



DOI 10.51885/1561-4212_2025_3_45
MPNТИ 68.43.29

ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЗЕРНОВОГО ЭКСТРУДЕРА ОТ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ ШНЕКОВОЙ ГРУППЫ

АСТЫҚ ЭКСТРУДЕРІНІҢ ЖҰМЫС ТИІМДІЛІГІНІҢ БҰРАНДАЛЫ ТОП БӨЛШЕКТЕРІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІНЕ ТӘУЕЛДІЛІГІ

THE DEPENDENCE OF THE EFFICIENCY OF THE GRAIN EXTRUDER ON THE PARAMETERS OF THE SCREW GROUP PARTS

А.В. Вавилов ¹, Г.А. Гурьянов ², М.В. Дудкин ², А.И. Ким ³, В.С. Яковлев ²

¹ТОО «НПО ИННОТЕХ», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

²Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

⁴Университет «МИРАС», г. Шымкент, Казахстан

Ключевые слова:

экструдер, затвор,
компрессионные
кольца, противоток
материала,
производительность
экструдера, головка
фильеры

АННОТАЦИЯ

Данные исследования направлены на обоснование и подтверждение эффективности рабочего процесса зернового экструдера при варьировании его эксплуатационными параметрами при работе с зерновой смесью, дополненной до трети объема отходами растениеводства и лесозаготовок. Серийные экструдеры уже настроены для работы с определенными зерновыми смесями, и добавление в их состав каких-либо иных включений может привести к нарушению рабочего процесса или к поломке шнековой группы экструдера. Чтобы рабочий процесс экструдера был надежен и экономически выгоден, приходится иногда конструктивно менять некоторые детали или узлы шнековой группы, чему и посвящено данное научное исследование. В эксперименте использовали кормовую зерновую смесь, состоящую из 85-87 % зерновой насыпки, 10-13 % отходов уборки подсолнечника и до 3 % добавок пихтовой хвои, насыщенных витаминами. Полученные результаты позволили заключить, что любые отходы растениеводства, если они предварительно были измельчены, могут добавляться в зерновые смеси для экструдирования. Мощности экструдера и запаса надежности его шнековой группы достаточно для переработки отходов уборки подсолнечника с добавлением хвои пихты сибирской.

Түйінді сөздер:

экструдер, ысырма,
қысу сақиналары,
материалға қарсы
ағын, экструдердің
өнімділігі, сүзгі
басы

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл зерттеулер астық экструдерінің жұмыс процесінің тиімділігін негіздеуге және растауға бағытталған, оның пайдалану параметрлері толықтырылған астық қоспасымен, көлемнің үштен біріне дейін, Өсімдік шаруашылығы мен ағаш кесу қалдықтарымен жұмыс істеу кезінде өзгереді. Сериялық экструдерлер қазірдің өзінде белгілі бір астық қоспаларымен жұмыс істеуге бейімделген және олардың құрамына басқа қоспалар қосу жұмыс процесінің бұзылуына немесе экструдер бұрандалы тобының бұзылуына әкелуі мүмкін. Экструдердің жұмыс процесі сенімді және үнемді болуы үшін кейде осы ғылыми зерттеуге арналған бұрандалы топтың кейбір бөлшектерін немесе түйіндерін сындарлы түрде өзгерту керек. Тәжірибеде 85-87 % астық үйіндісінен, 10-13 % құнбағыс жинау қалдықтарынан және



3 % дейін дәрумендермен қаныққан шырша инелерінен тұратын жемдік астық қоспасы қолданылды. Нәтижелер өсімдік шаруашылығының кез келген қалдықтары, егер алдын ала ұсақталған болса, экструдтау үшін астық қоспаларына қосылуы мүмкін деген қорытындыға келді. Экструдердің қуаты және оның бұрандалы тобының сенімділік қоры сібір шыршасының инелерін қосып, күнбағыс жинау қалдықтарын өңдеуге жеткілікті.

Keywords:

Extruder, gate, compression rings, material counterflow, extruder performance, die head

ABSTRACT

These studies are aimed at substantiating and confirming the efficiency of the working process of a grain extruder when varying its operational parameters when working with a grain mixture supplemented, up to a third of the volume, with crop production and logging waste. Serial extruders are already configured to work with certain grain mixtures, and the addition of any other inclusions to their composition may lead to disruption of the workflow or damage to the screw group of the extruder. In order for the working process of the extruder to be reliable and economically profitable, it is sometimes necessary to constructively change some parts or assemblies of the screw group, which is the subject of this scientific study. The experiment used a feed grain mixture consisting of 85-87% of grain bulk, 10-13% of sunflower harvest waste and up to 3% of fir needles saturated with vitamins. The results obtained allowed us to conclude that any crop production waste, if it was previously crushed, can be added to grain mixtures for extrusion. The capacity of the extruder and the reliability reserve of its screw group are sufficient for processing sunflower harvesting waste with the addition of Siberian fir needles.

ВВЕДЕНИЕ

Можно ли увеличить производительность серийно выпускаемого экструдера, не повышая потребление энергии и не переделывая капитально его конструкцию, без внешнего вмешательства в основные узлы? Так как экструдер широко распространен в сельскохозяйственном производстве, то и предложений по его модернизации достаточно.

Современное растениеводство изобилует не только полезным продуктом, но и его остатками, которые или не перерабатываются, или вообще не убираются с полей. К таким остаткам относятся жмых, шляпки и стебли подсолнуха, полные полезных веществ, объемные по заполнению и хорошо поедаемые животными после их переработки. За счет их относительной дешевизны, особенно стеблей и шляпок, возможно оборудование уборочных комбайнов отдельным приспособлением, которое будет собирать и производить первичную обработку шляпок и стеблей подсолнуха, стоимость которых будет близка к нулю. Затем предлагается измельченную массу из отходов подсолнечника (гречки, сои, гороха ... хвои пихты сибирской) добавлять до трети объема в зерновые кормовые смеси, идущие на переработку в экструдеры. Влияние подобных добавок на надежность шнековой группы экструдеров проверено в работах многих ученых (Mu et al., 2023; Chuikov, Kononov, Dontsova, & Petrova, 2024; Mironov, Obolenskiy, Goeva, & Grishin, 2019; Bulatov, 2015; Doudkin, Kim, Yakovlev, Vasilkov, Asangaliev, & Moldakhanov, 2025). Причем проверялось всё: шнековые секции, валы экструдера, корпусные детали, фильеры, рамы, шкивы и т.д. К таким исследованиям можно отнести труды Kraugerud & Svihus (2011), Kushnir, Gavrilov & Shkotova (2019), Li, Xiong & Li (2019), Kabdusheva et al. (2020), Liu et al. (2020), Frolov, Kotelevskaya & Tumanova (2020), Machikhin, Zurabishvili & Panfilova (1991), Kukhta (1987), Kurnish, Gavrilov & Kim (2016), Doudkin et al. (2025), Morozov, Bogdanov, Smelik, Volkhonov & Kukhar (2021) и др.

