдамдық (iii) және (iv) жеке көлем (i) қысымның өткізу қабілетінің ағын жыламығына тәуелділігі. Генетикалық бағдарлауға негізделген символикалық регрессияны қолдана отырып, осы төрт тәуелсіз параметрлердің алгебралық қатынасы алынды. Бұл математикалық модельдер коэкструдирлеуде сұйықтықтардың екі қабат ағындардың үдерістерін болжауға мүмкіндік береді.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Оствальд-де-Вил заңына бағынатын изотермиялық қысымдық ағыны, классикалық

теңдеулер негізінде цилиндрлік арнадағы реологиялық әртүрлі араласпайтын тұтқыр-пластикалық орталар коэкструдирлеу кезіндегі экструдердің пішінді арнасындағы осындай екі ортаның ағын моделі синтезделген. Экструдат көлемді шығыны мен салманың ара қатынасы талап етілген көлемде мөлшерлеу құбырының диаметрін таңдау әдістемесі ұсынылды. Түрлі реологиялық заңдылықтармен аралық

араласусыз ньютон емес екі орта берілген цилиндр пішіндес бастиегін қарастырамыз [3].

Көпқабатты коэкструдирлеуде матрицада созу және бүктеу механизмін түсіну үшін көпқабатты коэкструдирлеу кезінде матрица шетінің соңында көпқабатты біркелкі бөлу керек.

Математикалық модель. Кернеулердегі қозғалыс теңдеуін жазып алайық. Қозғалыс теңдеуі тікбұрыштық координаттарында:

$$\rho \left(\frac{\partial g_x}{\partial t} + g_x \frac{\partial g_x}{\partial x} + g_y \frac{\partial g_x}{\partial y} + g_z \frac{\partial g_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho g_x \quad , (1)$$

у ось проекциясы:

$$\rho \left(\frac{\partial g_y}{\partial t} + g_x \frac{\partial g_y}{\partial x} + g_y \frac{\partial g_y}{\partial y} + g_z \frac{\partial g_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho g_y \quad , (2)$$

Z ось проекциясы:

$$\rho \left(\frac{\partial g_z}{\partial t} + g_x \frac{\partial g_z}{\partial x} + g_y \frac{\partial g_z}{\partial y} + g_z \frac{\partial g_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho g_z \quad , (3)$$

Үздіксіздік теңдеуі:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho g_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho g_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho g_z) = 0 \quad . \quad (4)$$

Транспорт қасиеттері арқылы көрсетілген энергия сақтау теңдеуі:

$$\begin{aligned} \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \\ = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + 2\eta \left[\left(\frac{\partial g_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial g_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial g_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \\ + \eta \left[\left(\frac{\partial g_x}{\partial y} + \frac{\partial g_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial g_x}{\partial z} + \frac{\partial g_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial g_y}{\partial z} + \frac{\partial g_z}{\partial y} \right)^2 \right] \quad , \quad (5) \end{aligned}$$

Мұндағы x, y, z белгілері – декарт координаттары; t – уақыт; u_x, u_y, u_z – жылдамдық векторының компоненттері; p – қысым; T – температура; ρ – тығыздық; C_p – тұрақты көлемдегі жылу сыйымдылығы; λ – жылу өткізгіштігі; η – ньютон емес ортаның тұтқырлығы; $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$ – қалыпты кернеу; $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{xz} = \tau_{zx}$ – жанама кернеулер, g_x, g_y, g_z – ауырлық вектордың компоненттері.

Қабылданған жорамалдар. Ортаны әлсіз қысылады деп алатын болсақ $\rho \approx \text{const}$ ($C_p = C_p$ – тұрақты қысымдағы жылу сыйымдылығы) сұйықтық, өзгермелі қуаттың реологиялық заңы бойынша, әрі $g_x = g_y = g_z = 0$ интенсивті конвективті қозғалысқа байланысты. Себебі кернеу тензоры τ және деформация жылдамдық тензоры Δ қалыпты жағдайда желілік ретінде қабылданады

$$\tau = \eta \Delta \quad , \quad (6)$$

мұндағы η – ортаның тұтқырлығы, қуат заңы үшін η тең деп қарастырылады:

$$\eta = \eta^0 \left[\frac{1}{2} (\Delta \div \Delta) \right]^{(n-1)/2}, \quad (7)$$

мұндағы n – ағын индексі ($n \geq 0$).

Келтіру күйі үшін ығысу жылдамдығы γ_0 1 с-1 тең декарт координат жүйесінде.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (\Delta \div \Delta) = & 2 \left[\left(\frac{\partial g_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial g_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial g_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \\ & + \left(\frac{\partial g_x}{\partial y} + \frac{\partial g_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial g_y}{\partial z} + \frac{\partial g_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial g_x}{\partial z} + \frac{\partial g_z}{\partial x} \right)^2, \end{aligned} \quad (8)$$

Бұл кернеу тензорының компоненттерін τ деп жазуға толықтай мүмкіндік береді:

$$\tau_{xx} = -2\eta \frac{\partial g_x}{\partial x}, \quad \tau_{yy} = -2\eta \frac{\partial g_y}{\partial y}, \quad \tau_{zz} = -2\eta \frac{\partial g_z}{\partial z}. \quad (9)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\eta \left(\frac{\partial g_x}{\partial y} + \frac{\partial g_y}{\partial x} \right), \quad (10)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = -\eta \left(\frac{\partial g_y}{\partial z} + \frac{\partial g_z}{\partial y} \right), \quad (11)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = -\eta \left(\frac{\partial g_z}{\partial x} + \frac{\partial g_x}{\partial z} \right), \quad (12)$$

Экструдерлік арнаның қисықтығын алсақ паралель пластиналар арасындағы эквиваленттік ағымды қарастыруға болады. Осьтерді келесідей таңдайық: z – арна бойымен алынған координата, x – оның биіктігімен алынған координата, y – енімен алынған координата.

