

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХШНЕКОВЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ ПРИ МИНИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

М. В. Соколов¹, П. С. Беляев², А. С. Клинков²

*Кафедры: «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1),
msok68@mail.ru; «Материалы и технология» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: клеевая композиция; минимальная технологическая мощность; прочность материала (жесткость, устойчивость) шнека; технологические и конструктивные параметры двухшнековых машин.

Аннотация: Рассмотрены постановка задачи оптимизации и ее решение при переработке клеевых композиций в двухшнековых машинах при условии минимизации технологической мощности. Разработаны алгоритм и программа для ЭВМ по расчету оптимальных технологических и конструктивных параметров двухшнековых смесителей.

Конструирование современного оборудования требует от специалиста знаний в области оптимального проектирования и разработки методики оценки и прогнозирования качества готового продукта из клеевых композиций при их переработке в двухшнековых машинах, которые позволят проектировать их рабочие органы [1 – 3].

Выбор параметров управления осуществляется в результате теоретического анализа влияния технологических параметров процесса смешения и геометрических размеров шнекового оборудования на функции состояния [1].

В качестве функций состояния принимаем технологическую мощность N и производительность шнековой машины Q , которые рассчитываются по уравнениям, приведенным в [1, пп. 2.4, 2.5].

Влияние конструктивных и технологических параметров двухшнековой машины рассмотрено на примере получения клеевой композиции (80%-я смесь натурального каучука «смокед-шитс» и растворителя «нефрас») со следующими физико-механическими и реологическими свойствами: $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$ – плотность клеевой композиции; $m_0 = 27,5 \text{ кПа} \cdot \text{с}$ и $n_r = 0,49$ – соответственно мера консистенции и индекс течения клеевой композиции; $T_{\text{вх}} = T_{\text{вых}} = T_{\text{пер}} = 293 \text{ К}$ – температуры переработки клеевой композиции на входе и выходе из смесителя; $\Delta P = 5 \text{ МПа}$ – перепад давления по длине рабочих органов (шнеков).

Исходя из анализа линий уровня функций состояния, проводится выбор параметров управления для оптимизации процесса и конструкции оборудования для смешения высоковязких композиций [1]. Рассматривая влияние каждого из основных технологических (ω) и конструктивных (φ , h , D , δ , e , e_k) параметров на величину изменения функций состояния (N , Q), выбираем в качестве параметров управления следующие варьируемые величины: угол наклона винтовой линии шнека φ ; глубину его винтового канала h ; наружный диаметр D ; угловую скорость ω ; ширину гребня шнека e ; ширину смесительных дисков (эксцентрик-вых насадок) e_k .

Математическая формулировка задачи оптимизации состоит в следующем.

Пусть \bar{x} – переменные управления; \bar{y} – переменные состояния; $F(\bar{x}, \bar{y})$ – целевая функция; $R(\bar{x}, \bar{y})$ – функции ограничения. Необходимо найти такие значения переменных управления \bar{x} , переменных состояния \bar{y} , чтобы целевая функция F достигала своего экстремального значения. Необходимым требованием успешного решения данной задачи является возможность расчета оптимальных конструктивных размеров двухшнекового оборудования и технологических параметров процесса смешения при переработке конкретных полимерных композиций.

Таким образом, конкретная постановка задачи оптимизации процесса и оборудования смешения высоковязких композиций заключается в нахождении значений конструктивных и технологических параметров, при которых критерий оптимизации (технологическая мощность) стремится к минимуму

$$[F = N(\varphi, h, D, \omega, e, e_k)] \rightarrow \min \quad (1)$$

при выполнении условий в виде ограничений (2) – (4):

– прочность материала (жесткость, устойчивость) шнека

$$R(\varphi, h, D, \omega, e, e_k) \leq [\sigma], \quad (2)$$

где $[\sigma]$ – допустимое напряжение материала шнека (допускаемый прогиб, коэффициент запаса по устойчивости);

– производительность двухшнекового смесителя

$$Q_{\text{зад}} = Q(\varphi, h, D, \omega, e, e_k), \quad (3)$$

где $Q_{\text{зад}}$ – заданное значение производительности двухшнековой машины;

– диапазон изменения параметров управления

$$\begin{aligned} D_l &\leq D \leq D'; \\ \varphi_l &\leq \varphi \leq \varphi'; \\ Dk_{hl} &\leq k_h D \leq Dk_{h'}; \\ \omega' &\leq \omega \leq \omega'; \\ Dk_{el} &\leq k_e D \leq Dk_{e'}; \\ Dk_{ekl} &\leq k_{ek} D \leq Dk_{ek'}; \end{aligned} \quad (4)$$

