

Научная статья

УДК 637.33

DOI 10.24888/2541-7835-2023-29-116-128

## РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ИНАКТИВАЦИИ ЗЕРНА СОИ УЛЬТРАЗВУКОМ

**Макаров Денис Вячеславович<sup>1✉</sup>, Моргунова Наталья Львовна<sup>2</sup>, Рудик Феликс Яковлевич<sup>3</sup>,  
Фоменко Ольга Сергеевна<sup>4</sup>, Семилет Никита Александрович<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup>Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии  
имени Н.И. Вавилова, Саратов, Россия

<sup>1</sup>1mdv@inbox.ru

<sup>2</sup>morgunovanl@mail.ru

<sup>3</sup>rudik.sgau@mail.ru

<sup>4</sup>fomenkoos@mail.ru

<sup>5</sup>[semiletna@yandex.ru](mailto:semiletna@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрена теория вопроса конструирования ультразвуковой шнековой установки для обработки зерна сои. Авторами предложено устройство на основе шнекового механизма, позволяющее производить транспортировку сыпучего груза в виде жидкостной суспензии, ультразвуковую обработку, вывод жидкости и отжим. Технология ультразвуковой обработки позволяет ускорять массообменные процессы инактивации антипитательных веществ, снижающих перевариваемость белка зернобобовых культур. Предлагаемая конструкция установки позволяет интенсивно обрабатывать зерно в рабочей зоне и производить отжим суспензии до необходимых показателей. В корпусе установлена перфорированная перегородка для первого отжима, коническое сужение корпуса для второго отжима. Время воздействия на обрабатываемую суспензию устанавливается изменением угла корпуса и частотой вращения шнека. С целью интенсификации процесса ультразвуковой обработки зерна часть корпуса установки снабжена кабельным нагревателем, позволяющим увеличивать температуру до необходимых показателей. Корпус установки закреплен на двух стойках: неподвижной и регулируемой, с помощью которой производится регулировка угла наклона корпуса установки (от 15° до 45°). Предлагаемая установка может также применяться для мойки и обеззараживания зерна, масличных культур или интенсивного увлажнения.

**Ключевые слова:** ультразвук, ультразвуковая обработка, соя, ингибитор трипсина, уреазы.

**Для цитирования:** Разработка установки для инактивации зерна сои ультразвуком / Д.В. Макаров, Н.Л. Моргунова, Ф.Я. Рудик, О.С. Фоменко, Н.А. Семилет // Агропромышленные технологии Центральной России. 2023. № 3(29). С. 116-128. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-29-116-128>.

Original article

## DEVELOPMENT OF AN INSTALLATION FOR INACTIVATION OF SOYBEAN GRAIN BY ULTRASOUND

**Denis V. Makarov<sup>1✉</sup>, Natalia L. Morgunova<sup>2</sup>, Felix Y. Rudik<sup>3</sup>, Olga S. Fomenko<sup>4</sup>,  
Nikita A. Semilet<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup>Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering  
named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

<sup>1</sup>1mdv@inbox.ru

<sup>2</sup>morgunovanl@mail.ru

<sup>3</sup>rudik.sgau@mail.ru

<sup>4</sup>fomenkoos@mail.ru

<sup>5</sup>[semiletna@yandex.ru](mailto:semiletna@yandex.ru)

**Abstract.** The article considers the theory of the issue of designing an ultrasonic screw plant for processing soybean grain. The authors proposed a device based on a screw mechanism that allows the

transportation of bulk cargo in the form of a liquid suspension, ultrasonic treatment, liquid withdrawal and extraction. Ultrasonic processing technology allows accelerating mass transfer processes of inactivation of anti-nutritional substances that reduce the digestibility of protein of leguminous crops. The proposed design of the plant allows intensive processing of grain in the working area and squeezing the suspension to the required parameters. The case has a perforated partition for the first spin, a conical narrowing of the case for the second spin. The time of exposure to the processed suspension is set by changing the angle of the housing and the rotation frequency of the screw. In order to intensify the process of ultrasonic grain processing, part of the installation body is equipped with a cable heater that allows increasing the temperature to the required parameters. The installation body is fixed on two racks: fixed and adjustable, with which the angle of inclination of the installation body is adjusted (from 15° to 45°). The ultrasonic unit can also be used for washing and disinfection of grain, oilseeds or intensive humidification.

**Keywords:** ultrasound, ultrasound treatment, soy, trypsin inhibitor, urease.

**For citation:** Development of an installation for inactivation of soybean grain by ultrasound. D.V. Makarov, N.L. Morgunova, F.Y. Rudik, O.S. Fomenko, N.A. Semilet. *Agro-industrial technologies of Central Russia*, 2023, no. 3(29), pp.116-128. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-29-116-128>.

### Введение

При всех своих очевидных достоинствах, таких как наличие белка до 60%, всей линейки незаменимых аминокислот соя обладает рядом недостатков, зависящих от принятых операций технологического процесса её переработки [8]. Питательные свойства зерна сои как продуктов питания, так и кормовых продуктов, обеспечивают выполнение пластической, регуляторной и энергетической функций [1, 8]. Пластическая – играет роль строительного материала для образования тканей и органов; регуляторная – поддерживает взаимосвязь основных составляющих ферментов, гормонов и иммунных тел; энергетическая – служит для восполнения энергетических затрат [1, 3].