Например, Adache, Mogaji, Olabanji Olayinka & Ayodeji Olagoke (2025) занимались исследованием надежности шнека и рамы экструдера. Были изучены деформации материала шнека и рамы экструдера при их различном нагружении.

Yadav, Jha & Darlami (2023) усовершенствовали шнековый вал экструдера для переработки различной суспензии при производстве органических удобрений.



Bogdanov (2021) обосновал комплектование шнекового вала не короткими, а широкими и гладкими коническими затворами, повышающими рост давления и температуры смеси в шнековой группе экструдера до его выхода из фильеры.

Pareek & Madloi (2022) в ходе статического структурного анализа в ANSYS получили большое количество результатов причин поломок шнекового вала.

Авторы текущего исследования имели доступ к производственной базе ТОО «НПО ИННОТЕХ», где для исследования им был предоставлен автономный зерновой экструдер ПЭ-150, Казахстанского производства, выпускаемый Кустанайским ТОО «АГРОТЕХСЕРВИС 12». В этом экструдере в едином рабочем процессе объединены загрузка, перемешивание, дозирование, транспортировка, захват, плющение, сжатие, нагрев, противоток, стерилизация, гомогенизация, преобразование формы и др. Однако при сухом экструдировании все эти операции могут легко прерваться, так как в этом режиме ресурс шнековой группы экструдера недостаточно продолжителен и обычно не превышает $\approx 500-600$ часов работы, что в 2-3 раза ниже, чем при влажном экструдировании. Производительность экструдера при сухом экструдировании также ниже, чем при влажном, а рабочий процесс более нестабилен.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании использовали экспериментальный метод и регрессионный анализ, результаты которых сравнивали с аналитическими расчетами. Согласно выдвинутой гипотезе, для синхронизации и безопасности работы наиболее выходящих из строя деталей экструдера, таких как цельный шнековый вал, несущий шнековый вал и шнековые секции, объединенные с несущим валом и конусной головкой в шнек экструдера, а также детали корпуса шнековой группы и фильеры, следует вместо цилиндрических затворных колец, которые работают как торцевой тормоз для транспортируемой шнеком смеси, использовать уже известные затворные кольца конической формы, но с разной шириной корпуса и углом наклона передней стенки. Их использование за счет изменяющейся ширины кольца позволит регулировать состояние уже гомогенизированной смеси, предупреждая возможные микропаровзрывы влажного экструдата при выходе из фильеры или поломки витков шнека при работе с пересушенной смесью. На рис. 1 приведены образцы возможных поломок деталей экструдера при несоблюдении условий рабочего процесса (Karrab & Ballem, 2020a).



Рисунок 1. Образцы возможных поломок деталей экструдера

Примечание: составлено авторами

Устройство шнековой группы экструдера, отделенной от привода, показано на рис. 2.

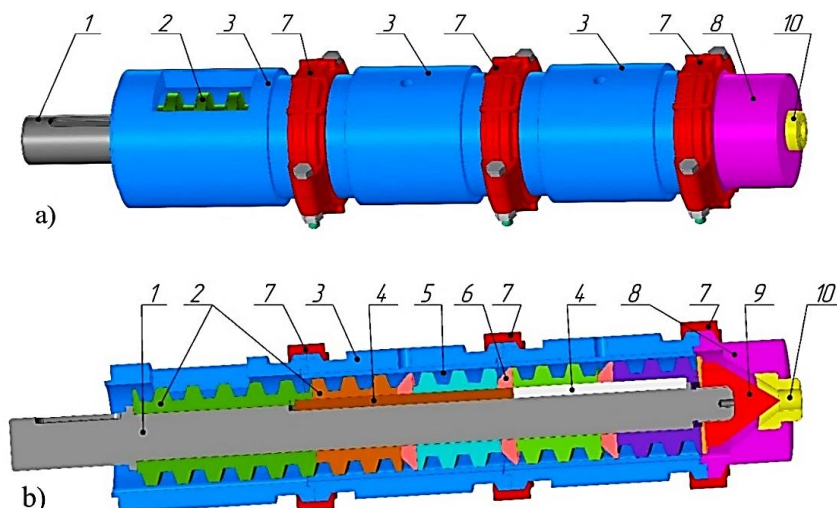


Рисунок 2. Устройство шнековой группы экструдера: 1 – вал шнека; 2 – питающие секции шнека; 3 – корпус; 4 – шпонка; 5 – пазы противотока корпуса; 6 – компрессионный затвор; 7 – хомуты соединительные; 8 – съемная регулировочная матричная головка; 9 – конусная головка шнекового вала; 10 – фильера
Примечание: составлено авторами

Работа экструдера хорошо описана во многих научных трудах (Doudkin, Kim, Yakovlev, Vasilkov, Asangaliev, & Moldakhanov, 2025; Machikhin, Zurabishvili, & Panfilova, 1991; Kukhta, 1987), поэтому отметим лишь, что кормовая смесь внутри корпуса шнековой группы движется не только вперед, к выходу из фильеры, но и по пазам противотока может возвращаться в начальные шнековые секции, где вновь поступает в переработку. Как это получается? Рассмотрим процесс с самого начала. Из бункера (не показан) смесь дозатором (не показан) подается в зону ее захвата шнековыми секциями 2 (рис. 2) и начинает транспортироваться в сторону фильеры 10. При движении смесь накапливается между витков шнековых секций с разным шагом и начинает выдавливаться в зону между корпусом 3 и шнеком 2, попутно нагреваясь. Дойдя до затворных колец 6, смесь упирается в них, так как они не имеют навитки и витков, и начинает усиленно сжиматься, одновременно проталкиваясь вперед.

Смесь, которая не продавилась между наружной поверхностью шнеков 2 и корпусом 3, перед затворными кольцами 6 вдавливается в пазы противотока 5 (рис. 3), протянутые через всю длину корпуса 3, концентрируется там и под действием увеличивающегося давления начинает выдавливаться в обратную сторону, в сторону загрузки.

