

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСТРУДЕРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОДУКЦИИ С ЗАДАНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА

В статье приведено аналитическое описание получения параметров экструзионного процесса, которые характеризуют качество выпускаемой продукции – это импульсы касательных и нормальных напряжений. Прочность гранул зависит от сжимающих напряжений, а смешивание и однородность продукта – от касательных напряжений, которые имеют существенные значения в шнеке, компрессионном затворе и в фильерах матрицы экструдера. Разработанная программная система «Расчет технико-экономических параметров одношнековых экструдеров», позволяет находить параметры процесса экструдирования: кпд, производительность, силу, действующую на рабочие органы, мощность, время прессования, крутящий момент, импульсы нормальных и касательных напряжений. В качестве исходных данных используются геометрические и конструктивные параметры экструдера, скорость вращения шнека и реологические свойства материала. В статье описано как с изменением геометрических размеров шнека изменяется импульс касательных напряжений. Варьируя геометрическими размерами шнека, увеличиваются касательные напряжения для улучшения однородности готовой продукции. Параметрический синтез проведен с использованием программной системы векторной оптимизации. Приведена методика проведения векторной оптимизации шнека (изменение шага, высоты и толщины лопастей) и описана работа программного средства.

На основании полученных результатов установлено, что, изменяя геометрические параметры, можно получить экструдированные продукты с заданными показателями качества, а также оптимизировать технологический процесс.

Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать труд инженера-конструктора, занимающегося проектированием и совершенствованием экструзионной техники. Это делает возможным на этапе эскизного проектирования создавать экструзионную технику для производства продукции с заданными показателями качества, с учетом ограничений на энергоёмкость технологического процесса.

Ключевые слова: экструзионный процесс, математическое моделирование, импульсы касательных напряжений, импульсы нормальных напряжений, шнек, компрессионный затвор, матрица, векторная оптимизация, программная система, вычислительный эксперимент.

В настоящее время экструдированная продукция находит широкий спектр применения. Экструдеры используются в химической промышленности, при производстве и переработке пластических масс, в резинотехнической, силикатной, бумажной, металлургической, оборонной промышленности, в сельском хозяйстве, а также в пищевых отраслях промышленности – макаронной, винодельческой, консервной, сахарной, мясной, комбикормовой, масложировой, маргариновой и др.

Качество экструдированных продуктов в значительной степени зависит от прочности и степени гомогенизации гранул.

Для характеристики качества гранул используют импульсы S_σ напряжений сжатия и S_τ напряжений сдвига прессуемого материала [1]–[3].

Условие образования прочной гранулы оценивается импульсом S_σ сжимающих напряжений σ_c , смешивание и гомогенизация продукта – импульсом S_τ касательных напряже-

ний τ . В шнековом прессующем механизме (рис. 1) эти импульсы имеют существенное значение в винтовых каналах шнека, в фильерах матрицы и компрессионных затворах прессующего механизма [4], [5].

Движение прессуемого материала в экструдере представим как движение между парами параллельных плоскостей, при этом сохраняется свойство непрерывности объемной производительности в шнековом механизме. Для более точного описания технологического процесса экструдера разбивается на секции, т.е. на элементарные шнековые прессующие механизмы с условно постоянными параметрами прессования [6].

Определим показатели качества в шнеке, в компрессионных затворах и фильерах матрицы экструдера. Для этого представим плоскую модель шнека и компрессионного затвора в системе прямоугольных координат $Oxyz$ (рис. 2). Расстояния между пластинами равны $h_{ш}$ – высоте лопастей шнека и h_k – высоте компрессионного затвора.