Антипитательные вещества сои, входящие в регуляторную функцию, состоят из ингибитора протеаз (трипсина и химотрипсина) и описываются двумя состояниями: ингибитора Кунитца - до 70 %, и ингибитора Баумана-Бирка - до 30 % [7]. Ингибиторы пищеварительных ферментов и уреазы, находящиеся в нативной сое, значительно снижают перевариваемость и усвоение белка, ведут к денатурации незаменимых аминокислот и потере питательных свойств пищевых продуктов и корма [3, 7, 8]. Негативно также влияние уреазы, представляющей собой гидролитический фермент из группы амилаз, обладающей свойством катализировать гидролиз мочевины до диоксида углерода и аммиака, что ведет к неприятному вяжущему вкусу, запаху и низкой перевариваемости. Исходя из этого, присущие недостатки сои должны подвергаться более тщательной низкотемпературной обработке, обеспечивающей высокую степень инактивации антипитательных веществ с сохранением полезных составляющих, что позволит повысить ее эффективность использования в пищевых целях и кормах [7].

Все известные устройства для инактивации ингибиторов трипсина и уреазы сои низкопроизводительны и зависят от множества факторов, связанных с соблюдением долговременной высокотемпературной обработки, сложностью ведения технологического процесса, автоматизации контроля соблюдения временных параметров пооперационных этапов обработки, значительных энергетических затрат и ресурсов. Все перечисленное не позволяет обеспечить стабильность технологического процесса и производство качественных продуктов питания и кормов [6, 9].

В этой связи в Саратовском государственном университете генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова исследовались технологии и технические средства для обработки зерновых, зернобобовых и масличных культур ультразвуком с целью очистки, увлажнения перед помолом и инактивации антипитательных веществ (патенты РФ № 2405629, 2473674, 126963, 2707130). Разработана новая конструкция универсальной установки проходного типа, основанная на возможности выполнения различных по предназначению технологических операций за счет последовательного их распределения и выполнения по длине шнека. Данная схема продвижения суспензии в ограниченном объеме дает возможно-

сти акустического воздействия на все постоянно перемешиваемые частицы измельченной сои. Ультразвуковые (УЗ) пульсирующие колебательные движения кавитационного характера в соответствии с основным законом распространения звуковых колебаний обладают эффектом создавать переменные давления в потоке жидкости со схлопываниями паровоздушных пузырьков на границах различных фаз, что значительно повышает массопередачу и проницаемость обрабатываемой суспензии, что в свою очередь обеспечивает вынос антипитательных веществ и исключает возможность появления мертвых зон [10].

Проведенными исследованиями преследовалась цель повышения эффективности технических средств для переработки зернобобовых культур путем интенсификации технологических процессов массопередачи УЗ-обработкой.

### **Материалы и методы исследований**

Методика исследований основана на базе данных, полученных в лабораторных условиях обработки сои ультразвуком, и теориях проектирования технологического оборудования, представленных в работах авторов статей [6, 10].

Основой для конструктивной проработки установки для инактивации антипитательных веществ ультразвуком послужили данные лабораторных исследований сои сортов «Злато», «Бара», «Соер-4», «Соер-5». Ультразвуковую обработку сои осуществляли на базе кафедры «Технологии продуктов питания» Вавиловского университета (г. Саратов) с помощью ультразвуковых установок УЗУ-4-1,6-О; УОМ-2; ПСБ-Галс; РАП-01 (Россия) с частотой ультразвуковых колебаний 18-35 кГц и интенсивностью ультразвука 1 Вт/см<sup>2</sup>. Для изучения влияния ультразвука на активность ингибитора трипсина использовали казеинолитический метод М.Л. Какейда (в модификации И. И. Бенкен). Активность уреазы определялась по ГОСТ 13979.9-69 «Жмыхи и шроты». Конструкторская разработка выполнялась в соответствии с ГОСТ 21.501-2018 по установленным параметрическим и функциональным требованиям: влагосодержания и температуры суспензии; производительности установки; угла наклона шнекового механизма и частоте вращения винта шнека; количества витков шнека и их размерных параметров в шести рабочих зонах.

В задачи исследования входило теоретическое исследование конструкции универсальной шнековой установки непрерывного действия для очистки, увлажнения и инактивации антипитательных веществ зерна и зернобобовой продукции путем повышения эффективности массопередачи пульсирующими УЗ-микротоками.

Объект исследований – технологические воздействия и технические средства ультразвуковой обработки зернобобовых культур.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

Лабораторными исследованиями инактивации ингибитора трипсина и уреазы установлены режимные параметры, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Режимные параметры обработки сои ультразвуком

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Величина параметра
1	Температура воды	t, °С	40
2	Продолжительность обработки	T, мин	30
3	Частота ультразвуковых колебаний	A, кГц	18
4	Интенсивность ультразвукового поля	I, Вт/см <sup>2</sup>	2,63
5	Концентрация раствора	%	3
6	Степень помола	-	10

Приведенные режимные параметры позволили экспериментально в лабораторных условиях установить эффективность ультразвуковой обработки сои. При этом отмечено следующее:

- следы от минеральных загрязнений отсутствуют;
- активность ингибитора трипсина снижается с 50-60 мг/г до 3-5 мг/г, что подтверждает шестикратное повышение эффективности при незначительном времени обработки;
- активность уреазы (рН) после обработки снижается с 2,5 до 0,2, что также свидетельствует о высокой эффективности технологии ультразвуковой обработки.

