

Яна Викторовна Смольникова^{1✉}, Сергей Витальевич Хижняк², Марина Анатольевна Янова³, Оксана Валериевна Стутко⁴, Андрей Витальевич Макаров⁵, Вера Александровна Ханипова⁶, Радосвет Дмитриевич Землянский⁷, Анастасия Сергеевна Тимофеева⁸, Доминик Василь Брошко⁹

^{1,2,3,4,5,6,7,8,9}Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

¹ya104@yandex.ru

²skhizhnyak@yandex.ru

³yanova.m@mail.ru

⁴stutko_ov@mail.ru

⁵andmak83@yandex.ru

⁶gasi.vera@yandex.ru

⁷radosvet2001@gmail.com

⁸veterinariusexamen@gmail.com

⁹qeryou@yandex.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСТРУДИРОВАНИЯ РАПСОВОГО ЖМЫХА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОРМОВОЙ ДОБАВКИ С ЗАЩИЩЕННЫМ БЕЛКОМ

Цель исследования – определение оптимальных технологических параметров процесса экструдирования рапсового жмыха, частично обезжиренного методом гидродинамической кавитации. Рапсовый жмых получали путем двукратного отжима на электрическом маслопрессе для холодного и горячего отжима масла АКJP-2000 deluxe (Akitajp, Тайвань) при температуре отжима 50 °С. Семена рапса ярового произрастали в хозяйстве ООО «ОПХ Соляное», чья территория относится к Среднесибирскому плоскогорью, в пределах земледельческой части которого выделена Рыбинская котловина (в южной части). Уборку семян осуществляли на стадии полной спелости зерна (101–110-й день от всходов). Полученный жмых частично обезжиривали с применением гидродинамической кавитации и далее экструдировали. Исследуемыми технологическими параметрами являлись температура экструзии и влажность жмыха, функциями отклика – количество клетчатки, % а.с.м., и количество нерасщепляемого белка, % от общего белка. Для обоснования оптимальных параметров экструзии рапсового жмыха был использован статистический метод планирования экспериментов. В процессе экструдирования рапсового жмыха наблюдалось снижение количества клетчатки и повышение содержания нерасщепляемого белка. В результате математического моделирования процесса экструзии установлено, что основное влияние на количество клетчатки и содержание нерасщепляемого белка оказала температура экструзии. Показатель силы влияния температуры, рассчитанный как выраженное в процентах отношение факториальной суммы квадратов к общей сумме квадратов составил для клетчатки 89,65 % и для белка 87,64 %. Влажность экструдированного жмыха оказывала значительно меньший эффект, показатель силы влияния составил 4,74 % для клетчатки и 3,81 % для белка. Так как для разработки кормов с защищенным белком базовым показателем является количество белка, нерасщепляемого в рубце, для экструдирования рапсового жмыха оптимальными параметрами являются температура процесса 130 °С и влажность жмыха 20 %, при этих параметрах концентрация нерасщепляемого белка максимальна – 77,39 %.

Ключевые слова: экструдирование, рапсовый жмых, уравнение регрессии, оптимизация, клетчатка, белок

Для цитирования: Смольникова Я.В., Хижняк С.В., Янова М.А., и др. Оптимизация технологических параметров экструдирования рапсового жмыха для получения высокобелкового корма с защищенным белком // Вестник КрасГАУ. 2026. № 6. С. 293–310. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-6-293-310.

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».

Yana Viktorovna Smolnikova^{1✉}, **Sergey Vitalievich Khizhnyak**², **Marina Anatolyevna Yanova**³, **Oksana Valerievna Stutko**⁴, **Andrey Vitalievich Makarov**⁵, **Vera Aleksandrovna Khanipova**⁶, **Radosvet Dmitrievich Zemlyansky**⁷, **Anastasia Sergeevna Timofeeva**⁸, **Dominik Vasil Broshko**⁹

^{1,2,3,4,5,6,7,8,9}Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

¹ya104@yandex.ru

²skhizhnyak@yandex.ru

³yanova.m@mail.ru

⁴stutko_ov@mail.ru

⁵andmak83@yandex.ru

⁶gasi.vera@yandex.ru

⁷radosvet2001@gmail.com

⁸veterinariusexamen@gmail.com

⁹qeryou@yandex.ru

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF RAPESEED CAKE EXTRUSION TO OBTAIN A FEED ADDITIVE WITH PROTECTED PROTEIN

The objective of the study is to determine the optimal process parameters for extruding rapeseed cake partially defatted using hydrodynamic cavitation. The rapeseed cake was obtained by double pressing using an AKJP-2000 deluxe electric oil press (Akitajp, Taiwan) for cold and hot pressing at a pressing temperature of 50 °C. Spring rapeseed was grown on the Solyanskoye Agricultural Farm, a farm located in the Central Siberian Plateau, with the Rybinsk Basin (in the southern part) designated as its agricultural area. The seeds were harvested at full grain maturity (101–110 days after germination). The resulting cake was partially defatted using hydrodynamic cavitation and then extruded. The process parameters studied were extrusion temperature and cake moisture content, while the response functions were fiber content (% a.d.m.) and undigestible protein content (% of total protein). A statistical design of experiments (DSE) method was used to substantiate the optimal rapeseed cake extrusion parameters. During rapeseed cake extrusion, a decrease in fiber content and an increase in undigestible protein content were observed. Mathematical modeling of the extrusion process revealed that extrusion temperature had the primary influence on fiber content and undigestible protein content. The temperature effect, calculated as the factorial sum of squares to the total sum of squares, was 89.65 % for fiber and 87.64 % for protein, respectively. The moisture content of the extruded cake had a significantly smaller effect, with an effect of 4.74 % for fiber and 3.81 % for protein. Since the amount of rumen-undegradable protein is the key parameter for developing protein-protected feeds, the optimal parameters for rapeseed cake extrusion are a process temperature of 130 °C and a cake moisture content of 20 %. Under these parameters, the concentration of rumen-undegradable protein is at its maximum—77.39 %.