Та же смесь, которая все-таки продавилась между затворным кольцом 6 и корпусом 3, сдавливается, сплющивается, её температура увеличивается, а структура меняется вплоть до начала плавки смеси. Горячая расплавленная смесь попадает в регулируемое отверстие фильеры 10 и выдавливается из него под высоким давлением (Doudkin et al., 2025; Morozov, Bogdanov, Smelik, Volkhonov, & Kukhar, 2021; Bogdanov, 2021).

От величины рабочего давления в шнековой группе зависит стабильность рабочего процесса экструдера. После нескольких проверочных экспериментов была сформулирована гипотеза о влиянии ширины конических компрессионных колец 6 затвора и их наклона к внутренней поверхности корпуса 3, а также направления наклона (острием вперед, навстречу движения смеси, или острием назад, в сторону фильеры, а к смеси цилиндрическим торцом) на накопленное давление и температуру экструдированной смеси (Doudkin, Kim, Yakovlev, Vasilkov, Asangaliev, & Moldakhanov, 2025).

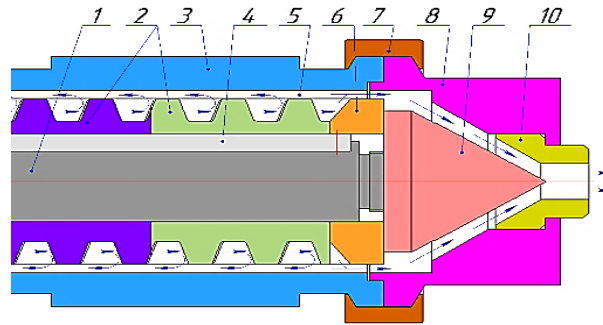


Рисунок 3. Схема рабочего процесса в выпускающей части шнековой группы: 1 – несущий вал шнека; 2 – шнековые секции; 3 – шнековый корпус; 4 – продольный стопор-шпонка; 5 – корпусные пазы противотока; 6 – затворная втулка; 7 – хомут крепежный; 8 – головка матрицы; 9 – конусный наконечник вала; 10 – матрица фильеры

Примечание: составлено авторами

Для убыстрения роста внутришнекового давления и, соответственно, температуры смеси, между секциями шнека на производстве дополнительно устанавливают кольца компрессионных затворов, внешняя поверхность колец которых образует с корпусом уменьшенный зазор, что начинает препятствовать проходу перерабатываемой смеси и провоцирует быстрое увеличение давления и трения смеси, вызывая рост температуры. Проталкивание кормовой смеси через упоры компрессионных затворов способствует её гомогенизации. Затворы в своей зоне убыстряют процессы, происходящие в смеси, и способствуют сокращению времени цикла прохода смеси до достижения ею необходимых для экструдирования параметров и состояния. В связи с тем, что необходимое состояние, температура и подвижность смеси достигаются при прохождении смесью более короткой части шнека, это позволяет сократить на одну или две секции общую длину шнека, так как процесс убыстрился и прошёл на более коротком расстоянии, без ущерба процессу экструзии, и нет смысла нагревать и уплотнять смесь более уже достигнутого состояния (Karrab & Ballem, 2020a; Karrab & Ballem, 2020b; Lyashuk, Pyndus, Lutsiv, Vovk, Poberezhna, Tretiakov, & Zoloty, 2019).

Проверим гипотезу зависимости улучшения и убыстрения процессов в зоне каждой секции шнека от изменения геометрической формы и продольной длины компрессионных колец затвора. Будем изменять продольную длину колец, а их цилиндрическую форму сменим на коническую и таким образом за счёт уменьшения объёма компрессионного кольца увеличим на такую же величину объём проталкиваемой смеси, что является положительным фактором, так как данный объём смеси не будет по каналам корпуса шнека возвращаться на повторную переработку.

Определим давление P_{pr} проталкивания экструдруемой смеси при её прохождении через кольцо компрессионного затвора конической формы. На рис. 4 материал смеси под действием силы P_x продвигается шнеком слева направо и сужается к зазору за счёт конической формы компрессионных колец затвора (Doudkin, Kim, Yakovlev, Vasilkov, Asangaliev, & Moldakhanov, 2025).

$$P_x = \frac{P_k}{\left(\frac{(r_1 + l_k g \alpha)^2}{r_1^2 - r_0^2} \right)^{0,5 \xi \left(\frac{2f}{l_k g \alpha} - 1 - f^2 \right)}} \quad (1)$$

где r_1 – начальный радиус конического компрессионного затвора, м.

Определим давление прессования перед коническим компрессионным кольцом (l_k – длина компрессионного кольца, м):

$$P_{pk} = \frac{P_k}{\left(\frac{(r_1 + l_k \tan \alpha)^2}{r_1^2 - r_0^2} \right)^{0,5 \xi \left(\frac{2f}{\tan \alpha} - 1 - f^2 \right)}} \quad (2)$$

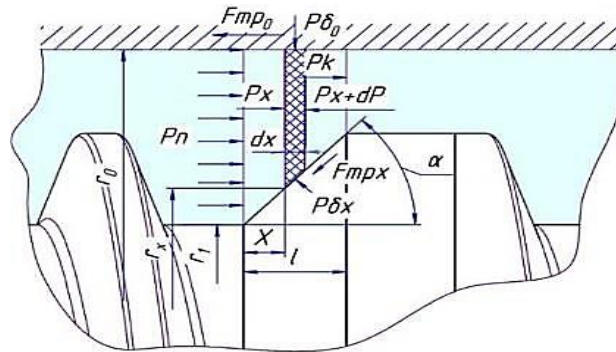


Рисунок 4. Движение смеси с отходами растениеводства через кольцо конического компрессионного затвора в шнековой группе экструдера

Примечание: составлено авторами

Для каждой экструдруемой кормовой смеси можно подобрать компрессионное кольцо с самыми рациональными параметрами. Полученные теоретические зависимости способны определить искомое давление на экструдруемый материал в любой интересующей точке внутри корпуса шнековой группы. Давление, генерируемое гребнями витков секций шнека, линейно по его длине, поэтому давление в любой точке шнека можно рассчитать (Morozov, Bogdanov, Smelik, Volkhonov, & Kukhar, 2021):

$$P_{x,n} = \frac{(P_{pn} - P_{kn}) \cdot l}{l_n} \quad (3)$$

где P_{pn} – давление перед кольцом затвора (в конце n -й секции шнека), Па;

P_{kn} – давление в начале компрессионного кольца n -й секции шнека, Па;

l – длина от начала шнека, до назначенной точки расчета давления, м;

l_n – общая длина n -й секции шнека.