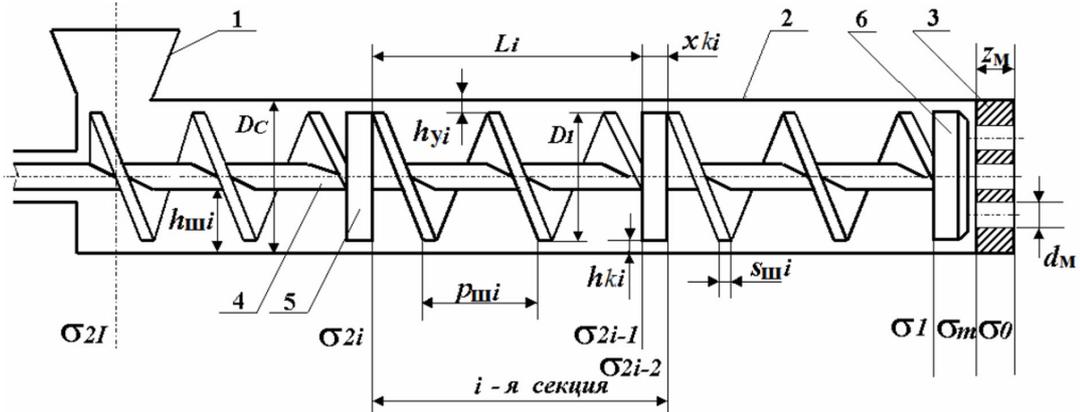


Рисунок 1 – Схема прессующего механизма: 1 – загрузочное устройство; 2 – шнековый цилиндр; 3 – матрица; 4 – шнек; 5 – компрессионный затвор, 6 – головка экструдера

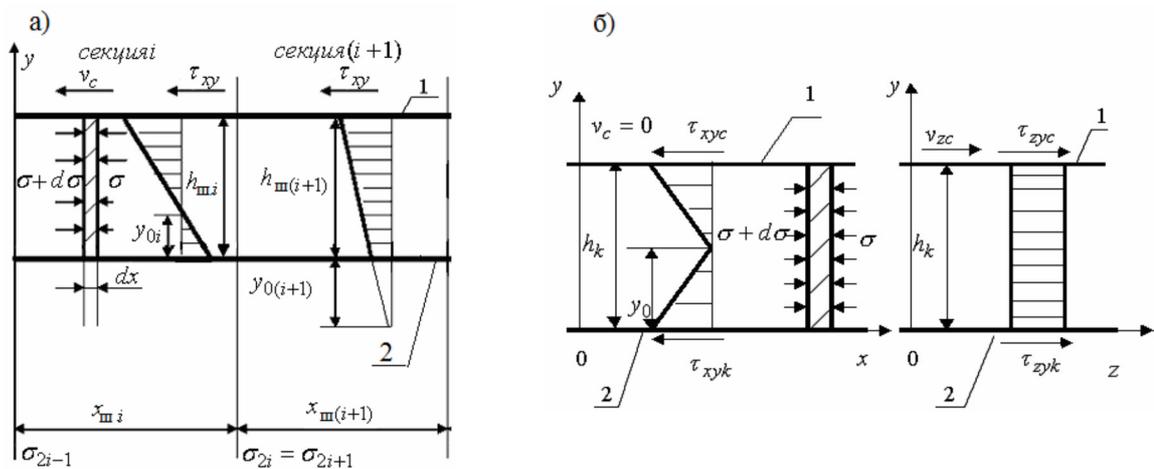


Рисунок 2 – Схемы модели шнекового канала (а) и компрессионного затвора (б): 1 – плоскость, замещающая шнековый цилиндр (а, б); 2 – плоскость, замещающая дно шнекового канала (а), плоскость, замещающая боковую поверхность компрессионной шайбы (б)

Импульс сжимающих напряжений, получаемый потоком прессуемого материала, рассчитываем:

$$S_{\sigma} = S_{\sigma m} + \sum_{i=1}^I (S_{\sigma_{ki}} + S_{\sigma_{wi}}),$$

где $S_{\sigma m}$ – импульс сжимающих напряжений, получаемый материалом в фильерах матрицы;

$S_{\sigma_{ki}}$, $S_{\sigma_{wi}}$ – импульсы сжимающих напряжений в компрессионном затворе и канале шнека i -й секции;

I – число всех секций в экструдере.

Импульс, получаемый продуктом в канале шнека i -й секции:

$$S_{\sigma_{wi}} = \int_0^{t_{wi}} \sigma_c dt = \frac{\sigma_{2i-1} - \sigma_{2i}}{2} t_{wi},$$

где t_{wi} – время нахождения продукта в канале шнека i -й секции;

σ_i – напряжение в i -й секции.

Для компрессионного затвора:

$$S_{\sigma_{ki}} = \int_0^{t_{ki}} \sigma_c dt = \frac{\sigma_{2i-1} - \sigma_{2i-2}}{2} t_{ki},$$

где t_{ki} – время нахождения продукта в компрессионном затворе i -й секции.

Для канала фильеры матрицы:

$$S_{\sigma m} = \int_0^{t_m} \sigma_c dt = \frac{\sigma_m}{2} t_m,$$

где t_m – время прессования продукта в матрице.