Keywords: extrusion, rapeseed cake, regression equation, optimization, fiber, protein

For citation: Smolnikova YaV, Khizhnyak SV, Yanova MA, et al. Optimization of technological parameters of rapeseed cake extrusion to obtain a feed additive with protected protein. *Bulletin of KSAU*. 2026;(6):293-310. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-6-293-310.

Funding: research and publication of the paper were carried out with the financial support of the Krasnoyarsk Regional Fund for the Support of Scientific and Scientific-Technical Activities and the enterprise Dialog-Agro-2 LLC during the implementation of project № 20241022-08640 Technology development to obtain feed and feed additives for dairy cattle from rapeseed cake with protected protein.

Введение. Полноценное белковое кормление крупного рогатого скота предусматривает обеспечение потребности организма животного в доступных для обмена аминокислотах. Одним из основных лимитирующих факторов является дефицит кормового белка и его нерациональный метаболизм в организме животных, при этом степень распадаемости протеина в рубце рассматривается как главный критерий оценки качества кормового белка, который определяет общую переваримость питательных веществ и эффективность использования азота корма животными [1–3].

Для решения данной проблемы были разработаны технологии производства кормовых добавок, позволяющие получать защищенный белок, пространственная конфигурация которого устойчива к воздействию протеолитических ферментов рубцовой микрофлоры и неспособна к распаду на аммиак и углеродную цепочку [4]. Такие кормовые добавки разработаны для снижения потерь белка при метаболизме в рубце крупного рогатого скота. Благодаря защите от распада в рубце содержащиеся в защищенных белках незаменимые аминокислоты попадают в кишечник коровы в достаточном количестве, что повышает продуктивность животного и обеспечивает высокое содержание жира и белка в молоке [5]. Таким образом, кормовые добавки с защищенным белком улучшают экономическую эффективность молочного животноводства.

В настоящее время основными способами снижения деградации белков и аминокислот в рубце являются: термическая обработка, химическая обработка, инкапсуляция, использование аналогов аминокислот и применение нанотехнологий [6].

Различные методы увеличения степени защиты белкового компонента исследуются уже в течение длительного времени, однако термическая обработка по-прежнему остается наиболее простым и доступным способом, не уступая по эффективности химическим и биотехнологическим методам [7]. Одним из распространенных приемов повышения биодоступности кормового белка является экструдирование, представляющий собой термомеханический физический процесс, при котором материал подвергается баротермической обработке при резком повышении температуры и давления за короткое время. Передача тепла и давление вызывают структурные изменения в ингредиентах корма,

такие как денатурация белка, солюбилизация волокон и желатинизация крахмала. Экструдирование является широко используемым методом при производстве продуктов питания для человека и животных [8–12].

Перспективным видом сырья для получения кормовых добавок являются жмыхи и шроты масличных растений. Они содержат большое количество белков, минеральных веществ и углеводов и активно перерабатываются с получением кормовых и пищевых продуктов.

Рапсовый жмых представляет большой интерес для глубокой переработки благодаря большим объемам посевных площадей рапса и растущей мировой популярности рапсового масла, а также высокому содержанию в своем составе белка и клетчатки. В то же время рапсовый жмых содержит ряд антипитательных факторов – глюкозинолаты, фитиновую кислоту, фенольные соединения, количество которых снижается при термической обработке. Таким образом, применение технологии экструдирования при переработке рапсового жмыха позволит повысить содержание нерасщепляемого белка и снизить количество антиалиментарных соединений в кормовых добавках.

Одним из препятствий, при переработке рапсового жмыха, полученного прессованием, является высокое содержание остаточного масла до 10–15 %. Высокая масличность может препятствовать эффективной обработке рапсового белка и затруднять процесс экструдирования. Для решения этой проблемы используют экстракцию органическими растворителями, позволяющую получать обезжиренный шрот. Альтернативным методом удаления остаточного масла, а также снижения антипитательных факторов в рапсовом жмыхе являются кавитационные технологии, в частности гидродинамическая кавитация [13]. Таким образом, сочетание технологии гидродинамической кавитации рапсового жмыха с последующим экструдированием представляет значительный интерес и может являться перспективным способом получения кормовых добавок с защищенным белком.

Цель исследования – определение оптимальных технологических параметров в процессе экструдирования рапсового жмыха, частично обезжиренного методом гидродинамической кавитации.

Задачи: оценка влияния температуры экструзии и влажности жмыха на содержание клет-

чатки и нерасщепляемого белка; выявление силы влияния и взаимосвязи технологических параметров процесса экструдирования; определение оптимальной температуры экструзии и влажности жмыха.

Объекты и методы. Объект исследования – сорт рапса ярового отечественной селекции Сибирский (Новосибирск). Семена рапса ярового произрастали в хозяйстве ООО «ОПХ Соляное», чья территория относится к Средне-Сибирскому плоскогорью, в пределах земель сельскохозяйственной части которого выделена Рыбинская котловина (в южной части). Хозяйство расположено в Канской лесостепной зоне. Уборку семян осуществляли на стадии полной спелости зерна (101–110-й день от всходов).

