

УДК 66.084.2

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ЖМЫХА *BRASSICA NAPUS* В ПРОЦЕССЕ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

© Я.В. Смольникова^{1*}, Ю.Д. Алашкевич², Р.А. Марченко², В.А. Ханипова¹, А.В. Макаров¹, Д.В. Брошко¹, О.В. Стутко¹, Ю.Н. Брусова¹

¹ Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира, 90, Красноярск, 660049, Россия, ya104@yandex.ru

² Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037, Россия

В работе представлены результаты исследований влияния процессов гидродинамической кавитации на установке струя – преграда для определения эффективности применения данной технологии в переработке рапсового жмыха. Цель исследования – изучение состава рапсового жмыха при различных режимах гидродинамической кавитации, в связи с чем были получены суспензии рапсового жмыха при продолжительности кавитационного воздействия в установке струя – преграда – 25, 100 и 175 секунд, что соответствовало 5, 25 и 35 циклам обработки; определено содержание белка, остаточной масляности, клетчатки и растворимых углеводов в полученных фракциях рапсового жмыха; а также исследован минеральный состав. При исследовании применялись методики: определение масла по методике Рэндалла, определение белка по методу Кьельдаля, определение клетчатки методом Веенде, определение содержания растворимых углеводов в соответствии с ГОСТ 26176-2019, определение минерального состава методом атомно-абсорбционной спектроскопии в соответствии с ГОСТ 32343-2013.

В результате были получены фракции суспензии в виде твердого остатка, белковой пасты и промывных вод. Увеличение количества циклов обработки снижало концентрации белков (на 2.42% в твердом остатке, на 8.30% в белковой пасте), масла (на 2.09% в твердом остатке, 4.08% в белковой пасте), клетчатки (на 9.87% в твердом остатке, 3.86% в белковой пасте), минеральных компонентов (около 40%) и повышало содержание растворимых углеводов (на 9.54% в твердом остатке, на 3.09% в белковой пасте).

Таким образом, было установлено, что кавитационная обработка рапсового жмыха на установке струя – преграда обеспечивает снижение масляности и повышение содержания растворимых углеводов, что позволяет рассматривать данную технологию как альтернативный способ получения кормовых продуктов, белковых концентратов и пищевых добавок на основе рапсового жмыха.

Ключевые слова: гидродинамическая кавитация, рапсовый жмых, белки, клетчатка, минеральный состав.

Для цитирования: Смольникова Я.В., Алашкевич Ю.Д., Марченко Р.А., Ханипова В.А., Макаров А.В., Брошко Д.В., Стутко О.В., Брусова Ю.Н. Исследование состава жмыха *Brassica napus* в процессе кавитационной обработки // Химия растительного сырья. 2026. №1. С. 341–350. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260118109>.

Введение

Рапс (канола), *Brassica napus*, является третьей по значимости масличной культурой после сои и масличной пальмы, и его производство составляет 27 млн тонн в год, что составляет 13.4% мирового рынка и приносит 32 млрд долларов США в год. Эта однолетняя культура выращивается на площади более 37 млн га, в основном в умеренных широтах от 20° до 55° северной широты и от 20° до 40° южной широты [1, 2]. Крупнейшим экспортером рапса является Канада, в то время как другие центры производства, такие как Европа, Китай и Индия, в основном обеспечивают местные рынки [3, 4].

Растущая популярность рапсового масла как пищевого, так и в качестве компонента биодизельного топлива привела к проблеме переработки отходов рапсового жмыха, решению которой в настоящее время уделяется большое внимание во всем мире [5–8]. Рапсовый жмых обладает большим потенциалом для производства различных кормовых и пищевых продуктов благодаря высокому содержанию белка, минералов и

* Автор, с которым следует вести переписку.

пищевых волокон. Рапсовый жмых является ценным источником белка (до 35%), который содержит незаменимые аминокислоты, имеет богатый минеральный состав Mg, Ca, Se, Ce, Tl, Mn, Cr, Zn, Ti, Be, Fe, Co, Ni и Mo [9].

Основными направлениями переработки рапсового жмыха являются: получение кормов и кормовых добавок для животных, птицы и аквакультуры, выделение концентратов и изолятов рапсового белка, различные способы биотрансформации рапсового жмыха, применение его в качестве субстрата для культивирования организмов-продуцентов с получением ценных продуктов, включая антимикробные соединения, биосурфактанты и биополимеры [10–13]. Однако прямое использование рапсового жмыха ограничено антипитательными компонентами, в том числе глюкозинолатами, фенольными соединениями, фитатами и лигноцеллюлозными волокнами, которые могут негативно влиять на растворимость и усвояемость белка или приводить к образованию токсичных соединений [14].

Для снижения антипитательных факторов рапсового жмыха, а также интенсификации экстракции биологически активных соединений, получения изолятов и концентратов рапсового белка традиционные технологии предполагают применение токсичных и пожароопасных органических растворителей для предварительного обезжиривания жмыхов, солевых растворов щелочей и кислот для экстракции и осаждения белков, и в целом представляют собой довольно трудоемкие процессы. Альтернативой являются кавитационные технологии, исключающие применение токсичных растворителей, сокращающие продолжительность процесса, обеспечивая высокий выход, а также чистоту получаемого продукта [15].