где $\varphi_l, Dk_{hl}, D_l, \omega_l, Dk_{el}, Dk_{ekl}$ и $\varphi', Dk_{h'}, D', \omega', Dk_{e'}, Dk_{ek'}$ – соответственно, левая и правая границы изменения конструктивных (φ, h, D, e, e_k) и технологического (ω) параметров; $k_{hl}, k_{el}, k_{ekl}, k_{h'}, k_{e'}, k_{ek'}, k_h, k_e, k_{ek}$ – соответственно, коэффициенты учитывающие левую, правую границы изменения и начальные значения конструктивных параметров (h, e, e_k).

Для решения уравнений (1) – (4) применялся метод скользящего допуска [4], реализуемый программой для ЭВМ. Получены значения оптимальных конструктивных (φ, h, D, e, e_k) и технологических (ω, N) параметров в виде графических зависимостей от производительности двухшнековой машины Q .

При проектировании нового оборудования принимались следующие исходные данные: $D = 0,04 \dots 0,1$ м; $\varphi = (4 \dots 6)$; $k_{hl} = 0,12$; $k_{h'} = 0,18$; $\omega = (1,05 \dots 10,5)$ с⁻¹; $k_{el} = 0,02$; $k_{e'} = 0,1$; $k_{ekl} = 0,02$; $k_{ek'} = 0,1$; $\Delta P = 5$ МПа; $\delta = 0,01D$ м; $z = 10$ – число витков винтовой нарезки шнека; $n_k = 45$ – число пар смесительных дисков (кулачков). А также начальные значения параметров управления: $D_0 = 0,1$ м; $\varphi_0 = 4^\circ$; $h_0 = 0,12D$ м; $\omega_0 = 1,05$ с⁻¹; $e_0 = 0,02D$ м; $e_{k0} = 0,02D$.

Расчеты проведены на примере смешения клеевой композиции при исходных данных (см. с. 104).

При усовершенствовании существующего оборудования принимались те же исходные и начальные данные, что и при проектировании нового оборудования, при заданном диаметре $D = 0,04$ м. Согласно кривым на рис. 1, при увеличении производительности двухшнековой машины Q , технологическая мощность N повышается главным образом за счет увеличения угловой скорости шнека ω и его диаметра D , так как при этом возрастают затраты энергии на транспортирование перерабатываемого материала по винтовому каналу; компенсацию потерь вследствие перепада давления по длине шнека; трение в зазоре δ .

Разработана программа для расчета на ЭВМ [1], позволяющая определять оптимальные технологические параметры процесса и конструктивные размеры оборудования для получения высоковязких композиций. Порядок работы программы поясняется табл. 1 и схемой алгоритма (рис. 2).