Рапсовый жмых получали путем двукратного отжима на электрическом маслопрессе для холодного и горячего отжима масла АКJP-2000 deluxe (Akitajp, Тайвань) при температуре отжима 50 °С. Гидродинамическую кавитацию осуществляли на роторном гидродинамическом кавитационном аппарате с рабочей камерой объемом 40 л, при гидромодуле 5 и продолжительности 30 мин. Применение предварительной кавитационной обработки рапсового жмыха за счет разрушения клеточных структур позволило снизить остаточную масличность рапсового жмыха, от 12 % в необработанном жмыхе до 4,75 % в жмыхе после кавитации.

Экструдирование частично обезжиренного рапсового жмыха проводилось в экструдере кормовом ЭК-5 при температуре 100–130 °С, примерное время нахождения сырья в рабочей зоне составляло 10 с.

Количественное определение клетчатки в образцах выполнялось по методу 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 предвари-

тельно 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).

Содержание нерасщепляемого белка определяли по ГОСТ 28074-89 «Корма растительные. Метод определения растворимости сырого протеина». Сущность метода заключается в обработке продукта буферным раствором, близким по химическому составу к рубцовой жидкости жвачных животных, последующем удалении раствора и определении содержания нерастворимого азота. Растворимость сырого протеина определяют расчетным путем по содержанию азота в испытуемой пробе до и после обработки ее буферным раствором.

В качестве программного обеспечения при обработке данных использовали пакет StatSoft STATISTICA 8.0.

Результаты и их обсуждение. Для обоснования оптимальных параметров экструзии рапсового жмыха был использован статистический метод планирования и анализ экспериментов.

Основными показателями, влияющими на качество экструдата, были выбраны температура экструзии, T (°С) и влажность жмыха W (%), значение регулируемых параметров представлено в таблице 1.

Оценка эффективности экструзии рапсового жмыха проводилась с использованием функций отклика Y_1 и Y_2 , которые были приняты в качестве следующих выходных (результатирующих) показателей процесса:

Y_1 – количество клетчатки, % а.с.м;

Y_2 – количество нерасщепляемого белка, % от общего белка.

Результаты проведенных экспериментов приведены в таблице 2. Каждый эксперимент проводился в двух повторностях.

Таблица 1

Значение регулируемых параметров оптимизации процесса экструдирования рапсового жмыха
The value of adjustable parameters for optimizing the rapeseed cake extrusion process

Регулируемый параметр	Значение					Шаг
Температура экструзии T , °С	110	120	130	140	150	10
Влажность продукта W , %	14	16	18	20	–	2

Экспериментальные значения функций отклика
Experimental values of response functions

№ п/п	Фактор		Функции отклика			
	Т, °С	W, %	Количество клетчатки, % а.с.м		Нерасщепляемый белок, % от общего белка	
			Y1	Y1	Y2	Y2
1	110	14	18,44	18,36	53,76	54,21
2	110	16	17,65	16,97	61,75	62,38
3	110	18	15,41	15,22	62,88	63,15
4	110	20	12,33	12,41	65,12	65,53
5	120	14	11,53	11,55	65,42	65,35
6	120	16	10,71	10,82	66,77	66,54
7	120	18	10,25	10,14	67,24	67,13
8	120	20	9,74	9,65	68,47	67,95
9	130	14	9,05	8,92	72,34	72,56
10	130	16	8,37	8,51	74,22	74,05
11	130	18	8,25	7,89	75,15	75,44
12	130	20	7,92	7,74	77,51	77,26
13	140	14	7,85	7,76	76,85	76,54
14	140	16	7,66	7,58	76,33	76,12
15	140	18	7,43	7,48	75,96	75,78
16	140	20	7,23	7,34	75,55	75,64
17	150	14	7,15	7,21	75,02	74,88
18	150	16	7,03	7,19	74,35	74,11
19	150	18	6,91	6,88	73,75	73,67
20	150	20	6,75	6,85	73,28	73,45

В соответствии с наблюдаемыми экспериментальными данными (табл. 2) было получено адекватное уравнение регрессии для каждого выходного показателя Y1 и Y2, используя методы множественной регрессии.

Дисперсионный анализ показал, что на количество клетчатки статистически значимо ($p < 0,001$) влияет как температура экструзии, так и влажность жмыха. Кроме того, выявился статистически значимый ($p < 0,001$) эффект взаимодействия факторов «Температура экструзии» и «Влажность жмыха». Основное влияние на количество клетчатки оказала температура экструзии (показатель силы влияния, рассчитанный

как выраженное в % отношение факториальной суммы квадратов к общей сумме квадратов, равен 89,65 %), в то время как для влажности жмыха и эффекта взаимодействия этот показатель составил соответственно 4,74 и 5,52 %. Случайное варьирование, в данном случае отражающее ошибку воспроизводимости, было незначительным (показатель силы влияния 0,09 %) (табл. 3).

Эффект температуры проявился в нелинейном снижении количества клетчатки по мере роста температуры экструзии (рис. 1).