Оған қоса, экструдерлі арнаның биіктігі еніне қарағанда әлдеқайда кіші, ал ньютон емес орталардың жоғары тұтқырлығы, ал оның өндірістік жүйелер үшін арна ағысы ламинарлық режимде,

$$\begin{aligned} & \text{сондықтан қозғалыс түрлі бағытта болады.} \quad g_x = g_y = 0, \quad g_z(x), \quad \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial y} = 0, \\ & \tau_{xx} = \tau_{yy} = \tau_{zz} = \tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau_{yz} = \tau_{zy} = 0, \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} = -\eta \frac{\partial g_z}{\partial x}, \quad \frac{1}{2} (\Delta \div \Delta) = \left(\frac{\partial g_z}{\partial x} \right)^2. \end{aligned}$$

Нәтижесінде жүйе (1)-(12) келесідей болады:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\eta^0 \frac{\partial g_z}{\partial x} \left| \frac{1}{\gamma_0} \frac{\partial g_z}{\partial x} \right|^{n-1} \right) = \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (13)$$

$$g_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + b \left(\frac{\partial g_z}{\partial x} \right)^2 \left| \frac{1}{\gamma_0} \frac{\partial g_z}{\partial x} \right|^{n-1}, \quad (14)$$

Бұл жердегі $a = \lambda/(\rho C_p)$ – температура өткізгіштігі коэффициенті; $b = \eta/(\rho C_p)$ – диссипация коэффициенті.

Жүйе (13)-(14) шекаралық шарттармен бітеді

$$\vartheta_z(0) = 0, \quad \vartheta_z(h) = \vartheta_0, \quad (15)$$

$$T(x, 0) = T_0; \quad \frac{\partial T(0, z)}{\partial x} = \frac{\partial T(h, z)}{\partial x} = 0, \quad (16)$$

мұндағы T_0 – экструдерлі арнаның кірісінде экструдат температурасы; ϑ_0 – канал арнаның үстіңгі қуат қозғалыс жылдамдығы,

айналым жиілігімен байланысты; h – арнаның биіктігі.

Математикалық модельдің аналитикалық шешуі. Жүйені (13)-(14) өлшемсіздік түріне алып келейік:

$$\frac{d}{dX} \left(\frac{dU}{dX} \left| \frac{dU}{dX} \right|^{n-1} \right) = K, \quad (17)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + B \left(\frac{dU}{dX} \right)^2 \left| \frac{dU}{dX} \right|^{n-1}, \quad (18)$$

$$U(0)=0; \quad U(1)=1, \quad (19)$$

$$\theta(X, 0) = 1, \quad \frac{\partial \theta(0, Z)}{\partial X} = \frac{\partial \theta(1, Z)}{\partial X} = 0, \quad (20)$$

$$\text{мұнда } X = x/h; \quad Z = z/h; \quad U = V_z/V_0; \quad V_z = \vartheta_z/(\gamma_0 h); \quad V_0 = \vartheta_0/(\gamma_0 h);$$

$$K = \frac{h}{\eta^0 \gamma_0} \left(\frac{\gamma_0 h}{\vartheta_0} \right)^n \frac{dP}{dz}; \quad \theta = T/T_0; \quad Pe = \frac{\vartheta_0 h}{a}; \quad B = \frac{b \gamma_0}{T_0} \left(\frac{\vartheta_0}{\gamma_0 h} \right)^{-n}.$$

Жүйенің кернеуіне байланысты (17)-(20), осыдан гидродинамикалық тапсырманы жылулық тапсырмаға қарамай шығаруға болатынын көреміз. Осыған орай (17) суреттегі теңдеуді (19) шарттарға сәйкес талдап шығамыз.

$X^* [0; 1]$ кесіндісінде бір нүкте деп алайық, ол жердегі жылдамдық градиенті нольге тең. Бұл дегеніміз берілген тапсырма келесідей формасы бар эквиваленттік тапсырма ретінде ұсынуға болады:

$$-\frac{d}{dX} \left(\frac{dU_1}{dX} \right)^n = K, \quad (21)$$

$$\frac{dU_1(X^*)}{dX} = 0, \quad U_1(0)=0; \quad (22)$$

$0 \leq X \leq X^*$, және

$$\frac{d}{dX} \left(\frac{dU_2}{dX} \right)^n = K, \quad (23)$$

$$\frac{dU_2(X^*)}{dX} = 0, \quad U_2(1)=1; \quad (24)$$

мұндағы $X^* \leq X \leq 1$, қосымша сәйкестік шартымен
 $U_1(X^*)=U_2(X^*)$. (25)

Теңдеуді шешу үшін (21) оны X интегралдайық

$$\left(\frac{dU_1}{dX} \right)^n = -KX + C_1, \quad (26)$$

мұнда C_1 – интегралдау константасы, екінші шекаралық шартпен анықтала алады (4.22), ол дегеніміз

$$-KX^* + C_1 = 0,$$

$C_1 = KX^*$, орнына қойсақ (26), табамыз

$$\left(\frac{dU_1}{dX} \right)^n = -K(X^* - X), \quad (27)$$

Екі бөлікті де алып (27) $(1/n)$ алынғанға қарамай жазып аламыз

$$U_1 = -K^{\frac{1}{n}} \int (X^* - X)^{\frac{1}{n}} dX + C_2, \quad (28)$$

мұнда C_2 – интегралдау константасы.

Алғашқы функция (28) өрнек беріп отыр, сондықтан

$$U_1 = -K^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} (X^* - X)^{\frac{n+1}{n}} + C_2, \quad (29)$$

Мұнда C_2 константасы бірінші шекаралық шартпен анықталған (22):

$$C_2 = K^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} X^{* \frac{n+1}{n}}.$$

Онда бірінші тапсырманың шешуі (21), (22) ақырғы түрін көреміз

$$U_1 = -K^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} (X^* - X)^{\frac{n+1}{n}} + C_2, \quad (30)$$

(23), (24) тапсырмаларының шешуін де солай табамыз. Қайтадан интегралдап(23)

$$\left(\frac{dU_2}{dX} \right)^n = KX + C_1, \quad (31)$$

бұл жерде C_1 – интегралдау константасы, екінші шекаралық шарттан (24)

$$C_1 = -KX^*,$$

Ол келесідей болады:

$$\left(\frac{dU_2}{dX} \right)^n = K(X - X^*), \quad (32)$$

Екі бөлікті жасағаннан кейін (32) $(1/n)$ қайта интегралдаудан соң

$$U_2 = K^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} (X - X^*)^{\frac{n+1}{n}} + C_2, \quad (33)$$

мұнда C_2 бірінші шекаралық шартпен анықталады (24)

$$C_2 = 1 - K^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} (1 - X^*)^{\frac{n+1}{n}} \quad (34)$$

(33) және (34) екінші тапсырманың ақырғы шешуі шығады (23), (24)

$$U_2(X) = 1 + K^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left[(X - X^*)^{\frac{n+1}{n}} - (1 - X^*)^{\frac{n+1}{n}} \right], \quad (35)$$