На рис. 5 схематически в виде графиков показаны ступени развития давления до максимального внутри корпуса шнековой группы по всей длине шнека.

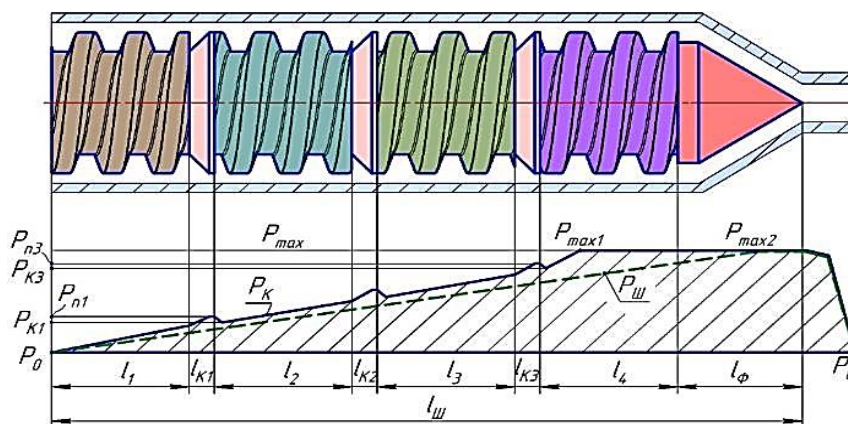


Рисунок 5. Достижение пика давления в экструдере при наличии конических компрессионных затворов и без них

Примечание: составлено авторами



По сути, на рис. 5 показан самый важный момент эксперимента: на сравнительном графике видно, что необходимый для экструдирования пик давления и, соответственно, температуры при использовании конических компрессионных затворов достигается уже на начале участка 4 шнека и дальше, через фильеру, движется без каких-либо весомых изменения пикового состояния смеси. Смесь уже дошла «до кондиции», и ее можно выпускать. То есть, после последнего пика взлета давления на 4 участке шнека его продолжение можно исключить из процесса и конструкции, так как это продолжение шнека не приносит никакого повышения давления в экструдере и не влияет на процесс.

Предварительными теоретическими исследованиями зависимости выпрессовывающего давления в шнековом корпусе от конструктивных особенностей сборки шнека подтверждено значительное влияние на общее среднее давление длины формирующей головки, площади $S_{отв}$ проходного сечения фильеры и продольной длины компрессионных колец затвора.

Зависимости (1), (2), (3) позволяют определить давление в любой точке шнековой группы экструдера. Применение конических компрессионных колец затвора разной ширины ускоряет повышение среднего давления и, возможно, температуры перерабатываемой смеси на более короткой длине шнека, что несомненно является их преимуществом перед цилиндрическими кольцами и позволяет при необходимости укоротить длину последней секции шнека, а вместе с нею и длину всего шнека, что даст сокращение металлоемкости устройства.

Увеличению температуры смеси по существующей гипотезе может способствовать увеличение поверхностей трения сжатия на шнеке экструдера, которые за счет повышения работы сил трения, например, массы кормовой смеси между витками шнека и за счет повышения давления в местах установки затворов обеспечат повышение температуры.

На значение температуры обработки смеси существенно влияет давление в шнековой группе экструдера, величину которого можно заранее спрогнозировать подбором разных по длине и форме компрессионных колец затвора или дальнейшей регулировкой площади сечения выходного отверстия фильеры. Покажем графически влияние изменения продольной длины и формы компрессионных колец затвора (рис. 6, а) и площади проходного сечения отверстия фильеры на общую температуру кормовой смеси внутри шнековой группы (рисунок 6,б) со следующими параметрами экструдера ПЭ-150: шаг шнека $t_1=t_2=t_3=20$ мм; длина шнека $l_1=160$ мм, $l_2=l_3=135$ мм; внешний радиус зуба шнека $r_{vn1}=r_{vn2}=r_{vn3}=37$ мм; продольная длина компрессионных колец ($l_{1к}=4$ мм; $l_{2к}=8$ мм; $l_{3к}=12$ мм; $l_{4к}=16$ мм); давление выпрессовывания перед фильерой $P_p=0,92$ МПа.

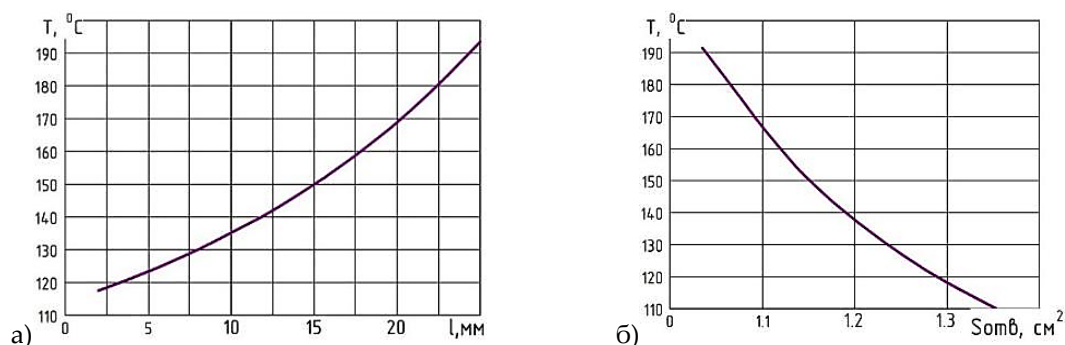


Рисунок 6. Влияние продольной длины l компрессионного кольца затвора (а) и площади $S_{отв}$ проходного сечения отверстия фильеры (б) на изменение температуры обработки смеси внутри шнековой группы

Примечание: составлено авторами

Из анализа точек графика 6, *а* вытекает вывод, что длина компрессионных колец существенно влияет на величину давления в шнековой группе. Из рисунка 6, *б* видно, что чем больше площадь S_{otv} проходного сечения отверстия фильеры, тем меньше температура в шнековой зоне. Выходит, что в процессе эксплуатации, закручивая фильеру и тем изменяя проходное сечение фильеры, можно корректировать не только давление, но и требуемую температуру внутри шнековой зоны.