Таблица 3

**Результаты дисперсионного анализа влияния факторов оптимизации
на количество клетчатки**

The results of the variance analysis of the effect of optimization factors on the amount of fiber

Источник варьирования	Показатель силы влияния, %	Статистическая значимость, p
Т, °С	89,65	< 0,001
W, %	4,74	< 0,001
Т, °С · W, %	5,52	< 0,001
Случайное варьирование	0,09	

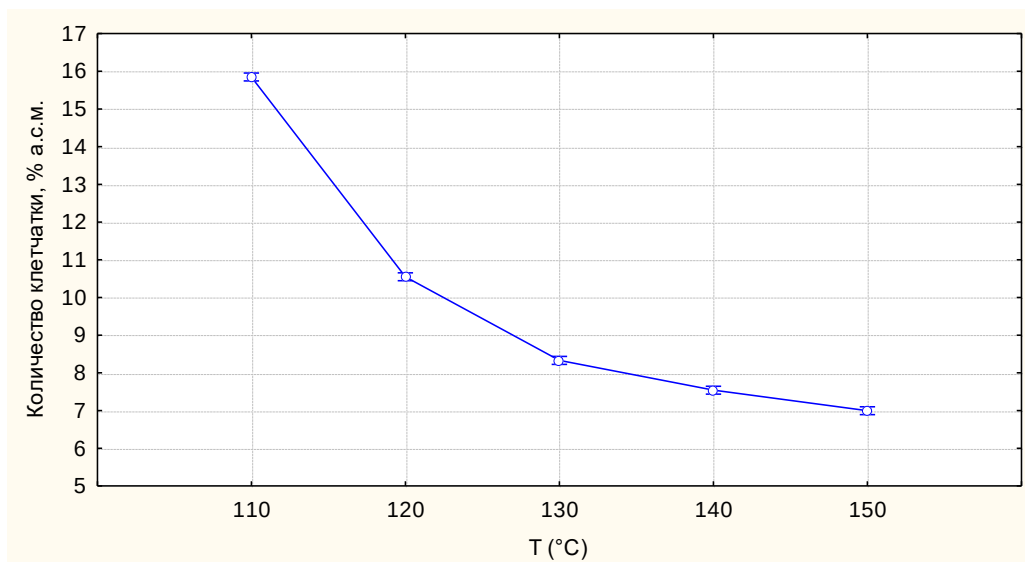


Рис. 1. Влияние температуры на среднее по вариантам и повторностям количество клетчатки
The effect of temperature on the average amount of fiber in terms of variants and repetitions

Высокая температура при экструзионной обработке усиливает распад углеводов, что приводит к частичному разрушению клетчатки и снижению ее содержания, при повышении температуры экструзии этот процесс увеличивается.

Эффект влажности проявился также в нелинейном снижении количества клетчатки по мере роста влажности (рис. 2).

Повышение влаги в сырье при экструзии влияет на способность клетчатки лучше гидратироваться, сохраняя ее структуру, а также сни-

зить температуру расплава, влияющей на разрушение клетчатки.

Эффект взаимодействия проявился в том, что при высоких уровнях влажности снижение выхода клетчатки при повышении температуры было не так сильно выражено, как при низких уровнях влажности (табл. 4).

Поверхность отклика, отражающая влияние температуры и влажности на количество клетчатки, представлена на рисунке 3.

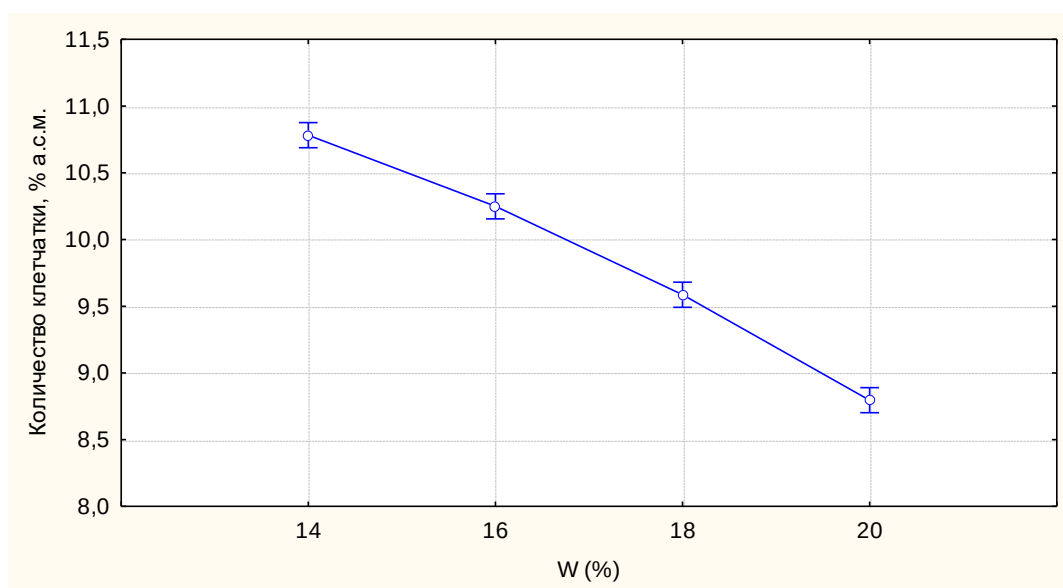
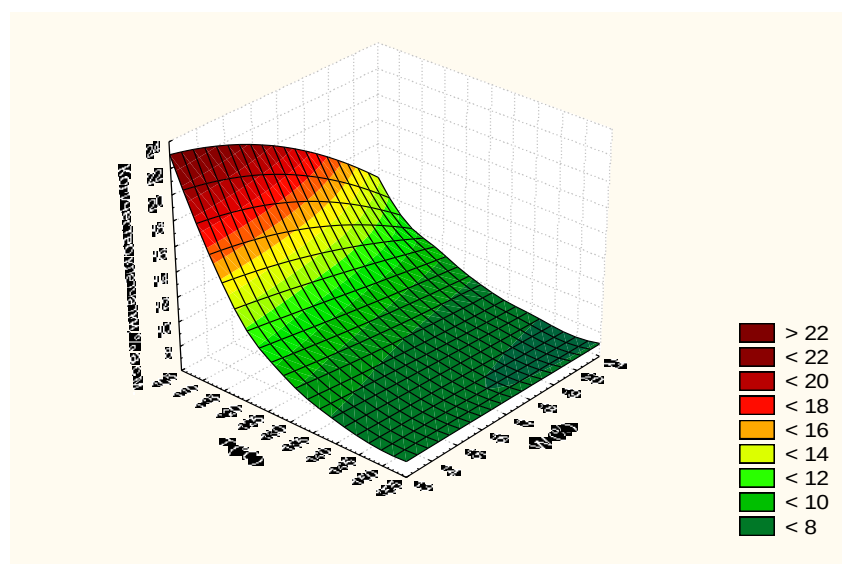