Шартына сәйкес (25), (30) пен (35) теңестіріп, теңдеуге анықтама табамыз X^* :

$$-X^{*n+1/n} + (1 - X^*)^{n+1/n} = K^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1}, \quad (36)$$

ақырғы шешуі келесідей формуламен анықталады

$$X = \begin{cases} -K^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left[X^{*n+1/n} - (X^* - X)^{n+1/n} \right], & 0 \leq X \leq X^* \\ 1 + K^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left[(X - X^*)^{n+1/n} - (1 - X^*)^{n+1/n} \right], & X^* \leq X \leq 1 \end{cases}, \quad (37)$$

Өлшемсіз K комплексінің физикалық мағынасын нақтылау үшін ньютон сұйықтығының ағымын қарастырайық, бұл дегеніміз ағыс индексі $n=1$ болған кезде. Бұл жағдайда гидродинамикалық тапсырма (17), (19) келесідей болады:

$$\frac{d^2 U}{dX^2} = K \quad (38)$$

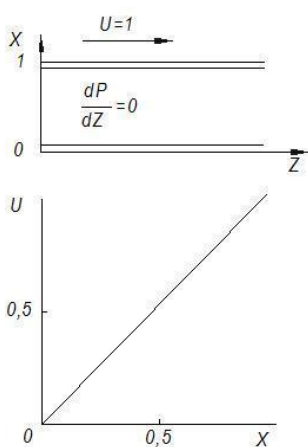
$$U(0) = 0; U(1) = 1, \quad (39)$$

Шешуі (38), (39) екі рет интегралдаудан кейін (39) келесідей:

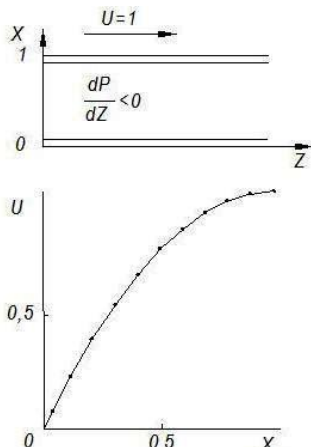
$$U(X) = \frac{1}{2} K X^2 + \left(1 - \frac{1}{2} K \right) X, \quad (40)$$

Үстіңгі пластина арқылы сұйықтың қысымсыз ағуы (1 сурет), ол дегеніміз $K = 0$, жылдамдық профилі $U(X)=X$ Куэтт ағысына сәйкес.

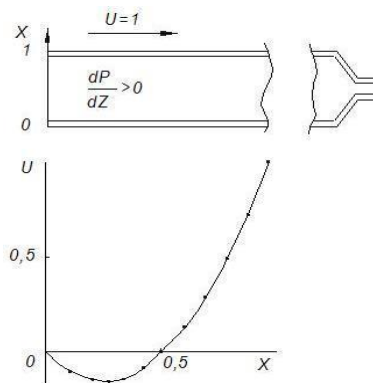
Егер $\frac{dP}{dZ} < 0$, болған жағдайда K кері мағынасын көрсетеді мысал үшін, $K = -2$ ағыс өту қысымы бойынша және үстіңгі пластинаның қозғалысы арқылы іске асады (2 сурет).



1 сурет. Үстіңгі пластина арқылы болатын қысымсыз ағыс (Куэтт ағысы)



2 сурет. Үстіңгі пластинаның қозғалысы мен қысымы арқылы жүзеге асады



3 сурет. Қарсы ағыстың қозғалысын жеңіп пластина арқылы асырылатын қозғалыс

Егер $\frac{dP}{dZ} > 0$, болса ол К жағымды мағынасы, мысал үшін $K=4$ онда ағыс сұйықтың қарсы қысымның жалғасы арқылы, үстіңгі пластинаның қозғалысы арқылы жүзеге асады (3 сурет). Бұл

$$\bar{U} = \int_0^1 U(X) dX = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{K}{6} \right)$$

бұл дегеніміз экструдерлік жүйенің тиімді қызмет атқаруы үшін келесі шартты орындау керек

$$\bar{U} > 0, \text{ т. е. } 0 < K < 6 \text{ (4 сурет).}$$

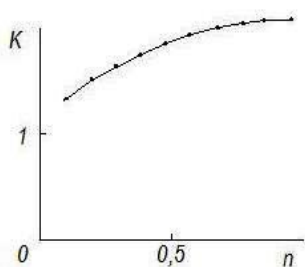
Экструдерлік жүйенің істен шығарылуы талданмалы шешуді талап ететіні заңды (37) $K > 0$ кезінде.

$n \neq 1$ жағдайына талдау жұмысын жалғастырсақ шешімнің қолдану аясын анықтау керек (37). $n \neq 1$ жағдайына талдау

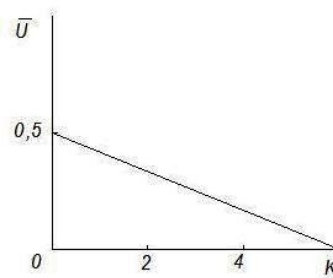
экструдерлік жүйенің модельді ұсынысына сәйкес.

Теңдеу (40) пайдаланып ортақ өлшемсіз жылдамдықты анықтап, келесідей нәтиже аламыз

жұмысын жалғастыратын болсақ, алынған шешудің қолдану аясын анықтау керек (37). Ол үшін теңдеудің шешілу аясын анықтау қажет (36) n байланысты (псевдопластикалық аралық үшін $0 < n < 1$) және K ($K > 0$). Теңдеудің трансцендетті болуына байланысты (36) оның шешуі үшін бисекция әдісі қолданылды.



Сурет 4. Экструдерлік мінездеме



Сурет 5. Шешуін қолдану шегі (37)

Есептеу тәжірибесімен қолданудың төменгі шегі анықталды (37) (5 сурет), үстіңгі жағында шешімді дұрыс қолдану (37).