Среди «зеленых» технологий экстракции гидродинамическая кавитация выглядит наиболее перспективной с точки зрения практического применения. Экстракция происходит за счет схлопывания и взрыва кавитационных пузырьков, образующих горячие точки и ударные волны, способные разрушать клеточные мембраны и усиливать массообмен, улучшая доступ воды к разрушенным клеткам и экстрагируя водорастворимые соединения в водную фазу [16, 17]. Несмотря на то, что гидродинамическая кавитация демонстрирует более высокий потенциал для промышленного применения по сравнению с другими новыми технологиями, такими как ультразвук и микроволны, широкое коммерческое внедрение гидродинамической кавитации остается ограниченным даже после трех десятилетий разработок [18].

Известно применение гидродинамической кавитации в переработке масличных культур. Так, по данным ученых (K.E. Preese, N. Hooshyar, A.J. Krijgsman, P.J. Fryer, N.J. Zuidam), гидродинамическая кавитация улучшает извлечение масла, белка и твердых веществ из соевых бобов [19]. Исследовано получение биодизельного топлива с применением гидродинамической кавитации из отработанного растительного масла [20]. Однако для широкого внедрения гидродинамической кавитации в технологию переработки рапсового жмыха требуется проведение комплексных исследований для оценки влияния кавитационных эффектов на изменение состава в процессе обработки.

Цель исследования – изучение изменения состава рапсового жмыха при различных режимах гидродинамической кавитации.

Экспериментальная часть

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- получение суспензии рапсового жмыха при различных режимах кавитационной обработки на установке струя – преграда;
- определение содержания белка, остаточной масличности, клетчатки и растворимых углеводов в полученных фракциях рапсового жмыха;
- исследование минерального состава полученных фракций рапсового жмыха.

Объекты исследования. Семена рапса ярового – семейство капустных. *Brassicaceae* относится к виду *V. napus oleifera annua Metz.* Объектом исследования были выбран сорт рапса ярового отечественной селекции «Сибирский» (Новосибирск). Семена рапса ярового произрастали в хозяйстве ООО «ОПХ Солянское», территория которого относится к Средне-Сибирскому плоскогорью, в пределах земельной части которого выделена Рыбинская котловина (в южной части). Хозяйство расположено в Канской лесостепной зоне. Уборку семян осуществляли на стадии полной спелости зерна (101–110 день от всходов).

Рапсовый жмых получали путем двукратного отжима на электрическом маслопрессе для холодного и горячего отжима масла АКJP-2000 deluxe (Akita jp, Тайвань) при температуре отжима 50 °С.

Содержание остаточного масла в жмыхе определяли методом исчерпывающей экстракции по методике Рэндалла в автоматическом программируемом 6-местном экстракторе SER 148/6 (VELP Scientifica, Италия). В качестве растворителя применялся диэтиловый эфир.

Количественное определение белка в образцах выполнялось по методу Кьельдаля на автоматическом анализаторе азота со встроенным титратором UDK 159 F30200150 (VELP Scientifica, Италия).

Определение сырой клетчатки проводили методом Веенде, для этого в пористый тигель помещали 1 г цеолита, предварительно прокаленного при температуре 500 °С в течение 4 ч, далее производили навеску пробы в количестве от 1 до 3 г, предварительно высушенной при температуре 50 °С и затем измельченной и пропущенной через сито с размером отверстия 1 мм, после этого тигли помещали в гнезда автоматического анализатора клетчатки (FIWE Advance Fiber Auto Extractor, фирма Velp Scientifica).

Определение содержания растворимых и легкогидролизуемых углеводов проводили в соответствии с ГОСТ 26176-2019. Сущность метода заключается в экстракции из навески дистиллированной водой при температуре 50–60 °С растворимых углеводов (сахаров), последующем гидролизе 1%-ным раствором серной кислоты легкогидролизуемых углеводов (крахмала) в остатке, дегидратации сахаров экстракта и гидролизата, окрашивании растворов антроновым реактивом и фотометрическом определении оптической плотности растворов, оптическую плотность определяли на спектрофотометре ПЭ-5300 ВИ (Россия).

Определение минерального состава проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии по ГОСТ 32343-2013, на спектрометре атомно-абсорбционном PinAAcle 900T (Perkin Elmer, США).

Массовую долю фосфора в пробах определяли в соответствии с ГОСТ 26657-97. Навеску массой 2–4 г помещали в пробирку для разложения, добавляли 20 мл (36 г) концентрированной серной кислоты, 0,5 г смеси сернокислой меди и металлического селена (соотношение 100 : 3). Полученный минерализат охлаждали при комнатной температуре и растворяли в мерной колбе объемом 250 мл. От полученного раствора отбирали 2 мл в коническую колбу объемом 100 мл, добавляли в нее 50 мл молибденово-сурьмяновиннокислого реактива, затем выдерживали 30 минут при комнатной температуре, после чего измеряли интенсивность окрашивания раствора на спектрофотометре ПЭ-5300 ВИ в кювете с рабочими гранями 10 мм при длине волны 710 нм. Параллельно проводили измерение интенсивности окрашивания серии градуировочных растворов молибденово-сурьмяновиннокислым реактивом с известной концентрацией. Полученные результаты оптической плотности растворов использовали для расчета массовой доли фосфора в мг/100 г пробы.

Для решения основных задач исследования использовалась экспериментальная установка (Патент № 2363792 С1) струя – преграда (рис. 1) [21].