Коэффициент увеличения плотности экструдата после прохождения им компрессионного кольца, который покажет, на сколько еще можно увеличить конкретную подачу, определим по формуле

$$C_r = \frac{r_0^2 - r_1^2}{r_0^2 - r_2^2}, \quad (4)$$

где r_0 – внутренний радиус цилиндра шнековой группы экструдера, м;

r_1 – начальный радиус компрессионного кольца затвора, м;

r_2 – радиус компрессионного кольца на выходе, м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты по проверке аналитики и реальных текущих показателей рабочего процесса экструдера были проведены на производственной базе ТОО «НПО ИННОТЕХ», где была предоставлена оригинальная лабораторная установка на основе натурального зернового экструдера ПЭ-150. Экструдировалась кормовая смесь, содержащая по составу 87 % зернового основания, 10 % добавок отходов после уборки подсолнечника и 3 % из отходов лесосуборки в виде хвои пихты.

В шнековую группу входят (рис. 7): секционный шнековый вал 1 с конической головкой 8, корпус первой секции 2, матрица фильеры 3, корпуса 4 п-секций шнекового корпуса, шнековые секции 5, затворы 6, выпускная фильера 7, фиксирующие хомуты 9, загрузной бункер 10.

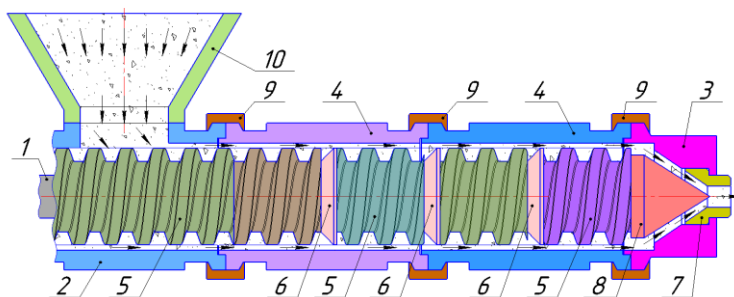


Рисунок 7. Динамика продвижения зерновой смеси в шнековой группе

Примечание: составлено авторами

Динамика рабочего процесса (рис. 7): формуемая смесь через бункер загрузки 10 поступает на циклический дозатор (не показано), дальше захватывается первой питающей секцией шнека 5, которая первично сжимает, ломает, закручивает и продавлиывает смесь на следующую секцию шнека и далее до первого затворного кольца 6. Затвором 6 смесь тормозится, сдавливается, плющится и перетекает под давлением через затвор 6 в следующую шнековую секцию 5, где операции транспортировки, сжатия, плющения и уже более сильного нагрева повторяются. Затворные кольца 6 не имеют транспортирующих витков, поэтому служат своеобразными препятствиями, тормозящими смесь, которые она вынуждена обтекать, что сопровождается увеличением температуры и давления из-за роста сопротивлений её перемещению. Смесь, которая не смогла «протиснуться» вперёд между шнековым корпусом 4 и кольцом затвора 6,



вдавливается в горизонтальные пазы противотока и тем же давлением выталкивается назад, к бункеру 10 (Doudkin, Kim, Yakovlev, Vasilkov, Asangaliev, & Moldakhanov, 2025).

Эксперимент определения эффективности рабочего процесса экструдера стандартно проводился по методике трехфакторного эксперимента, рабочая частота варьировалась в пределах 685-785 мин⁻¹ для выхода экструдата 95-110 кг/час. Сечение фильеры на выходе $S_{отв} = 1,2 \text{ см}^2$. Шаг (переменный) шнека $t=(20, 22, 24) \text{ мм}$, наибольший радиус витков $r_{vn1} = 18 \text{ мм}$, температура 120-140 °С, обеспечиваемая противодействием затворов, схематично приведенных на рисунке 8 и 9, с шириной от 4 до 12 мм. Варьировались и фиксировались показатели температуры, производительности, затраченной мощности.

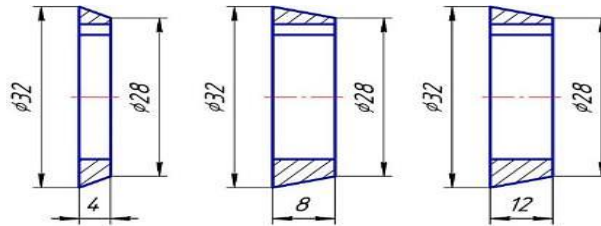


Рисунок 8. Размеры экспериментальных затворных колец

Примечание: составлено авторами



Рисунок 9. Натурные конические кольца затвора экструдера

Примечание: составлено авторами

По данным эксперимента (Doudkin, Kim, Yakovlev, Vasilkov, Asangaliev, & Moldakhanov, 2025) были составлены три уравнения регрессии (температуры экструдированной смеси T (°С), производительности Q (кг/час) и затрат мощности N (кВт) со значимостью $\alpha = 0,05$), представляющие полную квадратичную модель, адекватно аппроксимирующую результаты эксперимента:

$$T = -197,10 + 0,8427 \cdot X_1 + 0,6563 \cdot X_2 - 0,0535 \cdot X_3 - 0,00057 \cdot X_1^2 + 0,08125 \cdot X_2^2 - 0,00552 \cdot X_3^2 \quad (5)$$

$$Q = -171,47 - 0,2228 \cdot x_1 + 14,5225 \cdot x_2 + 17,4487 \cdot x_3 + 0,000015 \cdot x_1^2 + 0,0015 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,01888 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,193 \cdot x_2^2 - 0,7344 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,4539 \cdot x_3^2 \quad (6)$$

$$N = 2,735654 - 0,004685 \cdot X_1 + 0,012739 \cdot X_2 - 0,004756 \cdot X_3 + 0,000005 \cdot X_1^2 + 0,000062 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,000018 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,001875 \cdot X_2^2 - 0,001287 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,000365 \cdot X_3^2 \quad (7)$$

По данным уравнениям регрессии построены соответствующие зависимости температуры экструдированной смеси T (рис. 10), производительности Q экструдера (рис. 11) и мощности N (рис. 12) от изменения соответствующих факторов: частоты вращения шнекового вала n (об/мин); длины затворов h (мм); шага шнековой секции t (мм).

На рис. 10 представлены три полученные результирующие плоскости показателей, наложенных одна на другую: показатели верхней (1) плоскости – с фиксированным шагом $t = 20 \text{ мм}$; средние показатели плоскости (2) – с шагом $t = 24 \text{ мм}$; показатели нижней плоскости (3) – с шагом $t = 28 \text{ мм}$.