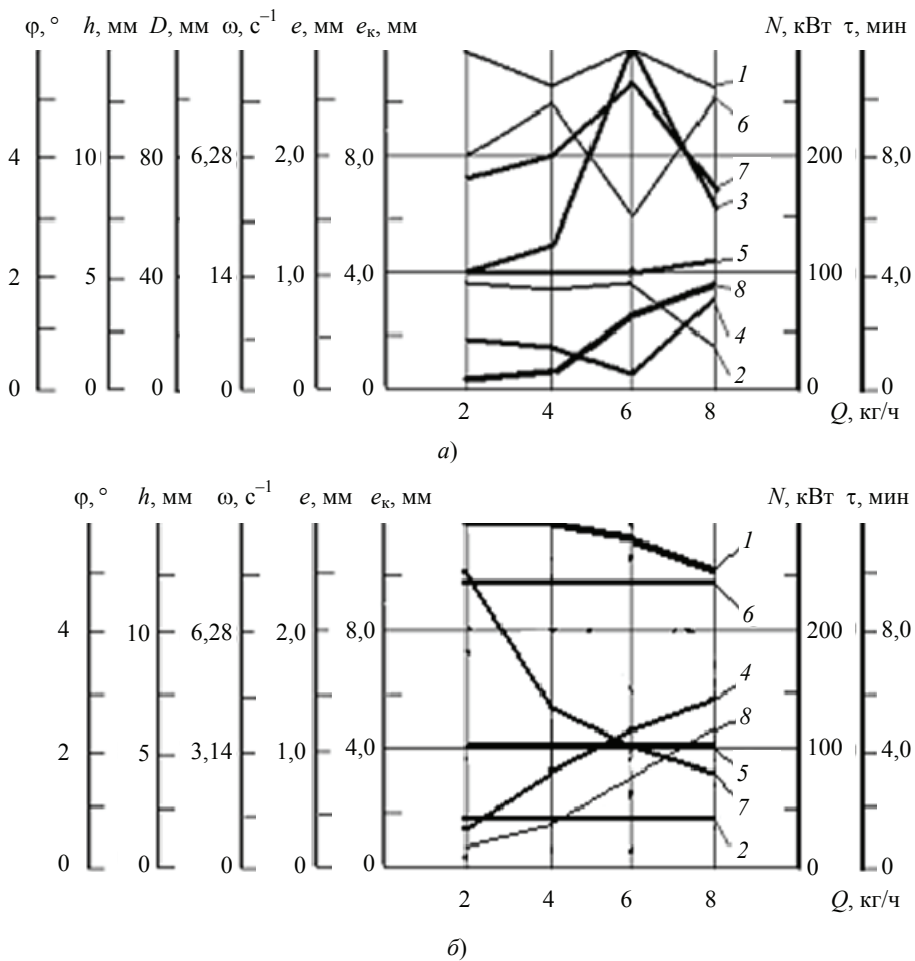


Рис. 1. Зависимости оптимальных конструктивных (1 – ϕ , 2 – h , 3 – D , 5 – e , 6 – e_k) и технологических (4 – ω , 8 – N , 7 – τ) параметров от производительности Q при проектировании смесителя (а), при усовершенствовании существующего смесителя с диаметром $D = 0,04$ м (б)

Таблица 1

Идентификатор к программе ЭВМ

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
1	2	3
Диаметр шнека, м	D	DG
Диаметр сердечника шнека, м	d_B	dGv
Длина нарезной части шнека, м	l_H	Lv
Межцентровое расстояние между шнеками, м	A	AA
Плотность высоковязкой композиции, кг/м ³	ρ	RO
Мера консистенции высоковязкой композиции, Па · с ^{n_r}	$m_{01} - m_{04}$	ETA1 – ETA4
Индекс течения высоковязкой композиции	$n_{r1} - n_{r4}$	pm1 – pm4
Функции ограничения	R	R
Общее число переменных	N_x	Nx
Общее число ограничений в виде: равенств неравенств	N_c N_{ic}	Nc Nic
Число витков, шт	z	ZV
Заданная производительность шнековой машины, кг/ч	Q	QZ
Угол захвата, °	α	ALF
Число пар кулачков, шт.	n_k	nk1
Угол наклона винтовой линии шнека, °	φ	FI
Средний диаметр шнека, м	D_{cp}	DGs
Длина занятая смесительными дисками, м	l_d	LD
Шаг винтовой нарезки шнека, м	t	t1
Глубина винтового канала шнека, м	h	h
Распределение давления по длине шнека, Па	ΔP	PG1
Частота вращения шнеков, с ⁻¹	n	nw1
Число пар смесительных дисков (кулачков)	n_d	nd1
Касательное напряжение, Па	$\tau(x)$	TAU
Модуль упругости 1 рода, Па	E	E
Допускаемое напряжение, Па	$[\sigma]$	SIG

1	2	3
Допускаемый прогиб, м	[W]	WDOP
Плотность материала шнека, кг/м ³	ρ_1	RO1
Ускорение свободного падения, м/с ²	g	gu
Изгибающий момент, Н · м	$M_{и}$	Miz
Крутящий момент, Н · м	$M_{кр}$	MKR
Эквивалентное напряжение, Па	$\sigma_{эКВ}$	SIGEKV
Технологическая мощность, Вт	N	N
Угловая скорость шнеков $\omega = 2\pi n, c^{-1}$	ω	nw1
Максимальный прогиб шнека, м	f_{max}	fmax
Суммарный средний коэффициент заполнения	K	KK1
Эффективный градиент скорости сдвига, с ⁻¹	grad $\vartheta_1 - \text{grad } \vartheta_4$	GRADV1 – GRADV4
Зазор, м	δ	det

По результатам исследования разработана следующая методика инженерного расчета оптимальных технологических и конструктивных параметров двухшнековых смесителей:

1. Необходимые для расчета исходные данные: m_0 ; n_r ; ρ – соответственно, реологические константы и плотность высоковязкой композиции при температуре переработки $T_{пер}$; $v = -\frac{dV_c}{d\bar{n}}$ – коэффициент изменения качества смеси за один оборот шнеков; $x_i, \leq x_i \leq x'_i$ – границы изменения варьируемых параметров и их начальные значения ($i = 1, \dots, 5$); ΔP – перепад давления по длине шнека; Q – производительность шнековой машины; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала шнека; J – индекс качества смеси (0,65...0,95).