Время прессования в шнековом канале:

$$t_{wi} = \frac{x_{wi}(p_{wi} - q_i s_{wi}) \cos \alpha_i h_{wi}}{Q_{wi}},$$

где x_{wi} – протяженность развертки на плоскость канала i -й секции шнека;

p_{wi} – шаг винтовой линии канала шнека i -й секции;

q_i – число заходов шнека i -й секции;

s_{wi} – толщина винтовой лопасти шнека i -й секции;

α_i – угол подъема винтовой лопасти i -й секции шнека на цилиндрической поверхности диаметром D_c ;

h_{wi} – глубина шнекового канала i -й секции;

Q_{wi} – объемная производительность шнекового канала i -й секции.

Время прессования в компрессионном затворе:

$$t_{ki} = \frac{x_{ki} \pi D_c h_{ki}}{Q_{ki}},$$

где x_{ki} – осевая протяженность компрессионного затвора в i -й секции шнекового механизма;

h_{ki} – радиальная высота компрессионного затвора в i -й секции;

Q_{ki} – объемная производительность компрессионного затвора i -й секции шнекового механизма.

Время прессования в фильерах матрицы:

$$t_m = \frac{z_m \pi d_m^2}{4Q_\phi},$$

где z_m – длина канала фильеры;

d_m – диаметр фильеры;

Q_ϕ – объемная производительность одной фильеры.

Общий импульс касательных напряжений, получаемый материалом в шнековом прессующем механизме:

$$S_\tau = S_{\tau m} + \sum_{i=1}^I (S_{\tau ki} + S_{\tau wi}),$$

где $S_{\tau m}$ – импульс касательных напряжений, получаемый материалом в фильерах матрицы;

S_{wi} , $S_{\tau ki}$ – импульсы касательных напряжений в канале шнека и компрессионном затворе i -й секции (рис. 2) [6, 7].

Импульс касательных напряжений τ_i в канале i -й секции шнека:

$$S_{wi} = \int_0^{t_{wi}} |\tau_i| dt = \mu_i (\gamma_{xcp})^{ni} t_{wi},$$

где μ_i – коэффициент консистенции, зависящий от природы материала в i -й секции;

γ_{xcp} – средняя скорость сдвига по высоте канала шнека;

$$\gamma_{xcp} = \frac{1}{h_{wi}} \int_0^{h_{wi}} \gamma_{xi} dz =$$

$$= \frac{a_{wi}}{h_{wi}(m_i + 1)} [(h_{wi} - y_{0i}) - (-y_{0i})^{m_i + 1}],$$

где a_{wi} – коэффициент, зависящий от консистенции материала, индекса течения и градиента нормальных напряжений в прессуемом материале;

y_{0i} – координата точки, где касательные напряжения равны нулю;

m_i – величина, обратная индексу течения, $m = 1/n$, n – индекс течения, характеризующий отклонение свойств материала от свойств ньютоновской жидкости.

Суммарное касательное напряжение в компрессионном затворе:

$$|\tau_{ki}| = \sqrt{[\mu_i (\frac{\omega D_c}{2h_{ki}})^{n_i}]^2 + \left| \frac{\sigma_{2i-1} - \sigma_{2i-2}}{x_{ki}} \right|^2 \left| \frac{h_{ki}}{4} \right|^2}.$$

Импульс касательных напряжений на прессуемый материал в i -м компрессионном затворе:

$$S_{\tau ki} = \int_0^{t_{ki}} |\tau_{ki}| dt =$$

$$= t_{ki} \sqrt{[\mu_i (\frac{\omega D_c}{2h_{ki}})^{n_i}]^2 + \left| \frac{\sigma_{2i-1} - \sigma_{2i-2}}{x_{ki}} \right|^2 \left| \frac{h_{ki}}{4} \right|^2}.$$

Импульс касательных напряжений в канале фильеры матрицы шнекового прессующего механизма:

$$S_{\tau m} = \int_0^{t_m} |\tau_1| dt = \frac{\tau_1}{2} t_m.$$

В поперечном сечении каждой фильеры касательные напряжения τ_1 будем полагать постоянными по величине и направлению и определим их следующим образом [6]:

$$\tau_1 = \mu_1 \left(\frac{32Q_\phi}{\pi d_m^3} \right).$$

Таким образом, получены аналитические

зависимости нахождения импульсов нормальных и касательных напряжений по геометрическим, конструктивным, кинематическим параметрам процесса экструдирования и реологическим свойствам обрабатываемого материала.