Қисық дұрыстық аясына (6 сурет) тапсырма (17), (19) тапсырма келесідей қалыптасады:

$$\frac{d}{dX} \left(\frac{dU}{dX} \right)^n = K \quad (41)$$

$$U(0)=0; U(1)=1, \quad (42)$$

Бір реттік интегралдау (41)

$$\left(\frac{dU}{dX} \right)^n = KX + C_1 \quad (43)$$

Қайта интегралдау (43) жылдыамдықты анықтауға әкеледі

$$U(X) = \frac{1}{K} \frac{n}{n+1} (KX + C_1)^{\frac{n+1}{n}} + C_2 \quad (44)$$

мұнда C_1 теңдеуді шешу арқылы анықталады

$$(K + C_1)^{\frac{n+1}{n}} - C_1^{\frac{n+1}{n}} = \frac{n}{n+1} \frac{1}{K} \quad (45)$$

$$C_2 = \frac{1}{K} \frac{n}{n+1} C_1^{\frac{n+1}{n}} \quad (46)$$

Дәрежелік қуаттың экструдерлік мінездемесін анықтау үшін экструдаттың арнаны кесіп өтетін орташа жылдамдығын табамыз:

$$\begin{aligned}\bar{U} &= \int_0^1 U(X) dX = \int_0^{X^*} U(X) dX + \int_{X^*}^1 U(X) dX = \\ &= K^{\frac{1}{n}} \frac{n}{2n+1} X^{*\frac{2n+1}{n}} + (1 - X^*) - K^{\frac{1}{n}} \frac{n}{2n+1} (1 - X^*)^{\frac{2n+1}{n}},\end{aligned}\quad (47)$$

Қисық дұрыстылықтың жоғары аясы үшін ара қатынас (47) қисық дұрыстылықтың аясынан төмен.

$$\bar{U} = \int_0^1 U(X) dX = \frac{1}{K^2} \frac{n^2}{(n+1)(2n+1)} (KX + C_1)^{\frac{2n+1}{n}} + C_2, \quad (48)$$

(48) суретке сәйкес әрдайым осы шарт орындалады $\bar{U} > 0$ кезде $k > 0$, сондықтан экструзия тиімділігінің төменгі шегі ара қатынастың дұрыстылығына сәйкес болады (47).

Келесі шешім үшін реологиялық заңды және k үлкендігін анықтап алу керек. Алдымен жұмыс диапазонының температурасы үшін реологияның заңдылықтарын анықтау тәжірибелік ақпаратқа сүйену керек (1 кесте).

Кесте 1. Жұмыс диапазонының температурасы үшін реологияның заңдылықтарын анықтаудың тәжірибелік ақпараты

Температура, $T, ^\circ\text{C}$	Жылжу жылдамдылығы, γ, c^{-1}	Акуызды-өсімдік қоспасы		
		$\eta^\circ \cdot 10^{-6},$ Па · с	$\eta^\circ \cdot 10^{-6},$ Па · с	$\eta^\circ \cdot 10^{-6},$ Па · с
		Ылғалдылық 18 %	Ылғалдылық 20 %	Ылғалдылық 22 %
50	7,1	192, 32	215,32	231, 50
160	218,15	23,15	25, 78	27, 15

Қуат заңдылығында n ағысындағы индексті табу үшін

$$\tau = \eta^\circ \gamma^n, \quad (49)$$

келесі әдістемені пайдаланайық.

Табиғи негізіндегі логарифмді алайық (49)

$$\ln \tau = \ln \eta^\circ + n \ln \gamma, \quad (50)$$

және де (50) көмегімен 1 кестеге сәйкес τ және n белгісіз деп санап шекаралық нүктелер үшін сызықтық теңдеулер жүйесін құрайық

$$\begin{cases} \ln \tau - n \ln \gamma_1 = \ln \eta^\circ_1 \\ \ln \tau - n \ln \gamma_2 = \ln \eta^\circ_2, \end{cases} \quad (51)$$

Осыдан ағыс индексі

$$n = \frac{\ln \eta^\circ_1 - \ln \eta^\circ_2}{\ln \gamma_2 - \ln \gamma_1}, \quad (52)$$

тең.

Есептеу нәтижесі 2 кестеде келтірілген. Осының ішінде η° 120 $^\circ\text{C}$ дан 130 $^\circ\text{C}$ ға дейінгі температура интервалындағы орташа деп анықталған.

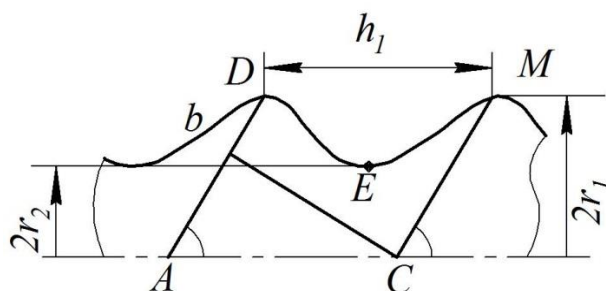
Кесте 2. Есептеу нәтижесі

$W, \%$	18	20	22
n	0,62	0,62	0,62
$\eta^\circ \cdot 10^{-6}, \text{Па} \cdot \text{с}$	36,07	41,73	49,23

2 кестеден келесідей қорытынды жасау керек: ақуызды-өсімдік (жеміс-жидек) қоспасы псевдопластик болып табылады және ағыс индексі іс жүзінде ылғалдыққа тәуелді емес

Нәтижелері және оларды талқылау

6 суретте шнектің бұрандалы схемасы келесідей өлшемде көрсетілген: $\alpha = 60^\circ$, $h_1 = 15$ мм, $2r_1 = 29,1$ мм, $r_2 = 16,5$ мм.



Сурет 6 Бұрандалы шнектің схемасы

Тікбұрышты ΔABC ден арнаның нағыз енін анықтаймыз

$$l = BC = AC \cdot \sin 60^\circ = h_1 \frac{\sqrt{3}}{2} = 15 \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 13 \text{ мм}$$

Қисық DEM параболаға жақын деп есептейік, онда тиімі арна тереңдігін анықтаймыз.

Парабола теңдеуі $y = ax^2$ болғандықтан

$$y = r_1 - r_2 = \frac{29,1 - 16,5}{2} = 6,3 \text{ мм,}$$

$$ax = l / 2 = 13 / 2 = 6,5 \text{ мм алып}$$

$$a = \frac{y}{x^2} = \frac{6,3}{6,5^2} = 0,15 \text{ табамыз.}$$

Арнаның тиімді тереңдігін келесідей жолмен есептейміз

$$h = \frac{2}{l} \int_0^{l/2} ax^2 dx = \frac{2}{l} a \frac{1}{3} x^3 \Big|_0^{l/2} = \frac{a}{3} \left(\frac{l}{2} \right)^2 = \frac{0,15}{3} 6,5^2 \approx 2,1 \text{ мм}$$

$h \ll 1$, бұл дегеніміз экструдерлі арна шынымен жазық деп санауға болады. Корпус қозғалысының сызықтық салыстырмалы жылдамдығын келесідей формуламен есептеп шығарамыз:

$$\mathcal{G}_0 = \pi D \omega \sin 60^\circ,$$

мұндағы D – шнектің айналым аясының ішкі диаметрі; ал ω – шнектің айналым жиілігі.