На рис. 11 результирующие плоскости также наложены друг на друга: первая плоскость (1) – характеризует результаты при фиксированной частоте $n=785$ об/мин; (2) – при частоте вращения шнекового вала $n = 735$ об/мин; (3) – при частоте $n=685$ об/мин и подтверждают, что шаг шнековых секций и частота их вращения наиболее сильно влияют на значение производительность, максимальное значение которой в опытах доходило до $Q=135$ кг/ч при оптимальных $t=24$ мм и $h=8$ мм.

Плоскости на рис. 12 показывают изменение мощности от n (об/мин) и h (мм) для фиксированных значений шага шнека: (1) $t = 20$ мм; (2) $t=24$ мм; (3) $t = 28$ мм. Опытное потребление мощности варьировалось с 1,94 кВт до максимума 2,53 кВт.

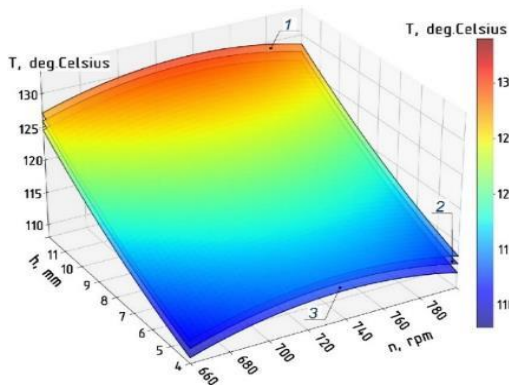


Рисунок 10. Результирующие плоскости данных изменения температуры T ($^{\circ}\text{C}$) от параметров n (об/мин), h (мм) и t (мм)

Примечание: составлено авторами

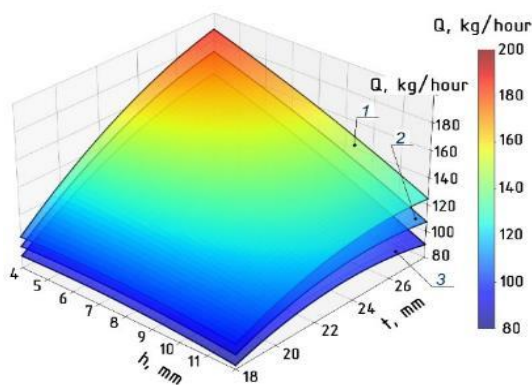


Рисунок 11. Результирующие плоскости данных изменения производительности Q (кг/час) от параметров h (мм), t (мм) и n (об/мин)

Примечание: составлено авторами

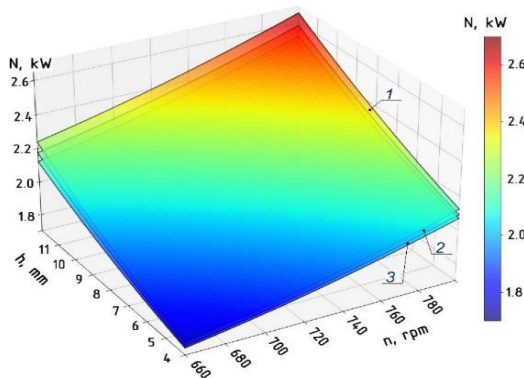


Рисунок 12. Результирующие плоскости данных изменения мощности N (кВт) от параметров n (об/мин), h (мм) и t (мм)

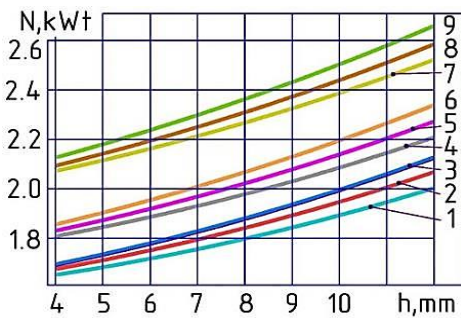
Примечание: составлено авторами

Анализ числовых плоскостей отклика, показанных на рис. 10, 11 и 12, подтверждает соответствие ранее полученных математических моделей экспериментальным показателям с максимальным отклонением 4,9 %.

Проанализируем полученные ранее зависимости мощности N (кВт), затраченной на процесс экструдирования кормовой смеси, и построим новые графики значений мощности для трех параметров: n – частоты вращения вала шнека, об/мин; h – длины



затвора, мм; t – шага шнека, мм. Для фиксированного параметра t построены графики (рис. 13) и проанализированы зависимости мощности N от параметров n и h . Анализ проводился для трех значений t : 20 мм, 24 мм и 28 мм.



- 1 - $t = 28$ мм; $n = 600$ об/мин
- 2 - $t = 24$ мм; $n = 600$ об/мин
- 3 - $t = 20$ мм; $n = 600$ об/мин
- 4 - $t = 28$ мм; $n = 700$ об/мин
- 5 - $t = 24$ мм; $n = 700$ об/мин
- 6 - $t = 20$ мм; $n = 700$ об/мин
- 7 - $t = 28$ мм; $n = 800$ об/мин
- 8 - $t = 24$ мм; $n = 800$ об/мин
- 9 - $t = 20$ мм; $n = 800$ об/мин

Рисунок 13. График изменения N от h при разных t и n

Примечание: составлено авторами

На рис. 14 приведена тепловая карта изменения мощности N для фиксированного значения $t = 24$ мм при изменении n и h , на рис. 15 – диаграмма влияния n и h в виде среднего абсолютного значения производной (САЗП) на мощность N при разных значениях шага t .

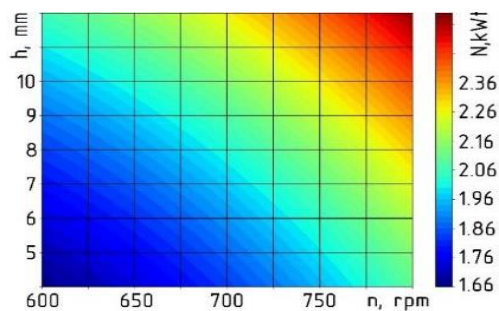


Рисунок 14. Тепловая карта N при $t = 24$ мм при разных n и h

Примечание: составлено авторами

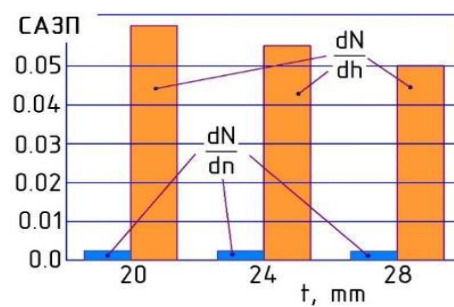


Рисунок 15. Сравнение влияния n и h на N при разных t

Примечание: составлено авторами

К обсуждению предлагаются следующие выводы:

Случай 1 – Фиксированный параметр « t » - шаг шнека.