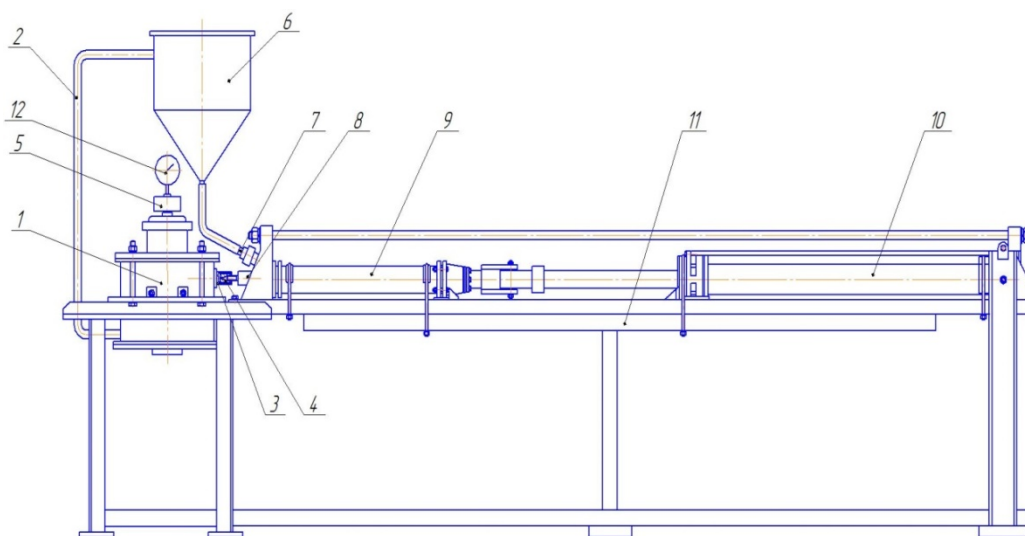


Рис. 1. Схема экспериментальной установки «струя – преграда»: 1 – узел комбинированного размола; 2 – трубопровод возврата; 3 – раструб; 4 – насадка; 5 – тормозное устройство; 6 – емкость; 7 – всасывающий клапан; 8 – выпускной клапан; 9 – рабочий цилиндр; 10 – приводной цилиндр; 11 – рама; 12 – тахометр

Установка оснащена двумя электродвигателями (1 – на холостой ход (всасывание суспензии), 2 – рабочий ход (кавитационное воздействие)). Мощность электродвигателя – 7.5 кВт. Для экспериментального исследования влияния кавитации вентилем перепускного клапана насосной станции устанавливалось давление в рабочем цилиндре от 4 до 16 МПа. Для данного исследования были приняты оптимальные параметры насадки и расстояние от насадки до преграды. Насадка диаметром 0.002 м, с углом конусности 30°, расстояние от насадки до преграды принято 0.2 м.

Для подготовки к кавитационной обработке рапсовый жмых замачивался в воде на 5 мин при температуре 20 °С, далее перемешивался на магнитной мешалке до равномерного распределения частиц и подавался в емкость 6 установки «струя – преграда» в объеме 0.01 м³ для каждого опыта. Для получения 5% концентрации суспензии на 10 л воды замачивалось 500 г рапсового жмыха. Отборы проб осуществлялись при 5, 20 и 35 циклах обработки, 1 цикл обработки соответствовал 5 сек кавитационного воздействия в установке, таким образом, продолжительность кавитационного воздействия на суспензию составляла 25, 100 и 175 сек. Скорость вращения подвижной преграды при необходимости регулировалась тормозным устройством, установленным на валу турбины. Опыты производились при угловых скоростях вращения подвижной преграды до 50 рад/с.

После отбора пробы суспензию центрифугировали при 3500 об./мин в течение 30 мин при 20 °С. В результате центрифугирования получали твердый остаток суспензии, состоящий преимущественно из разрушенных семенных оболочек, и белковую пасту. Для определения потерь при обработке рапсового жмыха с кавитационной установки были собраны промывные воды. Промывные воды для исследования концентрировались на ротационном испарителе ЭКРОС-8920 (ПЭ-8920, Россия) до содержания сухих веществ более 50%. Далее анализировали химический состав твердого остатка суспензии, белковой пасты и промывных вод.

В статистическом анализе полученных данных применяли методы параметрической статистики: расчет арифметической средней и ошибки измерения ($M \pm m$), с доверительной вероятностью 95%.

Обсуждение результатов

Для исследования влияния процесса гидродинамической кавитации на изменение химического состава рапсового жмыха был проведен эксперимент по определению рационального количества циклов обработки. На рисунках 2, 3 представлены результаты по содержанию остаточного масла и суммарного белка в полученных фракциях в зависимости от количества циклов обработки, в процентах от содержания в контрольном образце. Контрольным образцом являлся исходный рапсовый жмых без обработки с содержанием белка 35.62 г/100 г а.с.м. жмыха, содержанием масла 9.05 г/100 г а.с.м. жмыха.

Как следует из представленных данных, в процессе гидродинамической кавитации наблюдалось снижение концентрации белка и масла в твердом остатке и белковой суспензии, в связи с переходом в жидкую фракцию – промывных вод. Максимальное количество белка в твердом остатке и белковой пасте содержалось после 5 циклов обработки и составляло 23.98 и 66.65% от содержания в контрольном образце рапсового жмыха, что соответствовало 8.76 г в 100 г а.с.м. в твердом остатке и 24.34 г в 100 г а.с.м. в белковой пасте.

Увеличение количества циклов обработки наиболее эффективно снижало остаточную маслянисть в белковой пасте – на 4.08% и на 2.09% в твердом остатке.