Т. к. $D = 2r_1 = 29,1 \text{ мм} = 29,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\omega = 350 \text{ об/мин} = 5,83 \text{ с}^{-1}$, онда

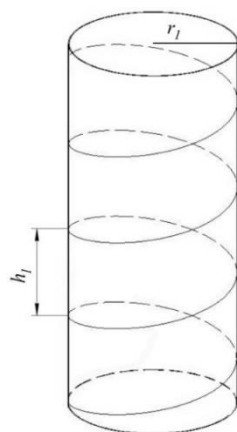
$$\mathcal{G}_0 = \pi \cdot 29,1 \cdot 10^{-3} \cdot 5,83 \cdot \sin 60^\circ$$

Шнектік арнаның ұзындығын есептеп шығару үшін бұрандалы қисықтың моделін қолданайық (7-сурет), оған сәйкес бір бұранданың ұзындығы

$$L_0 = \sqrt{2\pi r_1^2 + h_1^2} = \sqrt{2\pi (14,55 \cdot 10^{-3})^2 + (15 \cdot 10^{-3})^2} = 0,039 \text{ м,}$$

тең, алайда бұранда саны 8 болғандықтан, жалпы ұзындығы мынаған тең:

$$L = 8L_0 = 8 \cdot 0,039 = 0,315 \text{ м}$$



Сурет 7. Қисық бұранданың моделі

Матрица алдындағы аймағындағы қысым

$$P_0 = 6,5 \cdot 10^6 \text{ Па}_{\text{то}}, \quad \frac{dP}{dZ} \approx \frac{P_0}{L} = 6,5 \cdot 10^6 / 0,315 = 2,06 \cdot 10^6 \text{ Па/м}, \text{ онда } (\gamma_0 = 1 \text{ деп алсақ})$$

$$K = \frac{h}{\eta^0 \gamma_0} \left(\frac{\gamma_0 h}{g_0} \right)^n \frac{dP}{dz} = \frac{2,1 \cdot 10^{-3}}{36,07 \cdot 10^6} \left(\frac{2,1 \cdot 10^{-3}}{0,461} \right)^{0,62} 2,06 \cdot 10^6 = 4,23 \cdot 10^{-6},$$

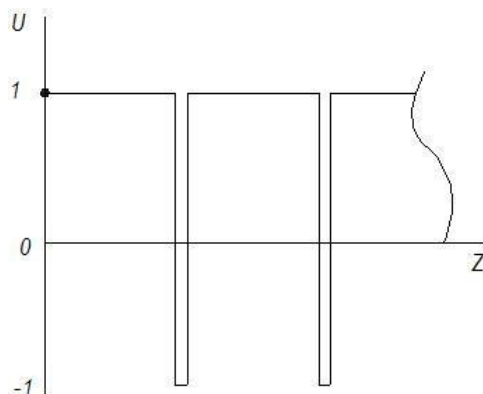
болады, ал бұл дегеніміз

$$U(X) \approx X \quad (53)$$

Екі шнек жұмысының геометриялық циклограммасы 8 суретте көрсетілген, соған сәйкес шнектердің өзара әрекетін елемеуге болатынын қорытындылаймыз.

Бұл талдау жылулық мәселенің талдауына кірісуге мүмкіндік береді (18), (20). (53) ке сәйкес.

$$\frac{dU}{dX} = 1$$



Сурет 8. Шнектердің бірлескен жұмысының геометриялық циклограммасы

Сондықтан тапсырманың математикалық формулировкасын келесідей жасаса болады

$$X \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + B, \quad (54)$$

$$\theta(X, 0) = 1, \quad (55)$$

$$\frac{\partial \theta(0, Z)}{\partial X} = \frac{\partial \theta(1, Z)}{\partial X} = 0, \quad (56)$$

Пекле санын анықтаймыз. $a = 6,64 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, онда

$$Pe = \frac{g_0 h}{a} = \frac{0,461 \cdot 2,1 \cdot 10^{-3}}{6,64 \cdot 10^{-8}} = 14579,8.$$

Бұл дегеніміз жылу өткізгіш арқылы жылу беруді елемеуге болады (54)-(56) өз кезегінде

$$\begin{cases} X \frac{\partial \theta}{\partial Z} = B \\ \theta(0) = 1 \end{cases}, \quad (57)$$

дейін жеңілдетуге болады.

(57) теңдеудегі орташа θ көлденең қимаға сәйкес соңында

$$\begin{cases} X \frac{\partial \theta}{\partial Z} = B \\ \theta(0) = 1 \end{cases}, \quad (58)$$

аламыз. Шешуі (58) келесідей көріністе

$$\theta(Z) = 1 + BZ, \quad (59)$$

Диссипация коэффициентінің мағынасы (59) осындай:

$$B = \frac{\eta^\circ \gamma_0}{\rho \cdot C_p \cdot T_0} \left(\frac{g_0}{\gamma_0 h} \right)^{-n} = \frac{36,07 \cdot 10^6 \cdot 1}{1200 \cdot 2992 \cdot 393} \left(\frac{0,461}{2,1 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,62} = 9,034 \cdot 10^{-4}$$

Онда

$$\theta(Z) = 1 + 9,034 \cdot 10^{-4} Z,$$

бірақ $Z = L/h = 0,315/2,1 \cdot 10^{-3}$ болғандықтан экструдаттың ақырғы температурасы $T_k = 136,2^\circ \text{C}$ болады.