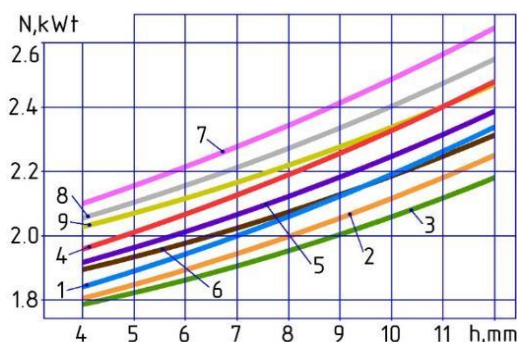
1) параметр h (ширина затвора) оказывает более сильное влияние на мощность N , чем параметр n (частота вращения);

2) максимальные значения мощности N достигаются при максимальных значениях ширины затвора h и минимальных значениях вращения вала n .

Случай 2 – Фиксированный параметр « n » - частота вращения шнека.

Для фиксированного параметра n построены графики (рис. 16) и проанализированы зависимости мощности N от параметра h . Анализ проводился для трех значений n : 685 об/мин, 735 об/мин и 785 об/мин.

На рис. 17 приведена тепловая карта изменения мощности N для фиксированного значения $n = 735$ об/мин при изменении t и h , на рис. 18 показана диаграмма влияния шага t и количества оборотов шнека h в виде среднего абсолютного значения производной (САЗП) на N при разных n .



- 1 - $n = 685$ об/мин; $t = 20$ мм
- 2 - $n = 685$ об/мин; $t = 24$ мм
- 3 - $n = 685$ об/мин; $t = 28$ мм
- 4 - $n = 735$ об/мин; $t = 20$ мм
- 5 - $n = 735$ об/мин; $t = 24$ мм
- 6 - $n = 735$ об/мин; $t = 28$ мм
- 7 - $n = 785$ об/мин; $t = 20$ мм
- 8 - $n = 785$ об/мин; $t = 24$ мм
- 9 - $n = 785$ об/мин; $t = 28$ мм

Рисунок 16. График изменения N от h при разных n и t

Примечание: составлено авторами

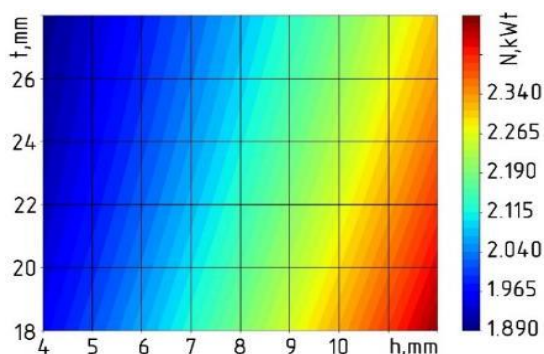


Рисунок 17. Тепловая карта N при $n = 735$ об/мин при разных t и h

Примечание: составлено авторами

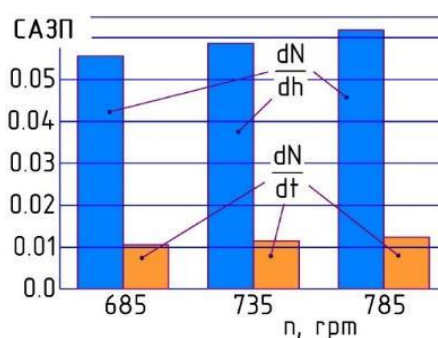


Рисунок 18. Сравнение влияния h и t на N при разных n

Примечание: составлено авторами

По результатам анализа к обсуждению предлагаются следующие выводы:

- 1) параметр h (ширина затвора, мм) оказывает более сильное влияние на мощность N , чем параметр t (шаг шнека, мм).
- 2) максимальные значения мощности N достигаются при максимальных значениях ширины затвора h (мм) и шаге шнека t (мм).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Полученное теоретически и подтвержденное экспериментально обоснование конструктивно-технологических параметров шнековой группы зернового экструдера позволит предсказуемо и с высокой точностью выбрать рациональные параметры при модернизации зерновых экструдеров для работы с конкретным сырьем;
2. Применение затворов различной длины позволяет достичь рабочей температуры и выпрессовывающего давления смеси на более короткой длине шнека, что позволяет сократить как длину шнекового вала, так и металлоемкость всего экструдера;
3. Наиболее благоприятная по технологии температура ($120-140$ °C) в шнековой группе достигается с затворами длиной 7-12 мм и шагом транспортной шнековой секции 20 мм. Изменение шага требует изменения длины затвора для поддержания благоприятного режима работы. Если увеличить шаг до 28 мм, то для достижения необходимой для экструзии температуры длину затвора следует принять равной 9-12 мм.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследования, связанные с публикацией, финансируются Комитетом науки Министерства науки и высшего образования РК: грант AP23485224 –



Разработка нового энергоэффективного оборудования по производству инновационных кормовых добавок для животноводства с использованием промышленных отходов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Авторы заявляют, что при подготовке данной рукописи были использованы технологии генеративного искусственного интеллекта:

а) <https://manus.im/> и <https://chat.deepseek.com/> - для проверки правильности выводов формул (5), (6) и (7);

б) <https://www.mathworks.com/> и <https://colab.research.google.com/> - для построения графиков и тепловых карт.