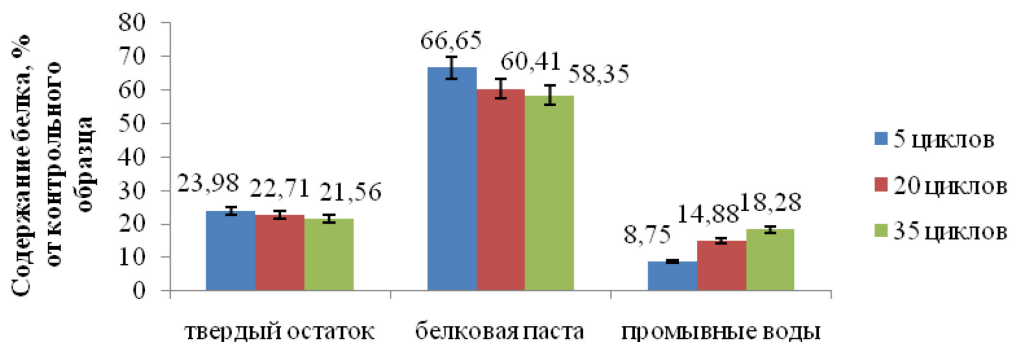


Рис. 2. Изменение содержания белка в рапсовом жмыхе в зависимости от количества циклов обработки

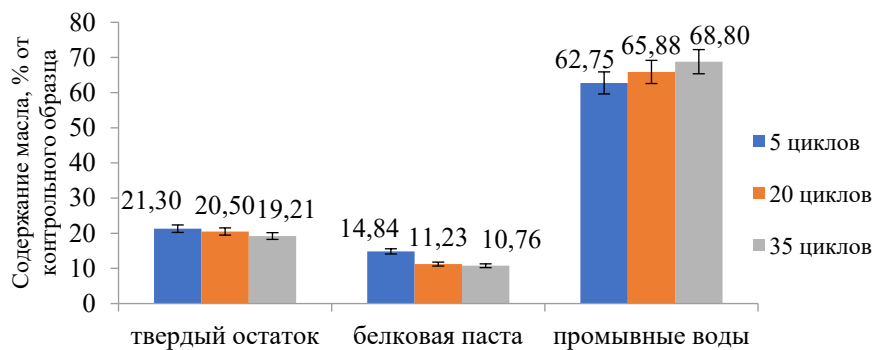


Рис. 3. Изменение содержания масла в рапсовом жмыхе в зависимости от количества циклов обработки

Концентрация белка в промывных водах характеризует фактические потери в процессе кавитации, поэтому увеличение количества циклов обработки до 20 и 35 технологически нецелесообразно. Однако если технологической задачей является снижение масличности рапсового жмыха для получения обезжиренного аналога шрота без применения химической экстракции, тогда наиболее эффективным является проведение 35 циклов гидродинамической кавитации сырья. Остаточная масличность при такой обработке сопоставима с химическими методами обезжиривания и составляет 1.73 г/100 г а.с.м. в твердом остатке и 0.97 г/100 г а.с.м. в белковой пасте.

Рапсовый жмых является не только перспективным белковым ингредиентом, но и потенциальным источником углеводов. Рапсовый жмых содержит большое количество полисахаридов клеточной стенки, больше, чем соевая мука, которая обычно используется в кормовой промышленности [22].

Б.Х. Галиевым и др. было установлено, что кавитационная обработка ультразвуком концентрированных кормов оказала положительное влияние на содержание сахаров. Количество сырой клетчатки снизилось в зерне ржи на 7.10–20.3%, пшеницы – на 14.30–32.10%, в подсолнечном жмыхе – на 15.40–24.12%. При этом положительный эффект наблюдался по содержанию сахаров, их количество увеличилось в зерне ржи и пшеницы на 10.90 и 23.8%, в подсолнечном жмыхе – на 18.80–25.00% и в кормовых дрожжах – на 58.30–108.30% [23].

Результаты исследования влияния количества циклов обработки при гидродинамической кавитации на углеводный состав рапсового жмыха представлены на рисунке 4.

Полученные результаты согласуются с данными других исследователей. Гидродинамическая обработка рапсового жмыха приводит к разрыву молекул целлюлозы, снижению содержания клетчатки и увеличению содержания растворимых углеводов. Так, минимальное содержание клетчатки наблюдалось после 35 циклов обработки во всех фракциях, уменьшение концентрации составило 9.87% для твердого остатка, 3.86% для белковой пасты. Содержание растворимых углеводов достигало максимума также после 35 циклов обработки, увеличение концентрации составило 9.54% для твердого остатка и 3.09% для белковой пасты. Концентрация клетчатки и растворимых углеводов в промывных водах была незначительной – от 1.37 до 2.87% клетчатки и от 2.11 до 2.76% растворимых углеводов, но общая тенденция снижения содержания клетчатки и повышения содержания растворимых углеводов при увеличении количества циклов обработки сохранялась.

Для комплексной оценки влияния гидродинамической кавитации на изменение химического состава рапсового жмыха был исследован минеральный состав твердого остатка суспензии и белковой пасты (табл.).

Из данных таблицы следует, что гидродинамическая кавитация приводит к снижению минеральных компонентов в полученных фракциях жмыха. Суммарные потери составили от 28.47 до 40.51% в твердом остатке и от 43.21 до 48.36% в белковой пасте. Также существенно различается минеральный состав твердого остатка и белковой пасты. В твердом остатке содержится больше калия, кальция, фосфора, хрома и кобальта, а в белковой пасте выше концентрации магния, железа, марганца.