Разработанная программная система (ПС) «Расчет технико-экономических параметров одношнековых экструдеров» [8], позволяющая находить параметры процесса экструдирования (кпд, производительность, силу, действующую на рабочие органы, мощность, время прессования, крутящий момент, импульсы нормальных и касательных напряжений), используя геометрические параметры (диаметр шнека D_1 , шаг винтовой полости $p_{ш}$, высоту лопасти шнека $h_{ш}$, толщину лопасти $s_{ш}$, высоту h_k и ширину x_k компрессионного затвора, диаметр d_m и длину канала фильеры z_m); конструктивные параметры (число заходов шнека, число фильер); скорость вращения шнека и реологические свойства материала μ и n (рис. 3) [9]–[11].

В экструдере шнек, компрессионный затвор и матрица являются сменными рабочими органами, которые можно менять в зависимости от требований к готовой продукции и технологическому процессу.

Изменяя геометрические размеры шнека, компрессионного затвора и фильеры матрицы, можно изменять качественные показатели экструзионного процесса. С целью увеличения касательных напряжений будем изменять геометрические размеры шнека [8].

Для проведения параметрического синтеза использовали ПС «Программная система проведения параметрической векторной оптимизации» [12]–[16].

Использовали следующие значения геометрических размеров одношнекового экструдера (рис.1): $D_1=0,0542$ м; $L=0,4$ м; $s_{ш}=0,007$ м; $h_{ш}=0,0125$ м; $h_k=0,0041$ м; $x_k=0,05$ м; $z_m=0,01$ м; $d_m=0,011$ м; $h_y=0,008$ м. Шнек имеет один заход, в матрице одна фильера. В эксперименте использовали реологические свойства измельченной зерновой смеси (пшеница, рожь, ячмень) при влажности 28%, скорость вращения шнека ω изменяли от 10 рад/с до 25 рад/с.

Значения шага винтовой полости выбраны в следующем порядке $p_{ш1}=0,035$; $p_{ш2}=0,04$; $p_{ш3}=0,045$; $p_{ш4}=0,05$ в метрах, скорость вращения шнека ω изменяли: 10, 13, 15, 20, 23 рад/с.

Чтобы технологический процесс не был энергоемким заданы следующие ограничения:

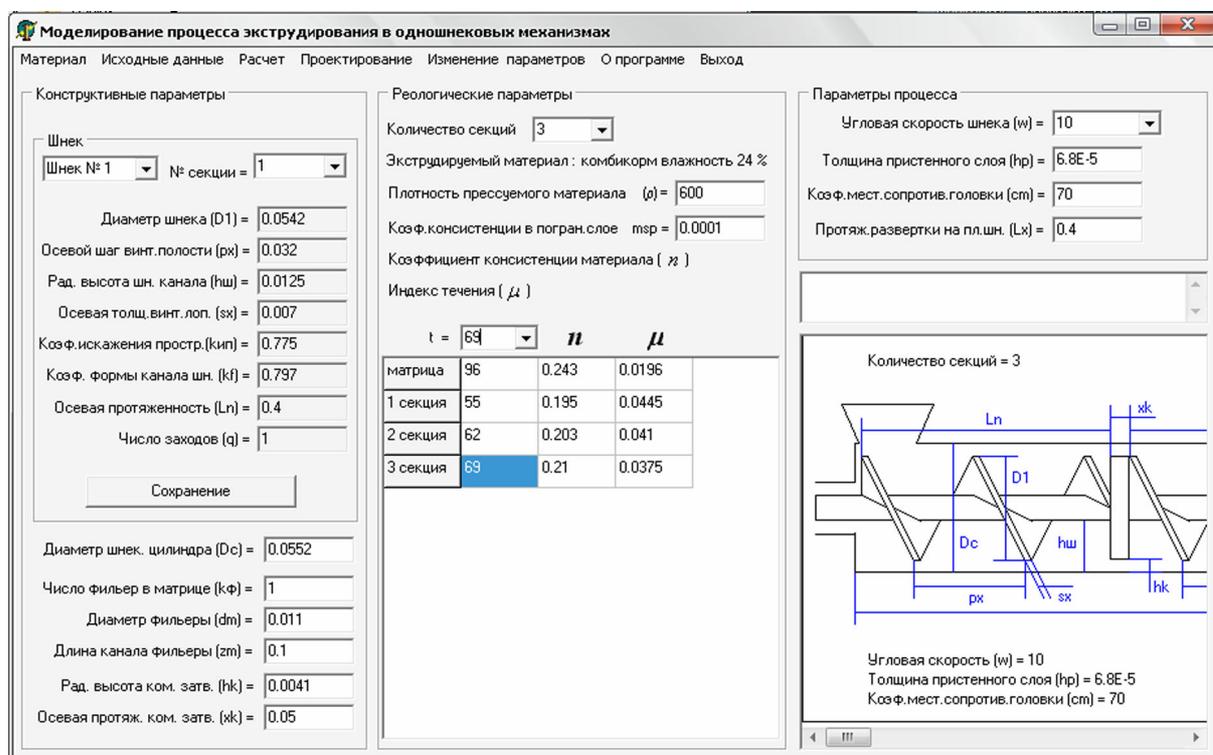


Рисунок 3 – Основное окно ПС расчета технико-экономических параметров процесса экструдирования