Ответственность за точность, полноту и соответствие научным стандартам всего представленного материала полностью возложена на авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Adache, L. A., Mogaji, T. S., Olabanji Olayinka, M., & Ayodeji Olagoke, Z. (2025). Design and finite element analysis of an extractor machine for castor oil biodiesel production. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*, 6(1), 34–50. <https://doi.org/10.4995/jarte.2025.21917>
- Bizhanov, A. M. (2024). Mathematical modeling of extrusion agglomeration. *Metallurgist*, 67(9–10), 1362–1372. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01628-2>
- Bogdanov, K. A. (2021). Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo protsessa ehkstrudirovaniya sapropele-zernovogo korma s obosnovaniem parametrov ehkstrudera [Improvement of the technological process of extrusion of sapropel-grain feed with justification of extruder parameters] (Candidate dissertation). Velikie Luki: FGBOU VPO VGSA. (In Russ.)
- Bulatov, S. Yu. (2015). Modeling of work process of grain crusher ejector. *Tractors and Agricultural Machinery*, 82(5), 25–27. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-65437>
- Chuikov, V. E., Konovalov, V. V., Dontsova, M. V., & Petrova, S. S. (2024). Justification of a promising functional scheme of a grain crusher. *Bulletin of the Samara State Agricultural Academy*, 2, 34–43. <https://doi.org/10.55170/1997-3225-2024-9-2-34-43>
- Doudkin, M., Kim, A., Yakovlev, I., Vasilkov, D., Asangaliev, Ye., & Moldakhanov, B. (2025). Analysis of experimental studies on the efficiency of a new mixer for molding mixtures components for the production of premix lick blocks and the final product effect. *Production Engineering Archives*, 31(1), 81–90. <https://doi.org/10.30657/pea.2025.31.8>
- Frolov, V. Y., Kotelevskaya, E. A., & Tumanova, M. I. (2020). Theoretical aspects of the working process of a press extruder with a variable step auger for preparation of concentrated feed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 520, 032003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/520/1/032003>
- Kabdusheva, A., et al. (2020). The effect of parameters on the performance efficacy of a single screw feed extruder using design experiments and response surface methodology. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 26(2), 492–497.
- Karrab, S. A., & Ballem, M. A. (2020a). Failure analysis and repair of a broken extruder shaft: A case study. *EJERS, European Journal of Engineering Research and Science*, 5(1), 107–112.
- Kraugerud, O. F., & Svihus, B. (2011). Effects of online pretreatment of plant ingredients on processing responses and physical properties in extruded fish feed. *Animal Feed Science and Technology*, 168(3–4), 250–256.
- Kukhta, G. M. (1987). Mashiny i oborudovanie dlya prigotovleniya kormov [Machines and equipment for feed preparation]. Moskva: Agropromizdat. (In Russ.)
- Kurnish, V. G., Gavrilov, N. V., & Kim, S. A. (2016). Ispol'zovanie ehkstrudеров pri pererabotke produktsii rastenievodstva v Respublike Kazakhstan [Use of extruders in processing crop production in the Republic of Kazakhstan]. Kostanai: Kostanai State University. (In Russ.)



- Kushnir, V., Gavrilov, N., & Shkotova, T. (2019). Improvement of the extruder construction. *Livestock Science*, 9783319956299, 2133–2142.
- Li, H., Xiong, Z., & Li, X. (2019). Optimization of the extrusion process for the development of extruded snacks using peanut, buckwheat, and rice blend. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(12), e14264.
- Liu, Q., et al. (2020). Effect of enzyme supplementation and extruding process on the digestibility of nutrients and phenolic acids of defatted rice bran based diets in ileal-cannulated growing pigs. *Livestock Science*, 240, 104138.
- Lyashuk, O., Pyndus, Y., Lutsiv, I., Vovk, Y., Poberezhna, L., Tretiakov, O., & Zolotyy, R. (2019). Fracture cause analysis of the extruder's shaft and geometry optimization of the spline. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 13(1), 4449–4460. <https://doi.org/10.15282/jmes.13.1.2019.08.0378>
- Machikhin, Yu. A., Zurabishvili, G. G., & Panfilova, S. N. (1991). *Sovremennoe oborudovanie v obrabotke pishchevykh materialov davleniem* [Modern equipment for processing food materials under pressure]. Moskva: Rosvuznauka. (In Russ.)
- Mironov, K. E., Obolenskiy, N., Goeva, V., & Grishin, N. (2019). Development and study of the grain crushing working process of shocking and reflective crusher. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*, 14(1), 100–106. https://doi.org/10.12737/article_5cceddbce1e93.58919071
- Morozov, V. V., Bogdanov, K. A., Smelik, V. A., Volkhonov, M. S., & Kukhar, V. S. (2021). Rationale for the design and technological parameters of the extruder for the production of spropel and grain feed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 699, 012062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/699/1/012062>
- Mu, X., Li, H., Wang, Z., Wang, Q., Geng, D., & Zhu, J. (2023). Comparison of crushing effect of differently shaped crushing rollers on whole-plant silage maize. *Agriculture*, 13(7), 1276. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071276>
- Pareek, P., & Madloi, K. (2022). Ansys analysis on screw conveyor employing diverse coating materials. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 9(6), d36–d48. <http://www.jetir.org/papers/JETIR2206306.pdf>
- Yadav, S., Jha, A. K., & Darlami, H. B. (2023). Design and improvement of dewatering system implemented for biogas slurry. *International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR)*, 5(6), 1–27. <https://www.ijfmr.com/papers/2023/6/9184.pdf>

Информация об авторах
Авторлар туралы мәліметтер
Information about authors



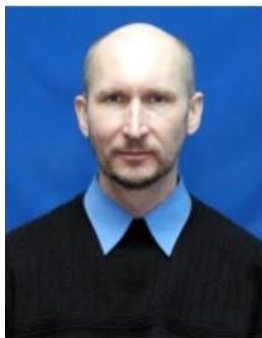
Вавилов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, директор ТОО «НПО ИННОТЕХ», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

Вавилов Андрей Владимирович – техника ғылымдарының кандидаты, «ИННОТЕХ ҰЕҰ» ЖШС директоры, Өскемен қ., Қазақстан

Vavilov Andrey Vladimirovich – candidate of Technical Sciences, Direktor NPO INNOTECH LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: avavilov@ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0356-0508>



Гурьянов Георгий Александрович – кандидат технических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Гурьянов Георгий Александрович – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Guryanov George Alexandrovich – candidate of Technical Sciences, Professor, D. Serikbayev East-Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: gguryanov@ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3657-3735>



Дудкин Михаил Васильевич – доктор технических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

Дудкин Михаил Васильевич – техника ғылымдарының докторы, профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Dudkin Mikhail Vasilyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: mdudkin@ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5732-0724>



Алина Игоревна Ким – доктор PhD, проректор, Университет «МИРАС», г. Шымкент, Казахстан

Алина Игоревна Ким – PhD докторы, проректор, "МИРАС" университеті, Шымкент қ., Қазақстан

Alina Igorevna Kim – Doctor of PhD, Vice Rektor, MIRAS University, Shymkent, Kazakhstan

e-mail: kim_ali@miras.edu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9332-4279>



Яковлев Владимир Сергеевич – магистр технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Яковлев Владимир Сергеевич – техника ғылымдарының магистрі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Yakovlev Vladimir Sergeevich – Master of Technical Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: vjakovlev@ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7315-4719>