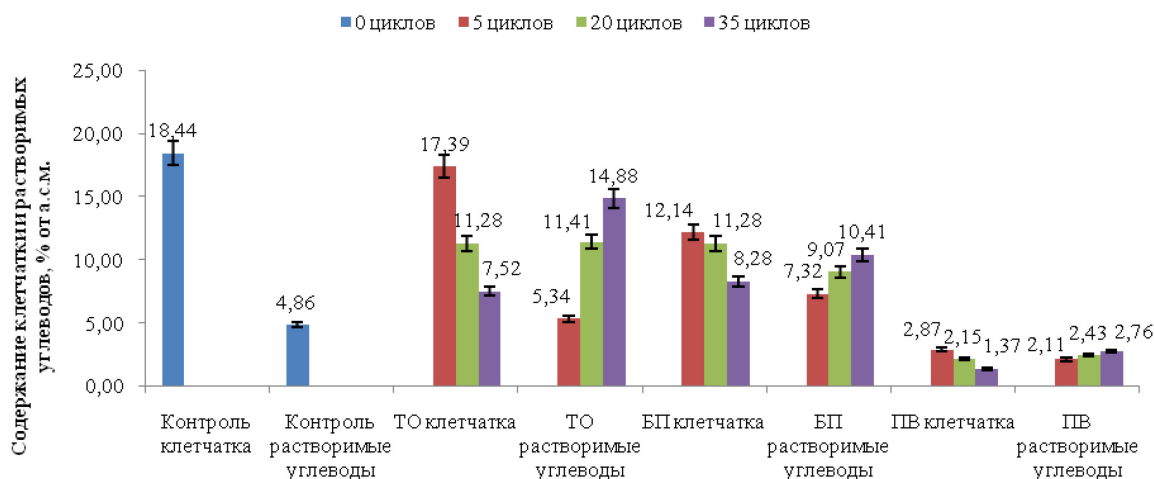


Рис. 4. Изменение содержания клетчатки и растворимых углеводов в твердом остатке суспензии (ТО), белковой пасте (БП) и в промывных водах (ПВ) в зависимости от количества циклов обработки

Минеральный состав фракций рапсового жмыха после гидродинамической кавитации

Элемент	Содержание, мг/кг ⁻¹ а.с.м.						
	Контроль	Твердый остаток			Белковая паста		
		5 циклов	20 циклов	35 циклов	5 циклов	20 циклов	35 циклов
Na	175.35±2.3	155.82±1.2	143.25±	134.26±1.8	45.93±1.3	33.15±0.9	27.52±1.1
K	7872.15±98.75	6882.32±84.36	6622.57±58.14	6632.31±65.27	5824.11±47.41	5595.57±46.13	5342.61±88.71
Ca	3055.6±61.62	2352.97±68.98	2139.62±58.46	2002.35±96.15	2064.88±46.03	1978.53±57.21	1867.72±67.43
P	9243.21±79.77	5597.96±65.12	4547.22±52.31	4315.64±47.13	1865.35±58.25	1743.43±52.78	1512.87±29.09
Mg	5605.96±113.16	3595.22±36.59	2457.56±53.96	2376.88±86.53	4860.96±86.45	4736.84±41.26	4582.65±57.93
Fe	73.69±1.9	43.67±2.3	37.59±1.7	31.25±1.5	60.52±1.1	58.47±2.4	52.36±1.6
Zn	43.55±1.2	47.20±1.1	41.55±2.0	39.51±1.8	49.87±2.9	46.13±0.7	45.22±3.1
Cu	7.42±0.6	6.86±0.3	6.32±0.4	6.75±0.2	4.87±0.3	4.13±0.2	3.89±0.1
Mn	75.82±2.1	26.93±1.3	17.3±1.5	16.58±0.6	42.66±0.9	36.53±1.7	35.25±2.2
Cr	107.4±6.3	73.50±1.7	70.21±5.1	65.46±3.3	24.31±1.4	23.84±2.50	23.35±1.90
Co	1.51±0.10	1.23±0.11	1.21±0.15	1.17±0.10	0.24±0.01	0.14±0.02	0.11±0.01
Ni	0.81±0.03	0.78±0.03	0.75±0.01	0.73±0.02	0.18±0.02	0.15±0.01	0.14±0.01
Σ _{конц.} , мг/кг ⁻¹	26262.47	18784.46	16085.23	15622.89	14913.78	14326.81	13561.57
Потери, % от контроля		28.47	38.75	40.51	43.21	45.45	48.36

Основными макроэлементами в исходном рапсовом жмыхе и полученных фракциях после кавитационной обработки являются калий, кальций, фосфор и магний, также можно отметить низкую концентрацию натрия. В процессе гидродинамической кавитации наиболее сильно понижается концентрация фосфора на 39–53% в твердом остатке и на 79–83% в белковой пасте, что вероятно связано с эффектом обезжиривания полученной суспензии, так как основное количество фосфора входит в состав фосфолипидов растительного масла, которое удаляется в процессе обработки.