Рис. 2. Влияние влажности на среднее по вариантам и повторностям количество клетчатки
The effect of moisture on the average amount of fiber in terms of variants and repetitions

**Влияние температуры на среднее по повторностям количество клетчатки
при разных уровнях влажности**

The effect of temperature on the average amount of fiber in repetitions at different moisture levels

Т, °С	W, %	Количество клетчатки	Стандартная ошибка	95 %-е доверительные границы для среднего	
				нижняя	верхняя
110	14	18,40	0,10	18,19	18,61
110	16	17,31	0,10	17,10	17,52
110	18	15,32	0,10	15,10	15,53
110	20	12,37	0,10	12,16	12,58
120	14	11,54	0,10	11,33	11,75
120	16	10,77	0,10	10,55	10,98
120	18	10,20	0,10	9,98	10,41
120	20	9,70	0,10	9,48	9,91
130	14	8,99	0,10	8,77	9,20
130	16	8,44	0,10	8,23	8,65
130	18	8,07	0,10	7,86	8,28
130	20	7,83	0,10	7,62	8,04
140	14	7,81	0,10	7,59	8,02
140	16	7,62	0,10	7,41	7,83
140	18	7,46	0,10	7,24	7,67
140	20	7,29	0,10	7,07	7,50
150	14	7,18	0,10	6,97	7,39
150	16	7,11	0,10	6,90	7,32
150	18	6,90	0,10	6,68	7,11
150	20	6,80	0,10	6,59	7,01



*Рис. 3. Поверхность отклика, отражающая влияние температуры и влажности
на количество клетчатки*

The response surface, reflecting the effect of temperature and humidity on the amount of fiber

Указанная поверхность отклика достаточно хорошо аппроксимируется полиномом второй степени вида:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{22} X_2^2 \quad (1)$$

где Y – количество клетчатки, X_1 – температура, °С; X_2 – влажность, %; $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{12}$ и b_{22} – коэффициенты.

После подбора коэффициентов методом наименьших квадратов (табл. 5) коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,968$.

Таблица 5

Результаты регрессионного анализа влияния температуры и влажности на количество клетчатки с использованием модели (1); статистически значимые коэффициенты
The results of regression analysis of the effect of temperature and humidity on the amount of fiber using model (1); statistically significant coefficients

Коэффициент	Значение коэффициента	Статистическая значимость, p	95 %-е доверительные границы	
			нижняя	верхняя
b_0	219,1093	$< 0,001$	178,0213	260,1973
b_1	-2,594	$< 0,001$	-3,1463	-2,0417
b_2	-3,0506	$< 0,001$	-4,4385	-1,6628
b_{11}	0,0078	$< 0,001$	0,0058	0,0098
b_{12}	0,0209	$< 0,001$	0,0103	0,0315

В связи с тем, что с практической точки зрения интерес представляет область с минимальными значениями содержания клетчатки, нами был проведен регрессионный анализ отдельно для 10 вариантов с содержанием клетчатки в диапазоне от 6,80 до 8,07.

В данной области поверхность отклика имеет вид плоскости (рис. 4), и адекватно (коэффициент детерминации $R^2 = 0,993$, статистическая

значимость регрессии $p < 0,001$) описывается уравнением множественной линейной регрессии следующего вида:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 \quad (2)$$

где Y – количество клетчатки; X_1 – температура, °С; X_2 – влажность, %; b_0 и b_2 – коэффициенты.

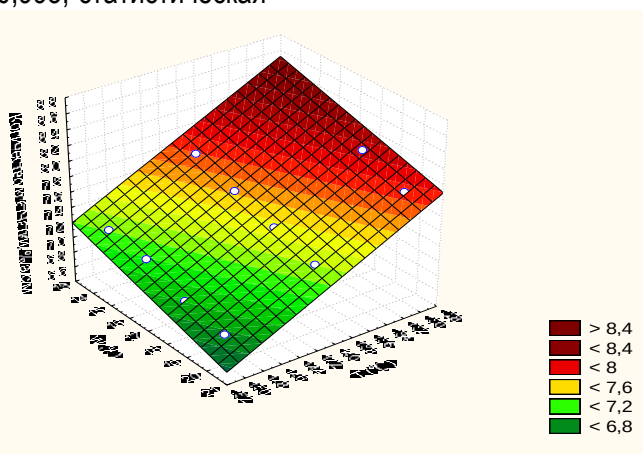


Рис. 4. Поверхность отклика, отражающая влияние температуры и влажности на количество клетчатки в диапазоне от 6,80 до 8,07 % а.с.м. (точками показаны экспериментальные значения)
The response surface reflecting the effect of temperature and humidity on the amount of fiber in the range from 6.80 to 8.07 % a.s.m. (the dots show the experimental values)

Результаты регрессионного анализа влияния температуры и влажности на количество клетчатки в диапазоне от 6,80 до 8,07 % а.с.м. с исполь-

зованием модели (2) приведены в таблице 6, отклонения экспериментальных значений от расчетных – в таблице 7.