При проектировании режимных параметров ультразвуковой установки в качестве основополагающих принимались свойства распространения колебательных движений при обработке продукции растениеводства [9, 10]. В данном случае, когда обработка ведется в ограниченном объеме, возникает возможность использования наиболее эффективной низкочастотной области УЗ-обработки, когда длина волн не превышает нескольких сантиметров и лишь вблизи нижней границы диапазона достигает в твердых телах нескольких миллиметров. Характерной особенностью является также то, что высокочастотные УЗ-колебания затухают достаточно быстро, что ведет к снижению их интенсивности, так как она прямо пропорциональна квадрату используемой частоты колебаний. На этом основании было принято решение использовать низкочастотный диапазон колебаний в замкнутом объеме обработки в условиях постоянного перемешивания суспензии, обеспечивающий ликвидацию застойных зон [10]. Ультразвуковое воздействие в жидкости характеризуется возникновением пульсирующих микропотоков и множеством паровоздушных кавитационных пузырьков, которые имеют свойства схлопываться на границах различных сред. Они целенаправленно воздействуют на обрабатываемый материал и ведут к значительному ускорению физических и химических кинетических процессов. Это и является значимым для растворения инородных составляющих в белковой структуре – ингибиторов трипсина и уреазы их выноса.

Конструктивно принята целесообразной универсальная шнековая установка, которая должна обладать переменным по длине винтовым подающим механизмом, обеспечивающим пооперационное продвижение обрабатываемой суспензии по схеме (рис. 1).

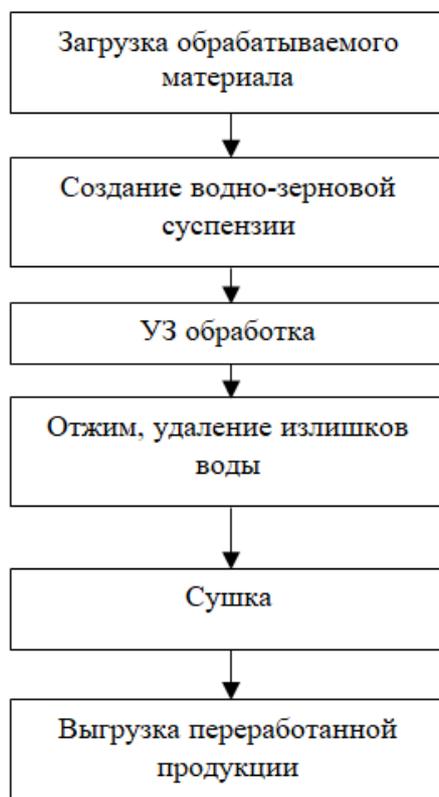


Рисунок 1. Схема последовательности пооперационной технологии обработки суспензии

На указанном выше основании приняты значимые предпроектные конструктивные условия:

- 1) заданное время транспортирования суспензии во время обработки должно обеспечиваться за счет расчетнообоснованных конструктивных элементов установки – параметров шнекового винта, диаметра трубы шнекового механизма и частоты вращения шнека;
- 2) функционально важными конструктивными параметрами приняты размеры диаметра винта шнека в зонах загрузки, создания суспензии, УЗ обработки и диаметра винта в зоне предварительного обезвоживания, отжима и выгрузки;
- 3) конструктивно различного размера винты шнека должны устанавливаться на едином, общем для всех рабочих зон вале;
- 4) выгрузка обработанной сои должна осуществляться посредством выгрузного механизма, расположенного в зоне;
- 5) ультразвуковой возбудитель должен устанавливаться с внешней стороны трубы шнекового механизма в системе, обеспечивающей наибольшее взаимодействие с обрабатываемой суспензией с использованием эффекта отражения УЗ колебаний от стенок трубы и исключения возможности появления мертвых зон;
- 6) в конструкции шнековой установки следует установить систему отжима зерна сои от остатков воды;
- 7) время продвижения суспензии по рабочим зонам должно обеспечиваться установленной регулируемой частотой вала шнека, конструкцией витков и их количеством;
- 8) подача воды и ее количество для создания суспензии устанавливаются углом наклона установки  $\beta$  от горизонтали.

В связи с тем, что ультразвуковая обработка измельченного зерна сои производится в жидкости с пропорцией суспензии 50:50, установка должна быть герметичной, что может обеспечить только винтовой конвейер. Принцип действия винтового конвейера основан на использовании осевой движущей силы, передаваемой винтом шнекового типа, заключенного в трубе (рис. 2).