Выводы

В результате гидродинамической кавитационной обработки рапсового жмыха были получены фракции суспензии в виде твердого остатка, состоящего из разрушенных семенных оболочек с концентрацией клетчатки до 17.39%, белковой пасты с концентрацией белка до 24.34% и промывных вод, представляющих собой белково-масляную эмульсию. Твердый остаток суспензии является перспективным сырьем для получения пищевых волокон, а белковая паста при дальнейшей очистке и концентрировании может использоваться как концентрат или изолят рапсового белка. В ходе проведенных исследований было установлено, что кавитационная обработка рапсового жмыха на установке струя – преграда снижает концентрацию белков, масла, клетчатки и минеральных компонентов в полученных фракциях в зависимости от количества циклов обработки. Наибольшее содержание белка, масла, клетчатки и минеральных веществ в твердом

остатке и белковой пасте наблюдалось после 5, наименьшее – после 35 циклов обработки, в связи с переходом в раствор и концентрирования в промывных водах. В то же время при исследовании содержания растворимых углеводов наблюдалась обратная взаимосвязь – увеличение количества циклов обработки повышало содержание растворимых углеводов от 5.34 до 14.88% в твердом остатке и от 7.32 до 10.41% в белковой пасте. Этот эффект может являться существенным преимуществом кавитационной обработки рапсового жмыха при производстве кормовой продукции для животноводства с целью повышения энергетической ценности кормов. Также важным результатом процесса гидродинамической кавитации рапсового жмыха является снижение содержания масла в полученных фракциях, после 35 циклов обработки концентрация масла снизилась до 1.73 г в 100 г а.с.м. твердого остатка и до 0.97 г в 100 г а.с.м. белковой пасты. Таким образом, гидродинамическую обработку рапсового жмыха на кавитационной установке струя – преграда можно рассматривать как альтернативный нехимический способ обезжиривания растительного сырья.

Финансирование

Исследования и публикация статьи выполнены при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» и предприятия ООО «Диалог-Агро-2» в ходе выполнения проекта №20241022-08640 «Разработка технологии получения корма и кормовых добавок для молочного КРС из рапсового жмыха с защищенным белком».

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Zheng Q., Liu K. Worldwide rapeseed (*Brassica napus* L.) research: A bibliometric analysis during 2011–2021 // Oil Crop. Science. 2022. Vol. 7, no. 4. Pp. 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2022.11.004>.
2. Murphy D.J. Agronomy and environmental sustainability of the four major global vegetable oil crops: oil palm, soybean, rapeseed, and sunflower // Agronomy. 2025. Vol. 15. 1465. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061465>.
3. Wanasundara J.P.D., Tan S., Alashi A.M., Pudel F., Blanchard C. Proteins from canola/rapeseed: current status. Amsterdam, 2017.
4. Petraru A., Amariei S. Oil press-cakes and meals valorization through circular economy approaches: A review // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. 7432.
5. Grahovac N., Aleksic M., Trajkovska B., Marjanovic J.A., Nakov G. Extraction and valorization of oilseed cakes for value-added food components – a review for a sustainable foodstuff production in a case process approach // Foods. 2025. Vol. 14. 2244. <https://doi.org/10.3390/foods14132244>.
6. Baker P.W., Visnjevec A.M., Krienke D., Preskett D., Schwarzkopf M., Charlton A. Pilot scale extraction of protein from cold and hot-pressed rapeseed cake: Preliminary studies on the effect of upstream mechanical processing // Food and Bioproducts Processing. 2022. Vol. 133. Pp. 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2022.03.007>.
7. Jia W., Rodriguez-Alonso E., Bianeis M., Keppler J.K., Jan van der Goot A. Assessing functional properties of rapeseed protein concentrate versus isolate for food applications // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2021. Vol. 68. 102636, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102636>.
8. Vidal N.P., Roman L., Swaraj V.J.Sh., Ragavan K.V., Simsek S., Rahimi J., Kroetsch B., Martinez M.M. Enhancing the nutritional value of cold-pressed oilseed cakes through extrusion cooking // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2022. Vol. 77. 102956. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102956>.
9. Petraru A., Amariei S. Rapeseed-an important oleaginous plant in the oil industry and the resulting meal a valuable source of bioactive compounds // Plants. 2024. Vol. 13(21). 3085. <https://doi.org/10.3390/plants13213085>.
10. Liu G., Zhou J., Wang Yi., Fang Sh., Fan Zh., Xie Ch., Wang P., Yang R. A simple waste-to-wealth strategy: sustainable bioconversion of rapeseed meal-derived glucosinolates into antimicrobial isothiocyanates // Food Chemistry. 2025. Vol. 495 (2). 146469. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146469>.
11. Bagnani M., Ehrenguber S., Soon W.L., Peydayesh M., Miserez A., Mezzenga R. Rapeseed cake valorization into bioplastics based on protein amyloid fibrils // Adv. Mater. Technol. 2023. Vol. 8. 2200932. <https://doi.org/10.1002/admt.202200932>.
12. Golebiewska K., Fras A., Golebiewski D. Rapeseed meal as a feed component in monogastric animal nutrition – a review // Ann. Anim. Sci. 2022. Vol. 22, no. 4. Pp. 1163–1183. <https://doi.org/10.2478/aoas-2022-0020>.
13. Wnek-Auguscik K., Witeska M., Niemiec T., Piotrowska I., Fajkowska M., Gomulka P., Kondera E., Lozicki A., Zglinska K., Rzepkowska M. The effects of diets containing rapeseed meal on Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*)