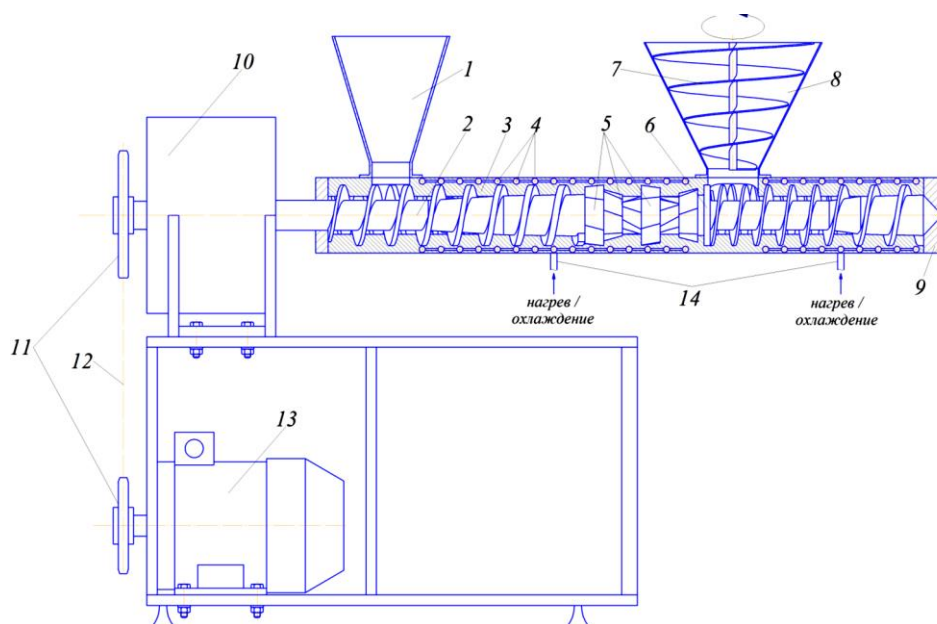
Шешудің нәтижесінде (1-59) $Z = L/h = 0,315/2,1 \cdot 10^{-3}$ бар, онда экструдаттың ақырғы есептік температурасы $T_k = 136,2^\circ \text{C}$ тең, ал оның тәжірибелік мағынасы $T_k = 135^\circ \text{C}$, ол дегеніміз жақсы сәйкестікке ие дегенге саяды.

Алынған тәуелділіктер екіншектік экструдердің құрылысын жобалау және есептеуге негіз болды. Бұл экструдердің шикізатты өндеудегі технологиялық мүмкіндіктерін кеңейтеді, ал ол өз кезегінде өндірілетін өнімнің ассортиментін кеңейтіп, құрамына өсімдік (жеміс-жидек)

компоненттерін қосып теңдестірілген азық-түлік өнімдерін алу мақсатын көздейді.

Екіншектік экструдер (9-сурет) тиеу құбырынан (1), жақтаудан (3), екі шнектен (2), коректіктен (8) и матрицадан (9) тұрады. Жақтауда (3) арна жасалған (4), оларға құбыр арқылы (14) ыстық немесе суық жылу жіберіледі (керек температураға сәйкес).

Шнектер (2) электроқозғалтқыш арқылы айналады (13) тізбектік жұлдызшалардың көмегімен (11). тізбек (12) және вариатор 10, шнектер айналымының тегіс басқару жиілігін қамтамасыз етеді (2). Декомпрессия жерінің декомпрессиондық-экстракциондық аймақта орналасқан экструдер жақтауының үстінде вертикалді айдау шнегі бар (7) коректік орналасқан (8).



Сурет 9. Екішнекті экструдер:

1 – тиеу құбыры; 2 – шнек; 3 – жақтау; 4 – арналар; 5 – жұдырықша; 6 – ысытатын шайба; 7 – айдау (нагнетающий) шнегі; 8 – қоректік; 9 – матрица; 10 – вариатор; 11 – жұлдызша; 12 – тізбек; 13 – электроқозғалтқыш; 14 – құбыр

Шнектің әрқайсысы (2) үш аймақтан тұрады (10 сурет):

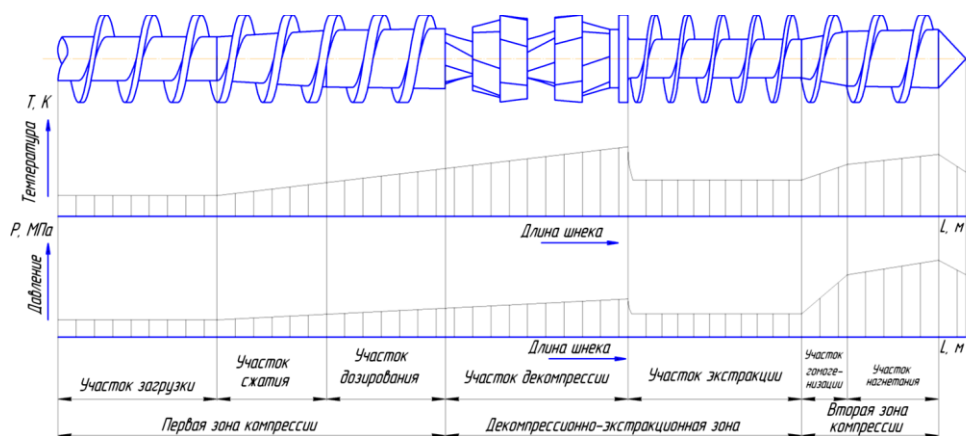
- компрессияның бірінші аймағы, ол өз кезегінде үш жерді қамтиды: жүктеу, қысу, мөлшерлеу;

- декомпрессиондық-экстракциондық аймақ, ол өз кезегінде екі жерді қамтиды: декомпрессия және экстракция;

- компрессияның екінші аймағы, ол екі жерді қамтиды: гомогенизация мен айдау (нагнетание).

Шнектердің құрылымы (2) экструдердің рационалды жұмыс кестесіне едәуір әсер етеді.

Басты қиындық дақылдық компоненттерді жеткізу үшін балқыманың қоректік арқылы ағып кету қаупі бар (8). Сондықтан шнектерді (2) құрастыру кезінде қоректіктің (8) алдында дақылды компоненттерді жеткізу үшін шамадан тыс қысымның пайда болуын болдырмау керек болады. Нәтижесінде үшаймақтық шнектер қарастырылды (2), олардың әрбіреуінде компрессияның екі аймағы бар, олардың арасында декомпрессиондық-экстракциондық аймақ орналасқан.



Сурет 10. Шнек ұзындығы бойынша барлық үш аймақ көрсетілген температура мен қысымның өзгерістері бар біріктірілген кесте

Коректік арқылы дақылдық компоненттерді енгізуді қамтамасыз ету үшін (8) екі шарттың орыналуы қажет. Біріншіден, коректіктің (8) алдында атмосфералық қысымға тең қысымды қамтамасыз ету керек. Оған қоса осы аймақтағы өнім толығымен балқытылған болуы тиіс.