2. Постановка задачи расчета.

В а р и а н т 1 : разработка производства высоковязких полимерных композиций экструзионным методом и проектирование нового оборудования.

В а р и а н т 2 : модернизация существующего процесса и оборудования при производстве высоковязких полимерных композиций.

3. По уравнениям [1, пп. 2.4, 2.5], при условии минимизации технологической мощности и соответствующих исходных данных и ограничениях (1) – (5), с помощью программного обеспечения определяются:

– **в а р и а н т 1** – оптимальные технологические (ω , N) и конструктивные (φ , h , D , e , e_k) параметры;

– **в а р и а н т 2** – оптимальные технологические (ω , N) и конструктивные (φ , h , e , e_k) параметры.

В случае если не будет найдено решение, то необходимо либо расширить границы изменения параметров управления, либо изменить заданный технологический режим процесса.

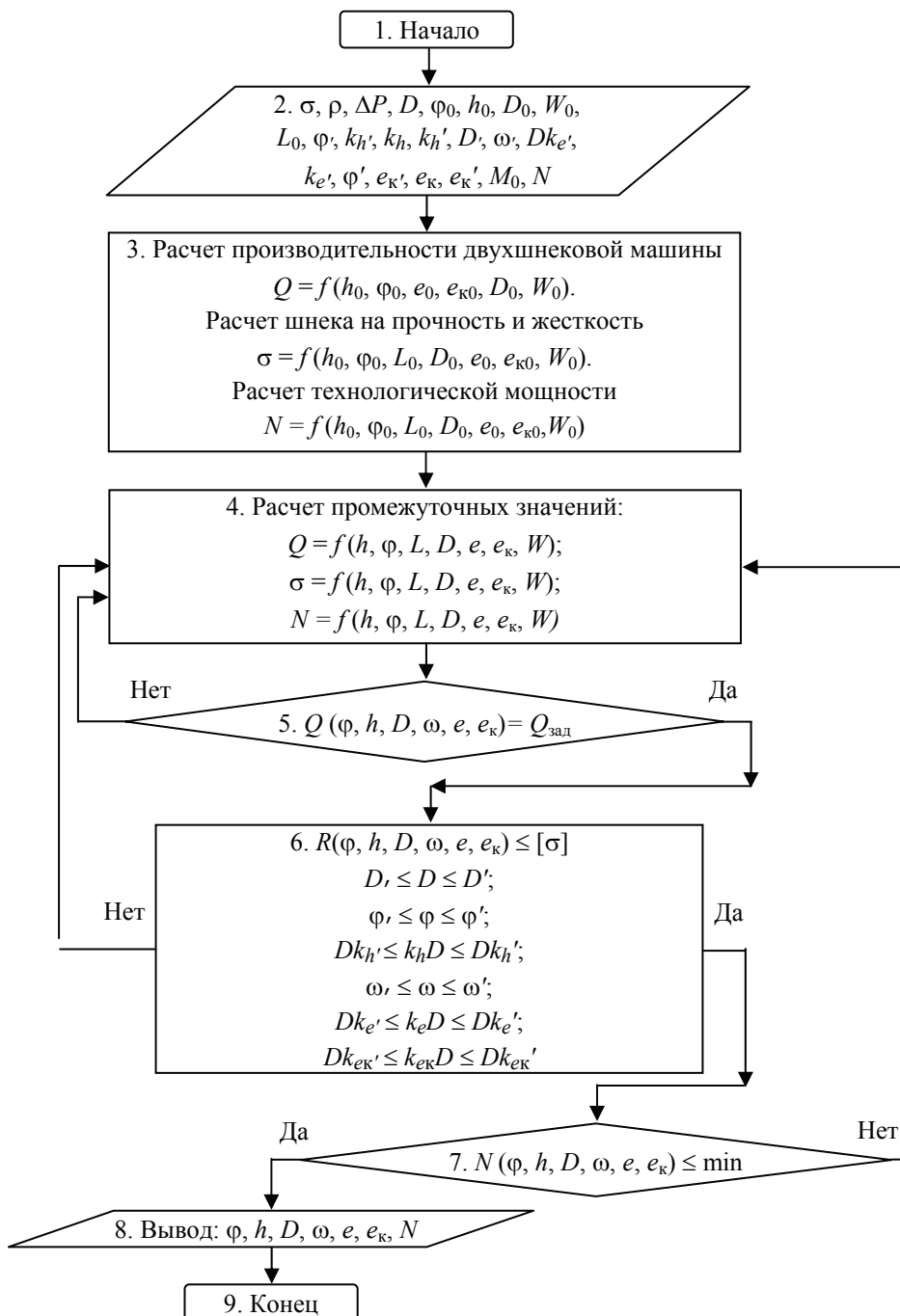


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета оптимальных технологических параметров процесса и конструктивных размеров оборудования для смешения высоковязких композиций

По данной методике проведен пример расчета.

1. Числовые значения исходных данных указаны выше.
2. Постановка задачи расчета. Вариант 1. Вариант 2.
3. Результаты оптимизации: вариант 1 (см. рис. 1, а); вариант 2 (см. рис. 2, б).

Список литературы

1. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин : монография / М. В. Соколов, А. С. Клинков, О. В. Ефремов [и др.]. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 248 с.
2. Sokolov, M. V. Determination of Total Shear During Processing of Rubber Stock / M. V. Sokolov // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2006. – Vol. 42, No. 7-8. – P. 413 – 416. doi: 10.1007/s10556-006-0117-y
3. Соколов, М. В. Математическое моделирование процесса экструзии резиновых смесей с учетом подвулканизации и степени пластикации профилированного экструдата / М. В. Соколов // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 440 – 451. doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.440-451
4. Химмельблау, Д. М. Прикладное нелинейное программирование / Д. М. Химмельблау ; пер. с англ. И. Н. Быховской, Б. Т. Вавилова ; под ред. М. Л. Быховского. – М. : Мир, 1975. – 536 с.

Calculation of Process and Design Parameters of Twin Screw Mixers with Minimization of Technological Capacity

M. V. Sokolov¹, P. S. Belyaev², A. S. Klinkov²

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (1),
msok68@mail.ru; Department of Materials and Technology (2),
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: adhesive composition; minimum technological capacity; material strength (stiffness, stability) of the screw; process and design parameters of twin-screw machines.