- growth, muscle composition, and physiological performance // *Aquaculture Reports*. 2024. Vol. 34. 101891. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101891>.
14. Wongsirichot P., Gonzalez-Miquel M., Winterburn J. Recent advances in rapeseed meal as alternative feedstock for industrial biotechnology // *Biochemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 180. 108373. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108373>.
 15. Ciriminna R., Scurreia A., Pagliaro M. Natural product extraction via hydrodynamic cavitation // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2023. Vol. 33. 101083. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101083>.
 16. Литвинова М.М., Алашкевич Ю.Д., Марченко Р.А., Болгов Д.Г. Влияние окружной скорости вращения подвижной преграды при гидродинамическом воздействии на техническую коноплю // *Химия растительного сырья*. 2025. №2. С. 391–398. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250216968>.
 17. Литвинова М.М., Алашкевич Ю.Д., Марченко Р.А. Особенности безножевого размола волокнистых полуфабрикатов из однолетних растений в целлюлозно-бумажном производстве // *Хвойные бореальной зоны*. 2024. Т. 42, №2. С. 88–94. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-2-88-94>.
 18. Sun X., Xu H., Xuan X., Manickam S., Boczkaj G., Wang B. Assessing the industrialization progress of hydrodynamic cavitation process intensification technology: a review // *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2024. Vol. 45. 101037. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2024.101037>.
 19. Preece K.E., Hooshyar N., Krijgsman A.J., Fryer P.J., Zuidam N.J. Intensification of protein extraction from soybean processing materials using hydrodynamic cavitation // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2017. Vol. 41. Pp. 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.01.002>.
 20. Swapnil S.B., Rohidas B., Suja G., Virendra K.S. Valorization of waste cooking oil (WCO) into biodiesel using acoustic and hydrodynamic cavitation // *Advanced Technology for the Conversion of Waste into Fuels and Chemicals*. Woodhead Publishing, 2021. Pp. 231–272. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823139-5.00015-0>.
 21. Патент №2363792 С1 (РФ). Установка для измельчения волокнистого материала / Ю.Д. Алашкевич, В.И. Ковалев, А.И. Невзоров, Р.А. Марченко. – 10.08.2009.
 22. Cheng L., Xiao-Long Q., Koen V. Chemical and nutritional characteristics, and microbial degradation of rapeseed meal recalcitrant carbohydrates: A review // *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.948302>.
 23. Галиев Б.Х., Ширнина Н.М., Байков А.С., Мирошников И.С., Корнейченко В.И., Сечин В.А. Влияние кавитационной обработки на химический состав, питательность и переваримость сухого вещества концентрированных кормов // *Вестник мясного скотоводства*. 2017. №4(100). С. 190–196.

Поступила в редакцию 23 октября 2025 г.

После переработки 4 декабря 2025 г.

Принята к публикации 5 декабря 2025 г.

Smol'nikova Ya.V.^{1*}, Alashkevich Yu.D.², Marchenko R.A.², Khanipova V.A.¹, Makarov A.V.¹, Broshko D.V.¹, Stutko O.V.¹, Brusova Yu.N.¹ INVESTIGATION OF THE COMPOSITION OF *BRASSICA NAPUS* CAKE DURING CAVITATION TREATMENT

¹ Krasnoyarsk State Agrarian University, ave. Mira, 90, Krasnoyarsk, 660049, Russia, ya104@yandex.ru

² Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, ave. Krasnoyarskiy rabochiy, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russia

The paper presents the results of studies of the influence of hydrodynamic cavitation processes on the jet-barrier installation to determine the effectiveness of this technology in the processing of rapeseed cake. The aim of the study was to study the composition of rapeseed cake under various modes of hydrodynamic cavitation, in connection with which, rapeseed cake suspensions were obtained during 5, 20 and 35 cycles of cavitation treatment; the protein content, residual oil content, fiber and soluble carbohydrates in the obtained fractions of rapeseed cake were determined; and the mineral composition was studied. The following methods were used in the study: determination of oil by the Randall method, determination of protein by the Kjeldahl method, determination of fiber by the Veende method, determination of the content of soluble carbohydrates in accordance with GOST 26176-2019, determination of mineral composition by atomic absorption spectrometry in accordance with GOST 32343-2013.

As a result, fractions of the suspension were obtained in the form of a solid residue, protein paste and washing water. An increase in the number of processing cycles reduced the concentrations of proteins (by 2.42% in solids, by 8.3% in protein paste), oil (by 2% in solids, 4% in protein paste), fiber (by 9.87% in solids, 3.86% in protein paste), mineral components (about 40%) and increased the content of soluble carbohydrates (by 9.54% in the solid, by 3.09% in the protein paste).

Thus, it was found that cavitation treatment of rapeseed cake at the jet barrier plant provides a reduction in oil content and an increase in the content of soluble carbohydrates, which allows us to consider this technology as an alternative method for obtaining feed products, protein concentrates and food additives based on rapeseed cake.

Keywords: hydrodynamic cavitation, rapeseed cake, proteins, fiber, mineral composition.

For citing: Smol'nikova Ya.V., Alashkevich Yu.D., Marchenko R.A., Khanipova V.A., Makarov A.V., Broshko D.V., Stutko O.V., Brusova Yu.N. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 1, pp. 341–350. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260118109>.