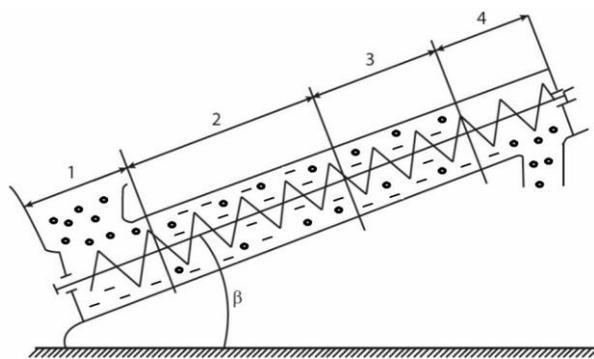


Рисунок 2. Конструктивная схема работы винтового конвейера:

- 1 – загрузка обрабатываемого материала; 2 – обработка суспензии ультразвуковыми излучателями; 3 – отжим суспензии; 4 – выход продукции

Основные конструктивные параметры установки обуславливались расчетами [2, 5]:

- производительность шнекового механизма

$$Q = 3600 \frac{\pi D^2}{4} \varphi \rho \frac{Sn}{60} K_{\beta} = 47 D^2 S \pi \varphi \rho K_{\beta}, \quad (1)$$

- где  $D$  – диаметр винта, м;  
 $\varphi$  – коэффициент заполнения участка трубы;  
 $\rho$  – насыпная плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  
 $S$  – шаг винта, м;  
 $n$  – константа частоты вращения винта, м/с;

$K_\beta$  – отношение шага винта к углу наклона установки.

– критическая скорость вращения винта определялась по схеме, представленной на рисунке 3.

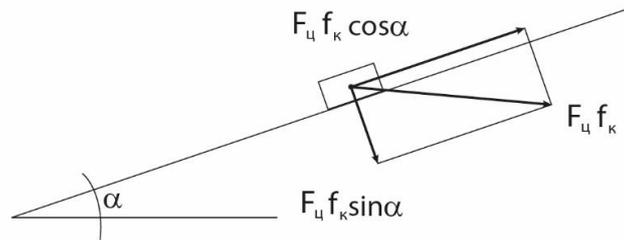


Рисунок 3. Схема для определения критической скорости винта шнека

Критическая скорость, при которой перемещаемая частица находится в равновесном состоянии, устанавливается выражением:

$$\frac{mg \sin \alpha + mg f_g \cos \alpha + m V_{кр}^2 f_k f_g \sin \alpha}{R - m V_{кр}^2 f_k \frac{\cos \alpha}{R}} = 0, \quad (2)$$

где  $m$  – масса частицы, кг;

$V_{кр}$  – критическая скорость, при которой перемещаемая частица находится в равновесном состоянии, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\alpha$  – угол наклона шнекового механизма, град;

$f_g, f_k$  – коэффициенты трения перемещаемой частицы о винт и трубу соответственно.

Отсюда критическая скорость вращения винта шнека, характеризующая линейную скорость точек наружной поверхности шнека, при которой перемещаемая суспензия, не имеет движения вдоль оси, определяется выражением:

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{gR \sin \alpha + f_\beta \cos \alpha}{f_k \cos \alpha - f_\beta \sin \alpha}} = \sqrt{\frac{gR}{f_k}} \operatorname{tg}(\alpha + \beta), \quad (3)$$

где  $R$  – радиус вращения частицы, м;

$\beta$  – угол трения частицы о поверхность винта,  $\beta = \operatorname{arctg} f_g$  град.

В связи с отсутствием данных по потерям из-за сопротивления перемещению суспензии, их определение осуществлялось по схеме, представленной на рисунке 4.

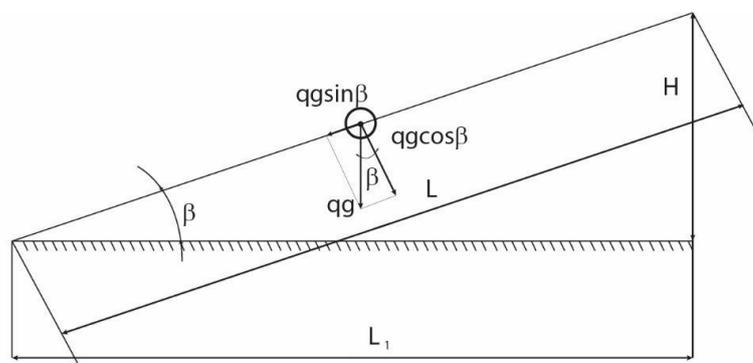


Рисунок 4. Схема для определения сопротивления перемещению суспензии

Потери критической скорости должны корректироваться с учетом увлажненного зерна, коэффициент трения которого о стенки винта и трубы ниже, чем при сухом трении:

$$W = qgf_{\text{мыз}}L\cos\beta + qgf_{\text{мыз}}L\sin\beta = qg(L_1f_{\text{мыз}} + H), \quad (4)$$

где  $q$  – распределенная масса груза, кг;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$f_{\text{мыз}}$  – коэффициент трения увлажненного зерна о стенки трубы;

$L, L_1, H$  – длина конвейера и его проекции на горизонтальную и вертикальную плоскости соответственно, м;

$\beta$  – угол наклона шнекового механизма, град.

В классическом понятии конструктивные и кинематические параметры винтовых конвейеров взаимосвязаны [2, 5]. При их проектировании задаются производительностью и частотой вращения винта, а затем определяются размерные параметры винта. При этом устанавливаемая частота вращения винта значительно воздействует на его прочностные показатели.

Таким образом, критическая скорость продвижения обрабатываемой суспензии зависит от таких конструктивных параметров, как радиус трубы, угол наклона шнека и технологических коэффициентов трения частиц. При конструировании установки основным технологическим требованием является строгое соблюдение условия установленного времени нахождения продвигаемой суспензии в зоне ультразвукового воздействия (рис. 5).