Abstract: The formulation of the optimization problem and its solution in the processing of adhesive compositions in twin-screw machines are considered under the condition of minimizing the technological capacity. An algorithm and a computer program for calculating the optimal technological and design parameters of twin screw mixers have been developed.

References

1. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Yefremov O.V., Belyayev P.S., Odnol'ko V.G. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye i raschet shnekovykh mashin: monografiya* [Computer-aided design and calculation of screw machines: monograph], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2004, 248 p. (In Russ.)
2. Sokolov M.V. Determination of Total Shear During Processing of Rubber Stock, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2006, vol. 42, no. 7-8, pp. 413-416, doi: 10.1007/s10556-006-0117-y
3. Sokolov M.V. [Mathematical modeling of the process of extrusion of rubber compounds, taking into account scorching and the degree of plasticization of the profiled extrudate], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 440-451, doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.440-451 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Khimmel'blau D.M. *Applied Nonlinear Programming*, McCraw-Hill Book Company, 1972.

Berechnung der technologischen und konstruktiven Parameter von Doppelschneckenmischern bei Minimierung der technologischen Kapazität

Zusammenfassung: Es ist die Formulierung des Optimierungsproblems und dessen Lösung bei der Verarbeitung von Klebstoffzusammensetzungen in Zweischnellenmaschinen unter der Bedingung der Minimierung der technologischen Leistung betrachtet. Es sind der Algorithmus und das Computerprogramm zur Berechnung der optimalen technologischen und konstruktiven Parameter von Doppelschneckenmischern entwickelt.

Calcul des paramètres technologiques et structurels des mélangeurs à double vis lors de la minimisation de la puissance de traitement

Résumé: Sont examinées la définition du problème de l'optimisation et sa solution lors du traitement des compositions adhésives dans des machines à double vis, à condition de minimiser la puissance technologique. Sont élaborés l'algorithme et le programme pour le calcul des paramètres technologiques et structurels optimaux des mélangeurs à deux vis.

Авторы: *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология»; *Клинков Алексей Степанович* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.