Таблица 6

Результаты регрессионного анализа влияния температуры и влажности на количество клетчатки в диапазоне от 6,80 до 8,07 % а.с.м. с использованием модели (2)
The results of a regression analysis of the effect of temperature and humidity on the amount of fiber in the range from 6.80 to 8.07 % a.s.m. using the model (2)

Независимая переменная	Коэффициенты		Статистическая значимость, p
	бета	b	
Свободный член (b_0)		16,636	< 0,001
T, °C	-1,033	-0,055	< 0,001
W, %	-0,430	-0,078	< 0,001

Таблица 7

Отклонения экспериментальных значений (наблюдаемые значения) количества клетчатки в диапазоне от 6,80 до 8,07 % а.с.м. от значений, рассчитанных по уравнению регрессии
Deviations of the experimental values (observed values) of the amount of fiber in the range from 6.80 to 8.07 % a.s.m. from the values calculated by the regression equation

T, °C	W, %	Количество клетчатки, % а.с.м.		Отклонение наблюдаемого значения от теоретического
		Наблюдаемое значение	Теоретическое значение	
130	18	8,07	8,022565	0,047435
130	20	7,83	7,865597	-0,0356
140	14	7,805	7,782621	0,022379
140	16	7,62	7,625653	-0,00565
140	18	7,455	7,468686	-0,01369
140	20	7,285	7,311718	-0,02672
150	14	7,18	7,228742	-0,04874
150	16	7,11	7,071774	0,038226
150	18	6,895	6,914806	-0,01981
150	20	6,8	6,757839	0,042161

Влажность и температура сырья в процессе экструзии влияет на множество химических реакций, включая взаимодействие с другими компонентами, такими как углеводы и белки.

Дисперсионный анализ показал, что на количество нерасщепляемого белка статистически значимо ($p < 0,001$) влияет как температура экструзии, так и влажность жмыха. Кроме того, выявился статистически значимый ($p < 0,001$) эффект взаимодействия факторов «Температура экструзии» и «Влажность жмыха». Основное влияние на количество нерасщепляемого белка оказала температура экструзии (показатель силы влияния, рассчитанный как выраженное в % отношение факториальной суммы квадратов к общей сумме квадратов, равен 87,64 %), в то время как для влажности жмыха и эффекта взаимодействия этот показатель составил соответственно 3,81 и 8,50 %. Случайное варьирование, в данном случае отражающее ошибку

воспроизводимости, было незначительным (показатель силы влияния 0,05 %) (табл. 8).

Эффект температуры проявился в S-образном росте количества нерасщепляемого белка по мере роста температуры экструзии от 110 до 140 °C с последующим снижением его количества при дальнейшем росте температуры до 150 °C (рис. 5).

Эффект влажности проявился в нелинейном росте количества нерасщепляемого белка по мере роста влажности (рис. 6).

Эффект взаимодействия проявился в изменении формы кривых зависимости количества белка от температуры при разных уровнях влажности (рис. 7, табл. 9).

Поверхность отклика, отражающая влияние температуры и влажности на количество нерасщепляемого белка, представлена на рисунке 8.

Результаты дисперсионного анализа влияния факторов «Температура экструзии T , °C» и «Влажность жмыха W , %» на количество нерасщепляемого белка
The results of the dispersion analysis of the influence of the factors «Extrusion temperature T , °C» and «Moisture content of the cake W , %» for the amount of non-cleavable protein

Источник варьирования	Показатель силы влияния, %	Статистическая значимость, p
T , °C	87,64	< 0,001
W , %	3,81	< 0,001
T , °C · W , %	8,50	< 0,001
Случайное варьирование	0,05	

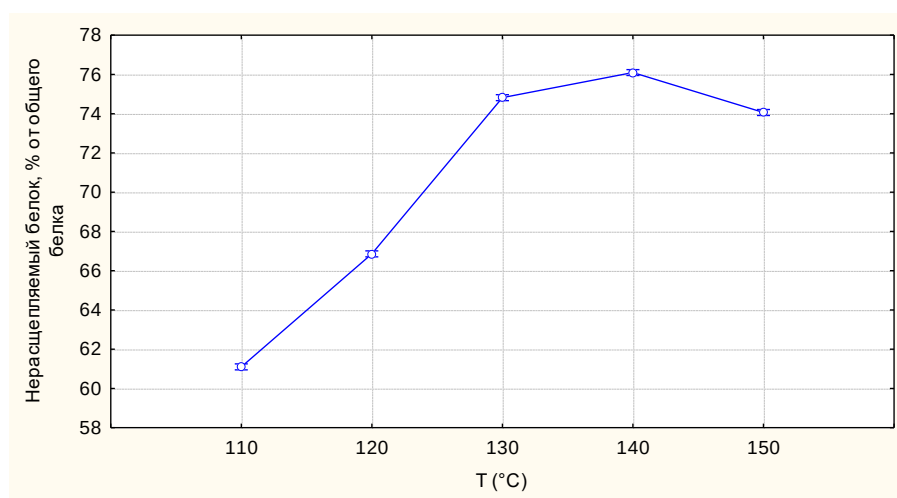


Рис. 5. Влияние температуры на среднее по вариантам и повторностям количество нерасщепляемого белка
The effect of temperature on the average amount of non-cleavable protein by variants and repetitions