коэффициент полезного действия должен быть не менее 2,5%; потребляемая мощность N не более 5 кВт; производительность Q не менее 30 кг/час; импульс касательных напряжений S_τ не менее 2,5 МПа·с. На рисунке 4 показаны значения этих параметров при изменении скорости вращения для каждого варианта изменения шага (конструкции 0-3).

В закладке «Задание» можно ввести новые данные (например, полученные с помощью физического эксперимента) или открыть данные, сохраненные в результате вычислительного эксперимента (рис. 4). В нижней части основного окна вводятся ограничения параметров, которые по семантике могут задавать границу сверху, снизу или диапазон. В закладке «Параметры» можно ввести названия исследуемых переменных, как основных, так и вспомогательных (рис. 5).

ПС строит зависимости выбранных параметров в виде графиков, как показано на рисунке 6-8 (закладка «График»), с учетом введенных ограничений. Первая конструкция изображается зеленым, вторая – черным, третья – розовым, четвертая – желтым цветом (на рисунках они указаны позициями 1-4, 5 – ограничение

	St	Q	кпд	N
▶ 4	21.4	27.4	2.74	1.71
	3.25	27.7	2.77	2.34
	2.9	31.8	2.79	2.78
	2.3	42.2	2.8	3.92
* 2.1	47.8	2.82	4.68	

	St	Q	кпд	N
MAX	4.200	48.800	2.820	5.318
MIN	2.100	21.380	2.430	1.710
Ограничение сверху				5
Ограничение снизу	2.5	30	2.5	
▶*				

Рисунок 4 – Загрузка исходных данных

	Имена параметров
▶ 1й основной	St
2й основной	Q
1й вспомогательный	кпд
* 2й вспомогательный	N

Рисунок 5 – Идентификация параметров

соответственно по кпд, N , S_τ 6 – ограничение по Q).

При нажатии закладки «Область», получаем оптимальную область, т.е. значения тех геометрических размеров шага винтовой полости шнека, которые удовлетворяют заданным ограничениям, оптимальная область изображается голубым цветом (рис. 8).

Результаты расчетов [8] показали, что оптимальная скорость вращения шнека 15-20 рад/с, т.к. при скорости 10-15 рад/с все варианты конструкций не проходят по ограничению производительности, а при скорости 20-25 рад/с все конструкции не проходят по ограничению импульса касательных напряжений. Все остальные ограничения влияние на оптимальную область не оказывают. Наибольшее значение импульса касательных напряжений принимает при $p_{ш4} = 0,05$ м.

Оставив все геометрические размеры прежними, приняв шаг $p_{ш} = 0,05$ м, будем изменять толщину винтовой лопасти шнека. Значения параметра $s_{ш}$ выбраны

следующими $s_{ш1}=0,005$; $s_{ш2}=0,007$; $s_{ш3}=0,009$; $s_{ш4}=0,011$ в метрах. В результате получаем следующую оптимальную область (рис.9).

Расчетные данные приведены в таблице.

На рисунке 9 позициями 1-4 показаны зависимости $S_r(Q)$ для шнеков с разной толщиной лопасти, 5 – ограничения по импульсу касательных напряжений, 6 – ограничения по

производительности, 7 – ограничения по мощности, 8 – ограничения по кпд. Оптимальная область выделена цветом. Из рисунка 9 видно, что наибольшие значения импульса касательных напряжений при $s_{ш4}=0,011$ м. Оптимальная скорость вращения 15-23 рад/с, при других значениях результаты не проходят по производительности и импульсу касательных напря-