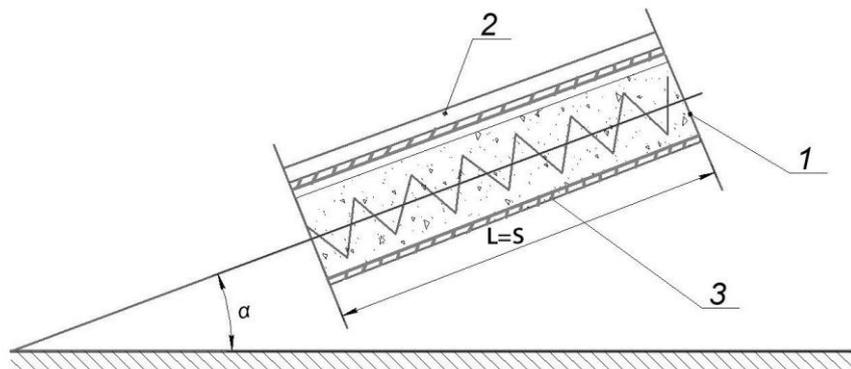


Рисунок 5. Схема продвижения суспензии в рабочей зоне установки:

1 – зона УЗ обработки суспензии; 2 – ультразвуковой возбуждатель; 3 – длина рабочей зоны, характеризующая путь продвижения суспензии и время ее обработки

Обрабатываемая суспензия продвигается винтом шнека в рабочей зоне УЗ-обработки суспензии 1, и весь период прохождения она озвучивается пьезокерамической колебательной системой 2, длина которой 3 обеспечивает нужное время обработки (рис. 5). С этой целью анализировалось выражение для определения осевой скорости передвижения суспензии в шнековом механизме за произвольный период времени:

$$V = \frac{K_v p n}{T}, \quad (5)$$

где  $K_v$  – коэффициент скорости, учитывающий различие действительных и теоретических скоростей движения груза из-за проскальзывания, м/с;

$p$  – шаг винта шнека, м;

$n$  – частота вращения винта шнека, мин<sup>-1</sup>;

$h = S = pn$  – длина рабочей зоны винта шнека, м;

$T$  – время продвижения суспензии, с.

В нашем случае особое значение имеет время нахождения перемещаемой суспензии в рабочей зоне воздействия ультразвуковыми направленными пульсирующими микропотоками (см. рис. 5, поз. 3). Для разных целей и обрабатываемых материалов время обработки в

рабочей зоне 3 различно. Следовательно, частота вращения винта шнека и его шаг будут определяющими конструктивными параметрами.

При проектировании устройства возможность потребного времени нахождения обрабатываемого материала в рабочей зоне при постоянном шаге винта обеспечивается переменной регулируемой частотой вращения винта шнека, устанавливаемой приводной станцией.

Для определения конструктивных параметров пути, на котором продвигается суспензия, приравняем значения практической и условной скоростей продвижения суспензии (3) и (5):

$$\sqrt{\frac{gRtg(\alpha + \rho\beta)}{f_k}} = K_v \rho n / T, \quad (6)$$

Отсюда путь, на котором протекает процесс ультразвуковой обработки, определяется выражением:

$$S = K_v \frac{\sqrt{gRtg(\alpha + \rho\beta)}}{T}, \quad (7)$$

Следовательно, время, необходимое для соблюдения установленной длительности ультразвуковой обработки суспензии, равно:

$$T = K_v \rho n \sqrt{\frac{gRtg(\alpha + \rho\beta)}{f_k}}, \quad (8)$$

Уравнением (8) согласуются основные конструктивные параметры установки с установленным временем обработки зерна сои.

После рабочей зоны увлажненная соя с достаточно большим количеством остаточной жидкости поступает в зону отжима. Шнековый механизм для всего устройства един, процесс продвижения обрабатываемого материала непрерывен.

Наиболее приемлемым принят вариант конструкции, работающий по принципу шнекового отжима растительного масла. Основными рабочими органами процесса прессования являются шнек и зерер. Принцип отжима выводимого жидкого материала из суспензии осуществляется путем ее транспортировки внутри зерного цилиндра различными конструктивными механизмами.

Кинетика процесса отжима заключается в снижении свободного объема обрабатываемого материала по ходу его движения. Тем самым материал сжимается, что влечет за собой повышение давления, обеспечивающего выдавливание излишков жидкости и ее вывод из шнека. Обрабатываемый отжатый материал продвигается на выход из шнекового механизма. Схематически это представлено на рисунке 6.

Для разрабатываемой конструкции активным рабочим органом является шнек, который предназначен для создания градиента давления в объеме прессуемого материала и одновременной передачи его вдоль оси шнека на выход. Зерер пассивный и, в отличие от масляных прессов, предназначен только для вывода отжатой воды через специальную перфорированную поверхность.

Вследствие того, что в конструкции установки используется шнековый механизм, имеющей общую ось винта шнека, конструкция винта на участке отжима должна быть взаимно конической по форме трубы и высоты витков шнека по направлению к выходу (см. рис. 6).