Бастапқы өнім тиелік құбыр арқылы 1 шнектердің (2) бұрандалы арнасының аймағына түседі де жақтауың (3) жарлары және шнектердің (2) бұрандалы арнасы арқылы әкетіледі. Содан кейін түйіршік аймағында (10 сурет) шикізаттың түйіршіктеліп жартылай балқу үдерісі орын алады. Сол уақытта құбырлар (14) арқылы арналарға (4) жақтауда (3) жасалған суық немесе ыстық жылу беріледі (температуралық режимнің қажеттілігіне байланысты)

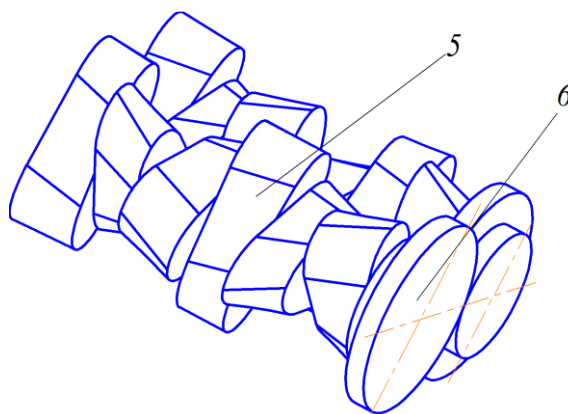
Аймақта өнімнің өзінде мөлшерлі және жақтаудың (3) қосалқы қыздыруының арқасында ыстық жылу құбырлар (14) арқылы арналарға (4) жылудың берілуін қамтамасыз етеді. Қысым мен температураның әсерінен өнімнің қрамындағы ақуыз денатурацияға ұшырап, ішкі молекулярлық құбылыста ішкі байланыстың физикалық қайта топтасу қасиетіне ие болады.

Айналмалы жұдырықшалар (5) (11 және 12 суреттер) айналым осі бойынша бір-бірінен салыстырмалы қашықтықта ретімен орналасқан. Олар бір жағынанан балқымаға едәуір термомеханикалық әсерін тигізеді, оған қоса айдау (нагнетание) қысымын түсіреді.

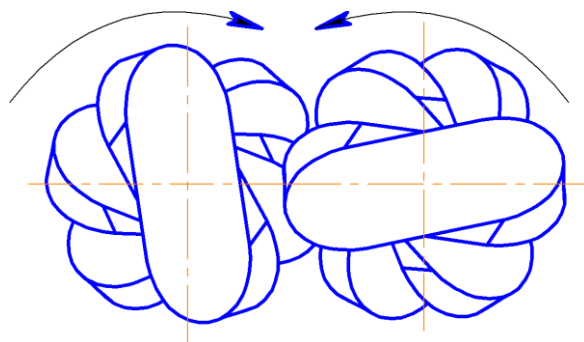
Өңделген өнім жұдырықшалардың 5 механикалық әсеріне тап болады, соның нәтижесінде «өлі аймақтың» қалыптасу мүмкіндігі жоққа шығады. Фигуралық жұдырықшалардың (5) баспалдақ тәріздес ойдымдары айналған кезде бір-бірімен синхронды түрде қатынасқа түсіп, балқыманың микроқұрылымына әсер етеді. Сәйкесінше молекуланың ішкі реттілігі бұзылып, ақуыздың физика-химиялық қасиеттері өзгеріске ұшырайды (еруі, гидратация мүмкіндіктері, ерітінділердің тұтқырлығы, ферменттердің әрекетіне қарсы тұрақтылығы, биологиялық белсенділігі және т.б.)

Содан кейін балқыма ысытатын шайбалардың (6) сыртқы диаметр мен жақтаудың (3) ішкі диаметрі арасында орналасқан тар дөңгелек арнадан өтеді. Ол жерде интенсивті механикалық әсерге түсіп, гомогендік балқыманың тағы бір ысуына әкеліп соғады. Содан соң коректікте (8) орналасқан шнектің вертикалді айдауының жетегі іске қосылады. Содан кейін барып экстракция аумағына түскен гомогенді балқымаға түрлі термолабильді компоненттер енгізіледі.

Айдау аумағынан өткеннен кейін дайын өнім матрицада (9) орналасқан тесік арқылы шығарылады. Дайын өнім түрлі компоненттер қосылған кеуектік құрылымы болады. Өнімнің толық шығуы барысына температуралық режимнің регуляциясы болады. Олар құбырлар (14) арқылы арналарға (4) жететін жылу өткізгіштердің көмегімен іске асады.



Сурет 11. Декомпрессия жеріндегі декомпрессиондық-экстракциондық аймақтың жұдырықшалары: 5 – жұдырықша; 6 – ысытатын шайба



Сурет 12. Декомпрессия жеріндегі декомпрессиондық-экстракциондық аймақтың жұдырықшалары

Осылайша екіншілік экструерің қолданысы түрлі поликомпонентті құрамы бар коэкструдирленген өнімдерді шығаруда экструердің технологиялық мүмкіндіктерін кеңейту; орнатылған жұдырықшалар (5) мен ысытатын шайбалардың (6) жылу өткізгіштердің регуляциясы мен механикалық әсері арқасында өңделетін өнімнің компоненттері керекті физика-химиялық түрлену тереңдігін қамтамасыз етуді қамтамасыз етеді.

Қорытынды

Экструдер арнасы арқылы көп дәнді қоспа балқымасының ағынының математикалық моделі жасалды. Модель құрамына қозғалыс теңдеулер мен энергияны сақтау мен шектік шарттар теңдеулер, зерттелген қоспаның балқыма ағынының реологиялық заңдылығы кіреді. Шнектің геометриялық параметрлері, экструдер арнасының тереңдігі мен ені, экструдаттың жұмыс камерасы бойынша температура мен ағын жылдамдығының орташа көрсеткіші анықталды. Алынған ақпарат екіншілік экструдердің жобалау мен есептеуге негіз болып табылады. Әрбір шнек үш аймақтан тұрады: бірінші компрессия аумағы, ол өз кезегінде үш жерден тұрады: жүктеу, қысу және мөлшерлеу; декомпрессиондық-экстракциондық аумақ, ол өз кезегінде екі жерден тұрады: декомпрессия мен экстракция; және де екінші компрессия аумағы, ол өз кезегінде екі жерден тұрады: гомогенизация мен айдау. Ұсынылып отырған екіншілік экструдер өңделіп жатқан өнім компоненттерінің физика-химиялық түрленудің қажетті тереңдігін қамтамасыз етеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Оспанов А.А., Остриков А.Н., Муслимов Н.Ж., Джумабекова Г.Б. Технология производства коэкструдированных пищевых продуктов. Монография. – Алматы: ТОО "Нур-Принт", 2018. – 211 б.
2. Veremey E., Fatykhov Y., Alshevsky D. Co-extrusion process modeling of high viscosity food

masses // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2021. – T. 2419. – №. 1. – P. 030004.

3. Fatyhov U.A., Shumanov V.A., Zarudnyi V.A. A Mathematical model of the co-extruding process // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2015. – №. 3. – P. 41-43.