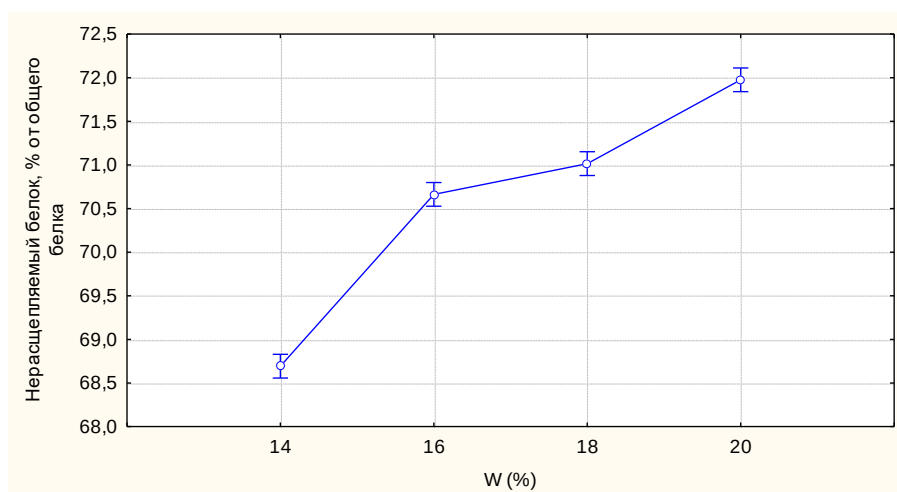


Рис. 6. Влияние влажности на среднее по вариантам и повторностям количество нерасщепляемого белка
Effect of moisture on the average amount of non-cleavable protein by variants and repetitions

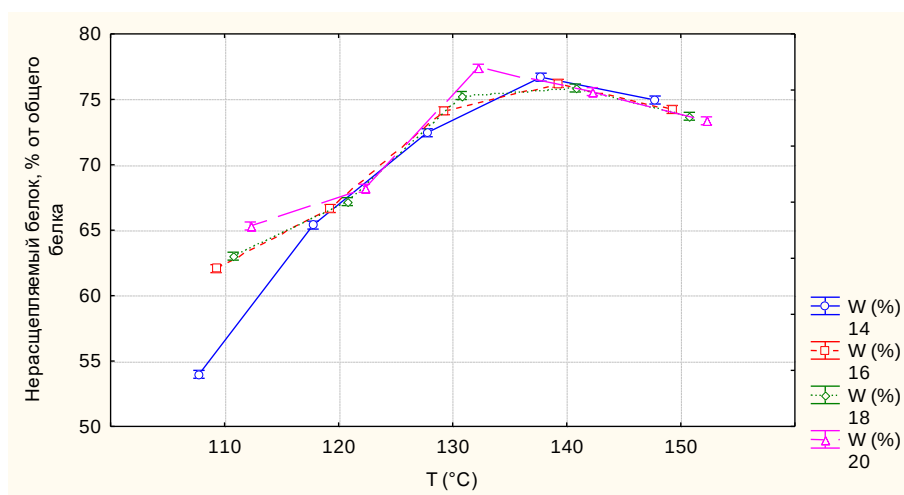


Рис. 7. Влияние температуры на среднее по повторностям количество нерасщепляемого белка при разных уровнях влажности
Effect of temperature on the average amount of non-cleavable protein at different humidity levels

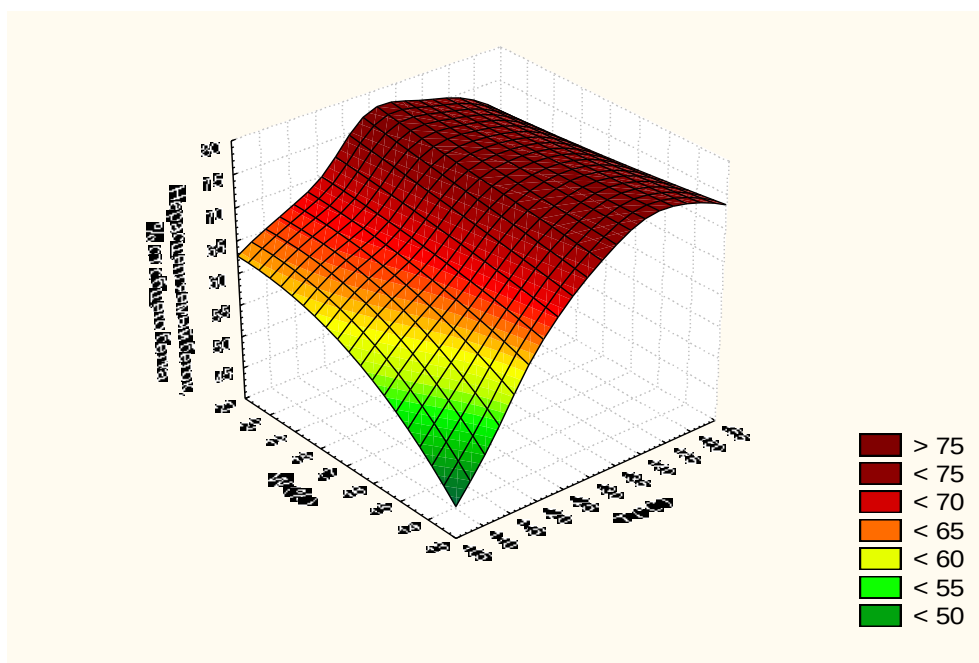


Рис. 8. Поверхность отклика, отражающая влияние температуры и влажности на количество нерасщепляемого белка
The response surface reflecting the effect of temperature and humidity on the amount of non-cleavable protein

Указанная поверхность отклика достаточно хорошо аппроксимируется полиномом второй степени следующего вида:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{22}X_2^2 \quad (3)$$

где Y – количество нерасщепляемого белка, % от общего белка; X_1 – температура, °C; X_2 – влажность, %; $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{12}$ и b_{22} – коэффициенты.