Для принятой конструктивной схемы вал для транспортировки суспензии и ее отжима един. Исходя из этого, производительность зоны отжима рассчитывается по выражению:

$$Q = \frac{(\pi V_s^2 / 4) L (1 - \varphi) \rho_H n}{60}, \quad (9)$$

Где  $V_s$  – объем камеры отжима по длине камеры  $h$ ,  $m^3$ ;

$L$  – длина камеры отжима от диаметра загрузки  $D_3$  до диаметра выгрузки  $D_B$ , м;  
 $\varphi$  – коэффициент заполнения;  
 $n$  – частота вращения вала шнека,  $\text{мин}^{-1}$ ;  
 $\rho_H$  – насыпная плотность материала,  $\text{кг/м}^3$ .

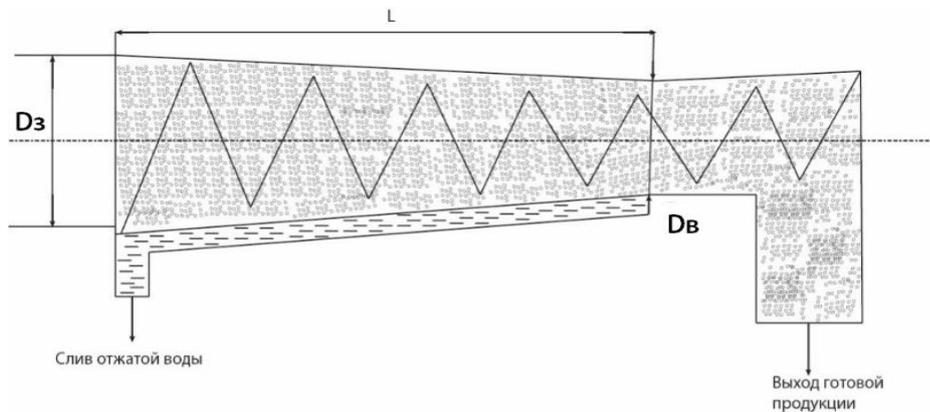


Рисунок 6. Схема конструкции зоны отжима жидкости:

$D_3$  – общий диаметр загрузки камеры отжима, м;  $D_B$  – диаметр шнекового механизма в конце камеры отжима, м;  $L$  – длина камеры отжима, м.

Увеличение давления в камере отжима возникает по причине конического уменьшения высоты винта шнека от начального диаметра  $D_3$  до конечного –  $D_B$ . Давление при загрузке и выгрузке суспензии зависит от конструктивных параметров установки:

$$\begin{aligned} P_3 &= K_c K_d D_3; \\ P_B &= K_c K_d D_B. \end{aligned} \quad (10)$$

где  $K_c$  – индекс консистенции обрабатываемого материала,  $K_c = const$  ;  
 $K_d$  – конструктивный фактор кольцевого отверстия,  $K_d = const$  .

Известно, что при сжатии тела в замкнутом пространстве силой, направленной нормально от вала к поверхности корпуса шнека, возникают три направления давления (рис. 7).

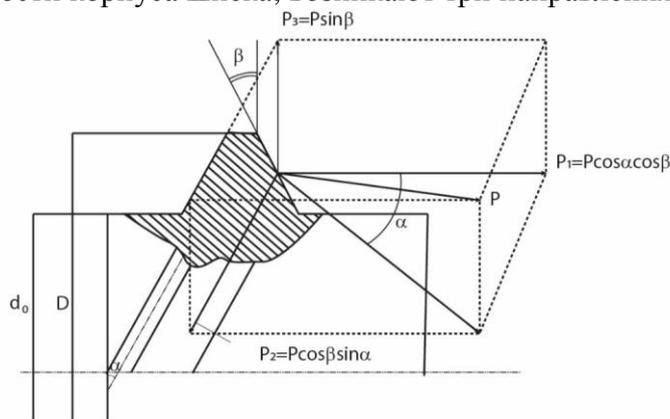


Рисунок 7. Давления, возникающие на одном витке камеры отжима шнека

Давление витка на суспензию, направленное вдоль оси шнекового вала:

$$P_1 = P \cos \alpha \cos \beta, \quad (11)$$

Давление противодействия, направленное против вращения шнекового вала:

$$P_2 = P \cos \beta \sin \alpha, \quad (12)$$

Давление радиальное, направленное от вала к поверхности корпуса шнека:

$$P_3 = P \sin \beta, \quad (13)$$

Исходя из этого, радиальное давление в камере отжима является общим для определения давления на витке, и оно может быть определено выражением, учитывающим потери от противодействия бокового давления:

$$P' = k \cdot P_H, \quad (14)$$

где  $k$  – коэффициент Пуассона (для твердого материала,  $k = 0,28 - 0,32$ );

$P_H$  – нормальное давление, Па.

Исходя из выражений (11) и (14), радиальное давление на любом витке определяется выражением:

$$P' = k \cdot P_H \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta. \quad (15)$$

Тогда полное удельное радиальное давление определится уравнением:

$$P_p = P_3 + P' = P' \cdot k (\cos \alpha \cos \beta + \sin \beta), \quad (16)$$

С учетом сил трения отжимаемого материала о поверхность витка:

$$P_T = P' (\cos \beta \sin \alpha + \sin \beta). \quad (17)$$

Тогда суммарное давление в радиальном направлении примет вид:

$$P_\Sigma = P_p + P_T = P_p (k \cos \alpha \cos \beta + \sin \beta) - P_T (\cos \beta \sin \alpha + f \cos \beta). \quad (18)$$

Таким образом, перепад давления, зависящий от динамического воздействия витков шнека на суспензию, создает условия для отжима излишков жидкости из обрабатываемой сои.