References

1. Zheng Q., Liu K. *Oil Crop. Science*, 2022, vol. 7, no. 4, pp. 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2022.11.004>.
2. Murphy D.J. *Agronomy*, 2025, vol. 15, 1465. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061465>.
3. Wanasundara J.P.D., Tan S., Alashi A.M., Pudil F., Blanchard C. *Proteins from canola/rapeseed: current status*. Amsterdam, 2017.
4. Petraru A., Amariei S. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, 7432.
5. Grahovac N., Aleksic M., Trajkovska B., Marjanovic J.A., Nakov G. *Foods*, 2025, vol. 14, 2244. <https://doi.org/10.3390/foods14132244>.
6. Baker P.W., Visnjevec A.M., Krienke D., Preskett D., Schwarzkopf M., Charlton A. *Food and Bioproducts Processing*, 2022, vol. 133, pp. 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2022.03.007>.
7. Jia W., Rodriguez-Alonso E., Bianeis M., Keppler J.K., Jan van der Goot A. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, vol. 68, 102636. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102636>.
8. Vidal N.P., Roman L., Swaraj V.J.Sh., Ragavan K.V., Simsek S., Rahimi J., Kroetsch B., Martinez M.M. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, vol. 77, 102956. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102956>.
9. Petraru A., Amariei S. *Plants*, 2024, vol. 13(21), 3085. <https://doi.org/10.3390/plants13213085>.
10. Liu G., Zhou J., Wang Yi., Fang Sh., Fan Zh., Xie Ch., Wang P., Yang R. *Food Chemistry*, 2025, vol. 495 (2), 146469. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146469>.
11. Bagnani M., Ehrenguber S., Soon W.L., Peydayesh M., Miserez A., Mezzenga R. *Adv. Mater. Technol.*, 2023, vol. 8, 2200932. <https://doi.org/10.1002/admt.202200932>.
12. Golebiewska K., Fras A., Golebiewski D. *Ann. Anim. Sci.*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 1163–1183. <https://doi.org/10.2478/aoas-2022-0020>.
13. Wnek-Auguscik K., Witeska M., Niemiec T., Piotrowska I., Fajkowska M., Gomulka P., Kondera E., Lozicki A., Zglinska K., Rzepkowska M. *Aquaculture Reports*, 2024, vol. 34, 101891. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101891>.
14. Wongsirichot P., Gonzalez-Miquel M., Winterburn J. *Biochemical Engineering Journal*, 2022, vol. 180, 108373. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108373>.
15. Ciriminna R., Scurria A., Pagliaro M. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2023, vol. 33, 101083. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101083>.
16. Litvinova M.M., Alashkevich Yu.D., Marchenko R.A., Bolgov D.G. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2025, no. 2, pp. 391–398. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250216968>. (in Russ.).
17. Litvinova M.M., Alashkevich Yu.D., Marchenko R.A. *Khvoynnye boreal'noy zony*, 2024, vol. 42, no. 2, pp. 88–94. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-2-88-94>. (in Russ.).
18. Sun X., Xu H., Xuan X., Manickam S., Boczkaj G., Wang B. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2024, vol. 45, 101037. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2024.101037>.

* Corresponding author.

19. Preece K.E., Hooshyar N., Krijgsman A.J., Fryer P.J., Zuidam N.J. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, vol. 41, pp. 47–55, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.01.002>.
20. Swapnil S.B., Rohidas B., Suja G., Virendra K.S. *Advanced Technology for the Conversion of Waste into Fuels and Chemicals*. Woodhead Publishing, 2021, pp. 231–272. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823139-5.00015-0>.
21. Patent 2363792 C1 (RU). 10.08.2009. (in Russ.).
22. Cheng L., Xiao-Long Q., Koen V. *Frontiers in Nutrition*, 2022, vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.948302>.
23. Galiyev B.Kh., Shirnina N.M., Baykov A.S., Miroshnikov I.S., Korneychenko V.I., Sechin V.A. *Vestnik myasnogo skotovodstva*, 2017, no. 4(100), pp. 190–196. (in Russ.).

Received October 23, 2025

Revised December 4, 2025

Accepted December 5, 2025

Сведения об авторах

Смоляникова Яна Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии консервирования и пищевой биотехнологии, заведующая научно-исследовательской лабораторией проблем переработки масличных культур, ya104@yandex.ru

Алашкевич Юрий Давыдович – доктор технических наук, профессор, академик РАО, alashkevichud@sibsau.ru

Марченко Роман Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой МАПТ, marchenkora@sibsau.ru

Ханипова Вера Александровна – кандидат биологических наук, доцент, директор научно-исследовательского испытательного центра, gasi.vera@yandex.ru

Макаров Андрей Витальевич – кандидат биологических наук, доцент, andmak83@yandex.ru

Брошко Доминик Василь – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории проблем переработки масличных культур, qeryou@yandex.ru

Стутко Оксана Валериевна – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории проблем переработки масличных культур, stutko_ov@mail.ru

Брусова Юлия Николаевна – аспирант, лаборант научно-исследовательской лаборатории проблем переработки масличных культур, yuliya_brusova1@mail.ru

Information about authors

Smolnikova Yana Viktorovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Canning Technology and Food Biotechnology, Head of the Research Laboratory for Oilseed Processing Problems, ya104@yandex.ru

Alashkevich Yuri Davydovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Education, alashkevichud@sibsau.ru

Marchenko Roman Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of MAPT, marchenkora@sibsau.ru

Khanipova Vera Aleksandrovna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Director of the Research and Testing Center, gasi.vera@yandex.ru

Makarov Andrey Vitalievich – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, andmak83@yandex.ru

Broshko Dominik Vasil – Researcher at the Research Laboratory for Oilseed Processing Problems, qeryou@yandex.ru

Stutko Oksana Valerievna – Researcher, Research Laboratory for Oilseed Processing, stutko_ov@mail.ru

Brusova Yulia Nikolaevna – Postgraduate Student, Laboratory Assistant, Research Laboratory for Oilseed Processing, yuliya_brusova1@mail.ru