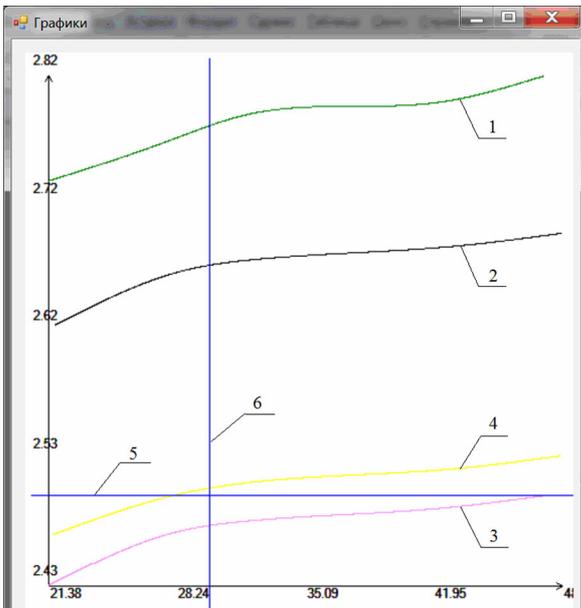


Рисунок 6 – Зависимость кпд от производительности

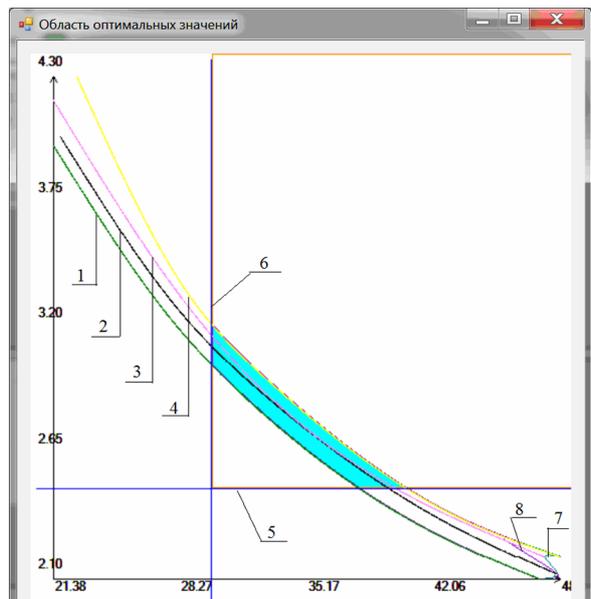


Рисунок 8 – Зависимость импульса касательных напряжений от производительности. Оптимальная область при изменении шага лопасти шнека