Обрабатываемое зерно засыпается в бункер 7 и по трубопроводу направляется в зону формирования суспензии 2. Одновременно из емкости 9 вода также по трубопроводу заполняет зоны 2 и 3, подготовленная суспензия в пропорции 50х50 посредством приводной станции 1 и транспортирующего винта шнека обрабатывается ультразвуком пьезоэлектрической системой 8, находящейся в постоянном контакте с перемешиваемой суспензией. Количество подаваемой воды и ее восполнение осуществляется посредством крана, установленного на трубопроводе подачи воды (рис. 8).

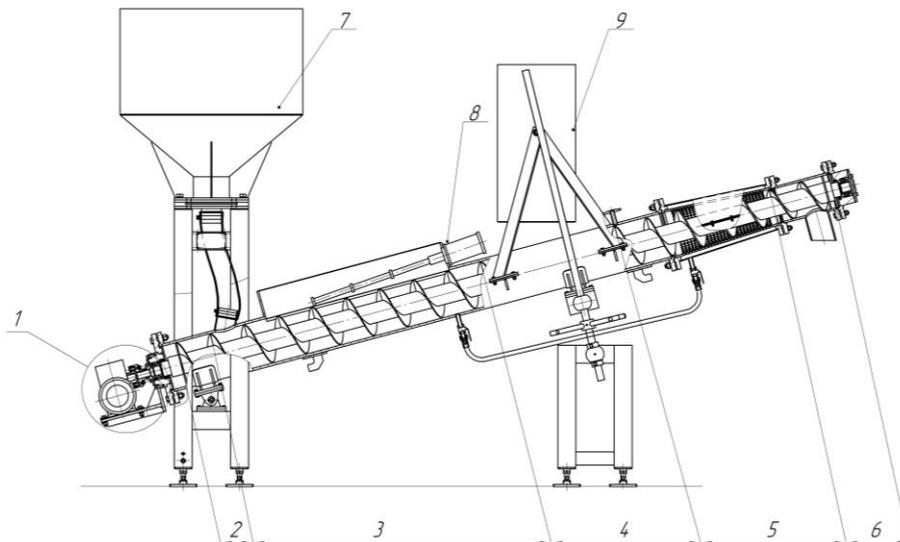


Рисунок 8. Конструктивная схема ультразвуковой установки для обработки зерна сои микротечениями (полезная модель № 208531)

По мере продвижения излишки воды сливаются заслонкой в отстойник, а при поступлении и прохождении зоны 5 осуществляется окончательный отжим зерна от воды с его по-

дачей в зону выхода готовой продукции б. Углом  $\alpha$  подъема установки от горизонтали и частотой вращения винта шнека устанавливается время нахождения УЗ-обработки суспензии. Таким образом, перепад давления, зависящий от воздействия витков шнека на суспензию, создает условия для отжима излишков жидкости из суспензии. Конструктивной особенностью является расположение на одном шнековом валу нескольких рабочих зон, предназначенных для создания суспензии зерна с водой, ее подачи в рабочую зону ультразвуковой обработки в течение установленного периода времени, предварительного и окончательного отжима обработанного зерна и его подачи на выход. Новизна установки подтверждена патентом на полезную модель № 208531 [4].

### **Выводы**

1. Проведенными расчетами, основанными на использовании теоретических и экспериментальных данных исследований УЗ-обработки, приведенными в таблице 1, установлены конструктивные параметры установки для инактивации ингибитора трипсина и уреазы при переработке сои.

2. Конструктивной особенностью является расположение на одном шнековом валу нескольких рабочих зон, предназначенных для создания суспензии зерна с водой, ее подачи в рабочую зону ультразвуковой обработки в течение установленного периода времени, предварительного и окончательного отжима обработанного зерна и его подачи на выход.

3. Универсальность установки заключается в последовательном выполнении всех технологических операций: формирование суспензии, ультразвуковой обработки, отделения сои от воды и предварительного отжима, окончательного отжима и выгрузки готового продукта, определяемых рабочими размерами, конструктивными особенностями винта шнека и частотой его вращения.

4. Непрерывность технологического процесса обеспечивается единым валом шнека с расчетной длиной каждой из шести зон. Также универсальность конструкции установки обусловлена возможностью обработки любой продукции растениеводства для очистки, увлажнения, обеззараживания и мойки.

5. Технические характеристики установки: диаметр винта шнека в зонах загрузки, подготовки суспензии, УЗ обработки и предварительного отжима - 0,203 м; диаметр витка в зоне отжима убывающий от 0,203 до 0,156 м; средний диаметр витка в зоне отжима - 0,18 м; диаметр витка в зоне выгрузки - 0,156 м; толщина витка винта - 0,003 м; число витков винта в зоне загрузки - 2; число витков винта в зоне УЗ-обработки - 5; число витков винта в зоне предварительного обезвоживания - 6; число витков винта в зоне отжима - 3; число витков винта в зоне выгрузки - 1,5; шаг винта шнека - 0,155 м; расчетное давление в зоне отжима -  $2 \cdot 10^5$  Па; производительность установки - 1700 кг/ч; температура суспензии - 40 °С; продолжительность обработки суспензии - 1 мин; угол наклона шнека - 20-40°; максимальная частота вращения вала шнека - 18 мин<sup>-1</sup>.