4. Adekola K.A. Engineering review food extrusion technology and its applications // Journal of Food Science and Engineering. – 2016. – T. 6. – №. 3. – P. 149-168.

5. Jun Ho Mun, Ju Hyeon Kim, Sang Ho Mun and See Jo Kim. Modeling and numerical simulation of multiflux die in the multilayer co-extrusion process / Korea-Australia Rheology Journal, 29(1), 51-57 (February 2017).

6. A. Hammer, W. Roland, C. Marschik, G. Steinbichler. Predicting the co-extrusion flow of non-Newtonian fluids through rectangular ducts – A hybrid modeling approach / Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 295, (2021). 104618.

7. Vynckier A. K. et al. Hot-melt co-extrusion: requirements, challenges and opportunities for pharmaceutical applications // Journal of pharmacy and pharmacology. – 2014. – T. 66. – №. 2. – P. 167-179.

8. Chew S.C., Nyam K.L. Microencapsulation of kenaf seed oil by co-extrusion technology // Journal of food engineering. – 2016. – T. 175. – P. 43-50.

9. Silva M.P. et al. Comparison of extrusion and co-extrusion encapsulation techniques to protect Lactobacillus acidophilus LA3 in simulated gastrointestinal fluids // LWT. – 2018. – T. 89. – P. 392-399.

10. Piazza L., Roversi T. Preliminary study on microbeads production by co-extrusion technology // Procedia Food Science. – 2011. – T. 1. – P. 1374-1380.

11. Sun-Waterhouse D. et al. Storage stability of phenolic-fortified avocado oil encapsulated using different polymer formulations and co-extrusion technology // Food and Bioprocess Technology. – 2012. – T. 5. – №. 8. – P. 3090-3102.

12. Goh K.M., Low S.S., Nyam K.L. The changes of chemical composition of microencapsulated roselle (Hibiscus sabdariffa L.) seed oil by co-extrusion during accelerated storage // International Journal of Food Science & Technology. – 2021. – T. 56. – №. 12. – P. 6649-6655.

13. Василенко В.Н. и др. Аналитическое определение температурных полей биополимеров в формирующем канале экструдера при коэкструзии // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2014. – №. 1 (59). – С. 13-18.

14. Тихонова Н.В. Разработка и исследование качества коэкструзионных изделий – трубочек с подваркой из микроклонированной земляники садовой // Актуальные проблемы пищевой промышленности и общественного питания. – 2017. – С. 270-276.

15. Ospanov A., Timurbekova A., Muslimov N., Almaganbetova A., Zhalelov D. The extrusion process of poly-cereal mixtures: study and calculation of the main parameters *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2022. – V. 16. – P. 645-655 <https://doi.org/10.5219/1756>

REFERENCES

1. Ospanov A.A., Ostrikov A.N., Muslimov N.Zh., Jumabekova G.B. *Tekhnologiya proizvodstva koekstrudirovannykh pishchevykh produktov* [Technology of production of co-extruded food products]. Monografiya. – Almaty: TOO «Nur-Print», 2018. – 211 p. (In Russian)

2. Veremey E., Fatykhov Y., Alshevsky D. Co-extrusion process modeling of high viscosity food masses // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing LLC, 2021. – T. 2419. – №. 1. – P. 030004.

3. Fatykhov U.A., Shumanov V.A., Zarudnyi V.A. A Mathematical model of the co-extruding process // *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. – 2015. – №. 3. – P. 41-43.

4. Adekola K.A. Engineering review food extrusion technology and its applications // *Journal of Food Science and Engineering*. – 2016. – T. 6. – №. 3. – P. 149-168.

5. Jun Ho Mun, Ju Hyeon Kim, Sang Ho Mun and See Jo Kim. Modeling and numerical simulation of multilayer die in the multilayer co-extrusion process / *Korea-Australia Rheology Journal*, 29(1), 51-57 (February 2017).

6. A. Hammer, W. Roland, C. Marschik, G. Steinbichler. Predicting the co-extrusion flow of non-Newtonian fluids through rectangular ducts – A hybrid modeling approach / *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 295, (2021). 104618.

7. Vynckier A.K. et al. Hot-melt co-extrusion: requirements, challenges and opportunities for pharmaceutical applications // *Journal of pharmacy and pharmacology*. – 2014. – T. 66. – №. 2. – P. 167-179.

8. Chew S.C., Nyam K.L. Microencapsulation of kenaf seed oil by co-extrusion technology // *Journal of food engineering*. – 2016. – T. 175. – С. 43-50.

9. Silva M.P. et al. Comparison of extrusion and co-extrusion encapsulation techniques to protect *Lactobacillus acidophilus* LA3 in simulated gastrointestinal fluids // *LWT*. – 2018. – T. 89. – P. 392-399.

10. Piazza L., Roversi T. Preliminary study on microbeads production by co-extrusion technology // *Procedia Food Science*. – 2011. – T. 1. – P. 1374-1380.

11. Sun-Waterhouse D. et al. Storage stability of phenolic-fortified avocado oil encapsulated using different polymer formulations and co-extrusion technology // *Food and Bioprocess Technology*. – 2012. – T. 5. – №. 8. – P. 3090-3102.

12. Goh K. M., Low S. S., Nyam K. L. The changes of chemical composition of microencapsulated roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) seed oil by co-extrusion during accelerated storage // *International Journal of Food Science & Technology*. – 2021. – T. 56. – №. 12. – P. 6649-6655.

13. Vasilenko V.N. i dr. Analiticheskoye opredeleniye temperaturnykh poley biopolimerov v formirovani kanala ekstrudera pri koekstuzii [Analytical determination of temperature fields of biopolymers in the forming channel of an extruder during coextrusion] // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*. – 2014. – №. 1 (59). – P. 13-18. (In Russian)

14. Tikhonova N.V. Razrabotka i issledovaniye kachestva koekstruzionnykh izdeliy – trubochek s podvarkoy iz mikroklonirovannoy zemlyaniki sadovoy [Development and research of the quality of coextrusion products – tubes with a weld from microcloned garden strawberries] // *Aktual'nyye problemy pishchevoy promyshlennosti i obshchestvennogo pitaniya*. – 2017. – P. 270-276. (In Russian)

15. Ospanov A., Timurbekova A., Muslimov N., Almaganbetova A., Zhalelov D. The extrusion process of poly-cereal mixtures: study and calculation of the main parameters *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2022. – V. 16. – P. 645-655 <https://doi.org/10.5219/1756>