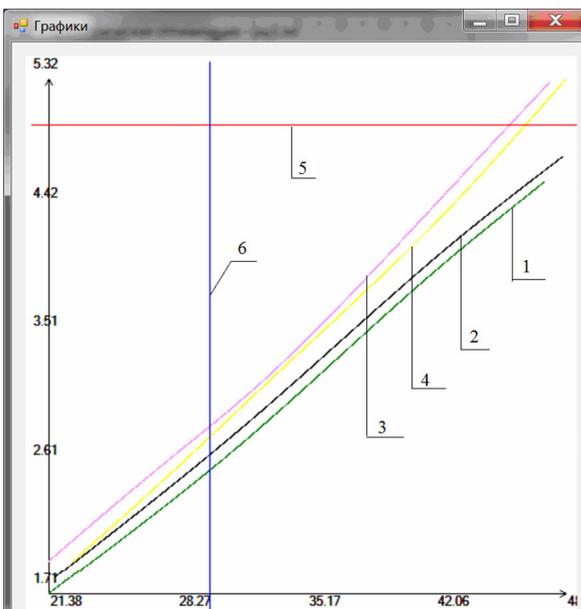


Рисунок 7 – Зависимость потребляемой мощности от производительности

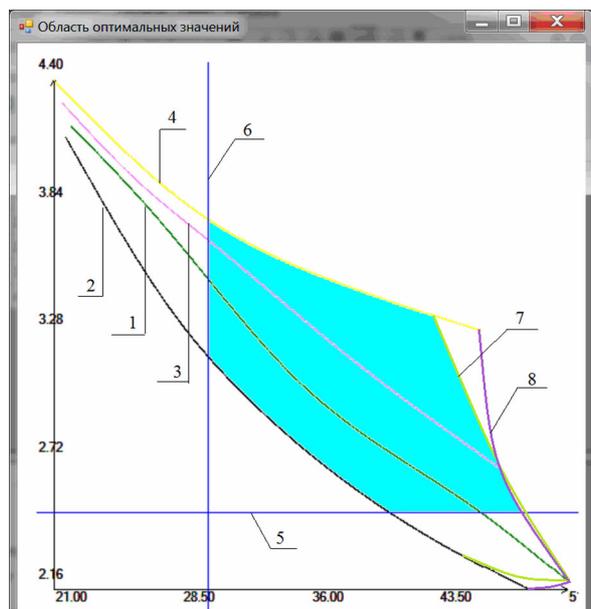


Рисунок 9 – Оптимальная область при изменении толщины лопасти шнека

Таблица – Расчетные данные

	$s_1=0,005$				$s_2=0,007$				$s_3=0,009$				$s_4=0,011$			
	S	Q	N	кпд												
10	4,2	22,0	1,6	3,4	4,2	21,7	1,9	2,85	4,3	21,5	1,8	2,5	4,4	21,0	1,9	2,6
13	3,8	27,0	2,2	3,5	3,4	28,2	2,7	2,9	3,9	26,1	2,5	2,6	4,1	25,2	2,6	2,7
15	3,1	35,1	2,9	3,55	3,0	32,4	3,2	2,95	3,7	30,2	2,9	2,65	3,9	28,1	3,1	2,75
20	2,5	46,2	3,7	3,6	2,4	43,0	4,5	3,0	3,2	38,1	4,1	2,7	3,5	38,0	4,3	2,85
23	2,2	51,2	4,4	3,65	2,2	48,8	5,3	3,1	2,7	47,1	5,0	2,8	3,3	46,2	5,2	2,9
	$h_1=0,011$				$h_2=0,012$				$h_3=0,013$				$h_4=0,014$			
	S	Q	N	кпд												
10	4,7	27,0	1,5	4,1	5,0	27,3	1,4	4,51	5,2	27,4	1,3	4,76	5,5	26,8	1,7	3,7
13	4,5	35,1	2,0	4,15	4,8	35,3	1,9	4,52	5,1	35,5	1,8	4,77	5,4	34,7	2,3	3,71
15	4,4	40,2	2,5	4,2	4,7	40,5	2,3	4,54	5,0	40,9	2,1	4,79	5,3	40,0	2,8	3,72
20	4,4	53,2	3,4	4,25	4,5	53,8	3,2	4,55	4,8	54,3	3,0	4,8	5,2	53,5	3,9	3,73
23	4,2	61,1	4,2	4,28	4,4	61,7	3,9	4,58	4,7	62,2	3,6	4,84	5,1	61,0	4,7	3,74

жений. Приняв $s_{ш} = 0,011$, $p_{ш} = 0,05$, изменяем высоту лопасти шнека следующим образом $h_{ш1} = 0,011$; $h_{ш2} = 0,012$; $h_{ш3} = 0,013$; $h_{ш4} = 0,014$ в метрах (расчетные данные приведены в таблице). Полученная оптимальная область показана на рисунке 10.

Позициями 1-4 показаны зависимости $S_r(Q)$ для шнеков с разной высотой лопасти, 5 – ограничения по производительности, 6 – ограничения по кпд. Наибольшие значения импульс касательных напряжений принимает при высоте лопасти шнека равной $h_{ш} = 0,014$ м.

Этот процесс можно продолжить, изменяя размеры компрессионного затвора и фильеры матрицы. Также варьируя геометрическими параметрами, можно изменять импульсы нормальных напряжений.

Таким образом, проведением вычислительного эксперимента установлено:

- при изменении геометрических размеров шнека изменяется импульс касательных напряжений;
- с увеличением скорости вращения шнека импульс касательных напряжений уменьшается;
- увеличение габаритных размеров шнека увеличивает импульс касательных напряжений;
- в результате подбора геометрических размеров и скорости вращения шнека импульс касательных напряжений в среднем увеличился с 3 до 5 МПа·с.

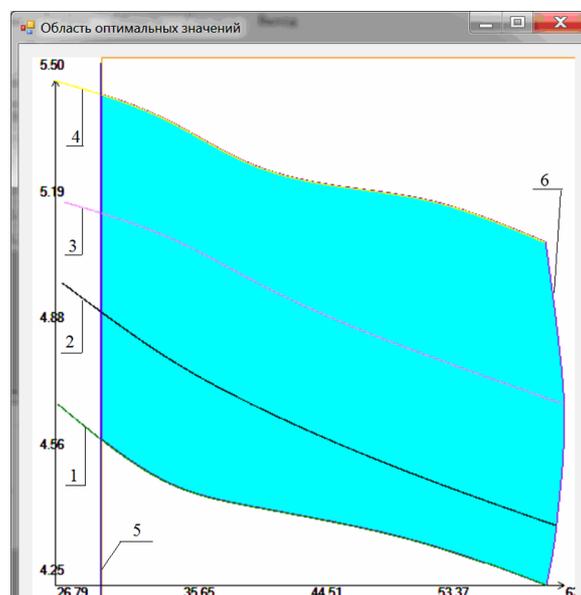


Рисунок 10 – Оптимальная область при изменении высоты лопасти шнека

На основании полученных результатов установлено, что, изменяя геометрические параметры, можно получать экструдированные продукты требуемого качества, а также оптимизировать технологический процесс.

Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать труд инженера-конструктора, занимающегося проектированием и совершенствованием экструзионной техники.

8.02.2015

Работа выполнена при финансовой поддержке
правительства Оренбургской области и РФФИ, грант № 14-08-97031

Список литературы:

1. Зубкова, Т.М. Зависимость показателей качества кормов от параметров экструдера [Текст]/Т.М.Зубкова, А.Н.Колобов//Техника в сельском хозяйстве. – 2008. – № 5. – С. 12-14.
2. Зубкова, Т.М. Физические эксперименты для определения показателей качества экструдированной продукции [Текст]/Т.М.Зубкова, А.Н.Колобов, Н.А.Мустюков//Вестник РАСХН. – 2012. – № 4. – С. 7-9.
3. Карташов, Л.П. Об оценке качества экструдирования [Текст] / Л.П. Карташов, Т.М. Зубкова // Техника в сельском хозяйстве – 2002. –№3. –С. 19-21.
4. Коротков, В.Г. Оценка процесса смещения экструдированного продукта в канале шнека [Текст] /В.Г. Коротков, Т.М. Зубкова, Д.А. Мусиенко //Вестник Оренбургского государственного университета –2000. – №3. –С. 104-106.
5. Коротков, В.Г. Перемешивание экструдированного материала в цилиндрическом канале [Текст]/ В.Г. Коротков, Т.М. Зубкова, Д.А. Мусиенко //Вестник Оренбургского государственного университета –2001. – №1. – С. 133-135.
6. Карташов, Л.П. Параметрический и структурный синтез технологических объектов на основе системного подхода и математического моделирования [Текст]: монография / Л.П. Карташов, Т.М. Зубкова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 225 с.
7. Зубкова, Т.М. Разработка методологии математического моделирования технологических объектов/ Т.М. Зубкова// Вестник Оренбургского государственного университета – 2002. –№2. – С. 209-213.
8. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2011612043. Расчет технико-экономических параметров одношнековых экструдеров / Н.А. Мустюков, Т.М. Зубкова, М.А. Корякина. РОСПАТЕНТ № 2010617272. Заявлено 19.11.2010. Опубликовано 05.03.2011.
9. Зубкова, Т.М.Использование программных систем для проведения оценки качества готовой продукции и прочности гранул [Текст] /Т.М. Зубкова, А.Н. Колобов// Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии. Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, –2007. – С. 128-130.
10. Зубкова Т.М. Методика нахождения внутренних характеристик системы технологического объекта / Т.М. Зубкова, Н.А. Мустюков // Компьютерная интеграция производства и ИПИ – технологии: сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2011. – С. 220-225.
11. Зубкова, Т.М. Исследование влияния геометрических размеров конструктивного параметра на показатели качества технологического процесса /Т.М. Зубкова, А.Н. Колобов, Н.А. Мустюков, М.А. Токарева // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике: сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2014. – С. 23-25.
12. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2013660216. Программная система проведения параметрической векторной оптимизации / Т.М. Зубкова, Е.Н. Ишакова, М.И. Кузьмин. РОСПАТЕНТ №2013617837. Заявлено 02.09.2013. Опубл. 28.10.2013.
13. Зубкова, Т.М. Методика оптимизации технологических объектов/ Т.М. Зубкова// Вестник Оренбургского государственного университета – 2002. –№3. – С. 155-158.
14. Зубкова, Т.М. Разработка программного обеспечения визуализации процедуры многомерной оптимизации функциональных показателей технологического процесса [Текст]/Т.М. Зубкова, Е.Н. Ишакова, М.А. Токарева //Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО – 2014. – №3. – С.156-162.
15. Зубкова, Т.М. Параметрический синтез технологических объектов с использованием программных средств /Т.М. Зубкова// Вестник Оренбургского государственного университета – 2006. –№5. С. 150-157.
16. Зубкова, Т.М. Программная система по автоматизации проектирования одношнекового экструдера/ Т.М. Зубкова, Н.А. Мустюков// Современные информационные технологии в науке, образовании и практике. Материалы IX всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Оренбург: ООО «КОМУС», – 2010. – С. 24-27.

Сведения об авторах:

Колобов Алексей Николаевич, доцент кафедры информатики
Оренбургского государственного университета,
кандидат технических наук

Зубкова Татьяна Михайловна, профессор кафедры программного
обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем
Оренбургского государственного университета,
доктор технических наук, профессор, e-mail: bars87@mail.ru