### **Список источников**

1. Балакай Г.Т., Безуглова О.С. Соя: экология, агротехника, переработка. Ростов-на-Дону: Феникс, 2003. С. 100-107.

2. Остриков А.Н., Абрамов О.В. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2003. С. 142-152.

3. Петибская В.С. Достоинства и недостатки семян сои и их роль в формировании качества пищевых продуктов и лечебных препаратов // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2006. № 2(135). С. 122-128.

4. Патент на полезную модель № 208531 U1 Российская Федерация, МПК В02В 5/00. Устройство для обработки зерна, пивного солода, семян масличных культур: заявл. 05.04.2021: опубл. 23.12.2021 / Д.В. Макаров, Е.А. Сундуков, Ф.Я. Рудик, Н.Л. Моргунова;

заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова", общество с ограниченной ответственностью "Химмаш-Старт".

5. Расчет и проектирование транспортных средств непрерывного действия / А.И. Барышев, В.А. Будишевский, Н.А. Скляр, А.А. Сулима, А.М. Ткачук // Донецк: 2005. С. 258-264.

6. Рудик Ф.Я., Моргунова Н.Л., Макаров Д.В. Теоретический анализ и обоснование процесса взаимодействия гидродинамических колебательных систем при технологическом воздействии на зерно сои // Аграрный научный журнал. 2021. № 9. С. 92-94.

7. Сергеева Е. Ю., Белов А. А. Снижение антипитательного вещества в соевых бобах при диэлектрическом нагреве // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2016. № 18. С. 220-222.

8. Солошенко В.А. Соя – ее достоинства и недостатки // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2010. № 11. С. 71-74.

9. Технические средства для обработки сои / А.М. Шувалов, А.Н. Зазуля, Г.М. Шулаев, Н.А. Вотановская, Д.С. Чернов // Наука в центральной России. 2014. № 1(7). С. 55-60.

10. Technologies and technical means of soybean processing / N.L. Morgunova, F.Y. Rudik, N.A. Semilet [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, February 26-29, 2020. Voronezh, 2021. Pp. 022059.

### References

1. Balakai G.T., Bezuglova O.S. Soy: ecology, agrotechnics, processing. Rostov-on-Don: Phoenix Publ., 2003, pp. 100-107.

2. Ostrikov A.N., Abramov O.V. Calculation and design of machines and devices of food production. Saint Petersburg: GIORP Publ., 2003, pp. 142-152.

3. Petibskaya V. S. Advantages and disadvantages of soybean seeds and their role in the formation of the quality of food products and medicinal preparations. Oilseeds. Scientific and Technical Bulletin of the All-Russian Research Institute of Oilseeds, 2006, no. 2(135), pp. 122-128.

4. Utility model Patent No. 208531 U1 Russian Federation, IPC B02B 5/00. Device for processing grain, beer malt, oilseeds: application 05.04.2021: publ. 23.12.2021. D. V. Makarov, E. A. Sundukov, F. Ya. Rudik, N. L. Morgunova; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov", society with limited liability company "Himmash-Start".

5. Calculation and design of continuous vehicles. A.I. Baryshev, V.A. Budishevsky, N.A. Sklyarov, A.A. Sulima, A.M. Tkachuk. Donetsk, 2005, pp. 258-264.

6. Rudik F.Ya., Morgunova N.L., Makarov D.V. Theoretical analysis and substantiation of the process of interaction of hydrodynamic oscillatory systems under technological impact on soybean grains. Agrarian scientific journal, 2021, no. 9, pp. 92-94.

7. Sergeeva E.Yu., Belov A.A. Reduction of the anti-nutrient substance in soybeans during dielectric heating. Actual issues of improving the technology of production and processing of agricultural products, 2016, no. 18, pp. 220-222.

8. Soloshenko V.A. Soy – its advantages and disadvantages. Feeding of farm animals and feed production, 2010, no. 11, pp. 71-74.

9. Technical means for processing soybeans. A.M. Shuvalov, A.N. Zozulya, G.M. Shulaev, N.A. Votanovskaya, D.S. Chernov. Science in Central Russia, 2014, no. 1(7), pp. 55-60.

10. Technologies and technical means of soybean processing. N.L. Morgunova, F.Y. Rudik, N.A. Semilet [et al.]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, February 26-29, 2020. Voronezh, 2021, pp. 022059.

### **Информация об авторах**

**Д.В. Макаров** – аспирант кафедры технологии продуктов питания;

**Ф.Я. Рудик** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии продуктов питания;

**Н.Л. Моргунова** – кандидат сельскохозяйственных наук доцент кафедры технологии продуктов питания;

**О.С. Фоменко** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии продуктов питания;

**Н.А. Семилет** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии продуктов питания.

### **Information about the authors**

**D.V. Makarov** – Postgraduate Student of the Department of Food Technology;

**F.J. Rudik** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Food Technology;

**N.L. Morgunova** – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Food Technology;

**O.S. Fomenko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Technology;

**N.A. Semilet** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Food Technology.