После подбора коэффициентов методом наименьших квадратов (табл. 9) коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,942$.

Результаты регрессионного анализа влияния температуры и влажности на количество белка с использованием модели (1) (показаны только статистически значимые коэффициенты)
 The results of a regression analysis of the effect of temperature and humidity on the amount of protein using model (1) (only statistically significant coefficients are shown)

Коэффициент	Значение коэффициента	Статистическая значимость, р	95 %-е доверительные границы	
			нижняя	верхняя
b0	–352,327	< 0,001	–451,697	–252,956
b1	5,278	< 0,001	3,943	6,614
b2	6,565	< 0,001	3,208	9,921
b11	–0,016	< 0,001	–0,021	–0,011
b12	–0,047	< 0,01	–0,072	–0,021

В связи с тем, что с практической точки зрения интерес представляет область с максимальными значениями содержания белка, нами был проведен регрессионный анализ отдельно

для 7 вариантов с содержанием белка в диапазоне от 74,95 до 77,385. Внешний вид поверхности отклика в области с указанным содержанием белка показан на рисунке 9.

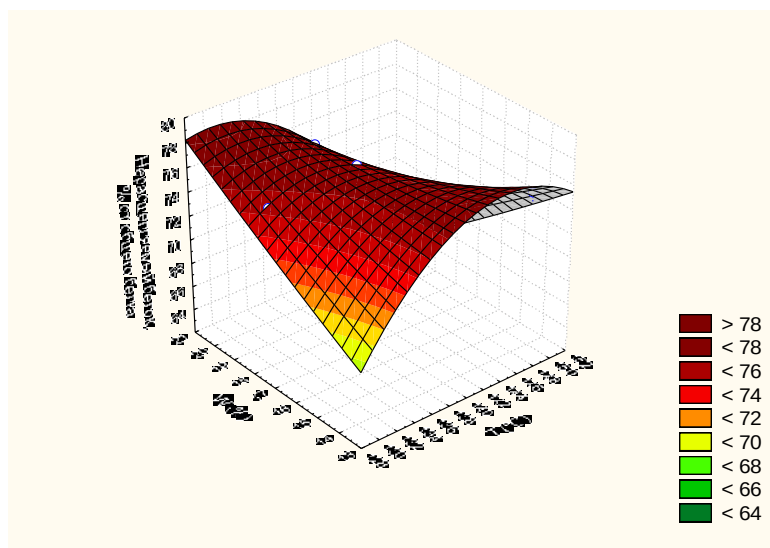


Рис. 9. Поверхность отклика, отражающая влияние температуры и влажности на количество нерасщепляемого белка в области с количеством белка от 74,95 и выше (точками показаны экспериментальные значения)

The response surface reflecting the effect of temperature and humidity on the amount of non-cleavable protein in the region with a protein content of 74.95 and above (the dots show the experimental values)

В указанной области поверхность отклика также аппроксимируется полиномом второй степени (1), однако после подбора коэффициентов методом наименьших квадратов (табл. 11) коэффициент детерминации достигает значения

$R^2 = 0,99998553$, что говорит о практически полном совпадении значений, рассчитанных по уравнению регрессии и экспериментальных значений (табл. 12).

Таблица 10

Результаты регрессионного анализа влияния температуры и влажности на количество белка с использованием модели (1) в области с количеством белка от 74,95 и выше

(показаны только статистически значимые коэффициенты)

The results of a regression analysis of the effect of temperature and moisture on the amount of protein using model (1) in the region with a protein content of 74.95 and above (only statistically significant coefficients are shown)

Коэффициент	Значение коэффициента	Статистическая значимость, р	95 %-е доверительные границы	
			нижняя	верхняя
b ₀	–862,059	< 0,01	–927,682	–796,436
b ₁	11,668	< 0,01	10,896	12,441
b ₂	15,909	< 0,01	14,391	17,427
b ₁₁	–0,035	< 0,01	–0,037	–0,033
b ₁₂	–0,118	< 0,01	–0,127	–0,109
b ₂₂	0,012	0,05	0	0,025

Таблица 11

Отклонения экспериментальных значений (наблюдаемые значения) количества белка в диапазоне от 74,95 и выше от значений, рассчитанных по уравнению регрессии
Deviations of the experimental values (observed values) of the protein amount in the range of 74.95 and higher from the values calculated by the regression equation

Т, °С	W, %	Количество нерасщепляемого белка, % от общего белка		Отклонение наблюдаемого значения от теоретического
		Наблюдаемое значение	Теоретическое значение	
130	20	77,385	77,385	0
140	14	76,695	76,69325	0,00175
140	16	76,225	76,23025	–0,00525
140	18	75,87	75,86475	0,00525
140	20	75,595	75,59675	–0,00175
130	18	75,295	75,295	0
150	14	74,95	74,95	0

Дальнейшее сужение моделируемой области за счет включения в нее только 5 точек с максимальным содержанием белка приводит к превращению поверхности отклика в плоскость (рис. 10), которая адекватно (коэффициент детерминации R² = 0,995, статистическая значимость регрессии p < 0,01) описывается уравнением множественной линейной регрессии вида

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 \quad (4)$$

где Y – количество нерасщепляемого белка, % от общего белка; X₁ – температура, °С; X₂ – влажность, %; b₀ и b₂ – коэффициенты.

Результаты регрессионного анализа влияния температуры и влажности на количество нерасщепляемого белка в диапазоне от 75,595 и выше с использованием модели (2) приведены в таблице 13, отклонения экспериментальных значений от расчетных – в таблице 14.

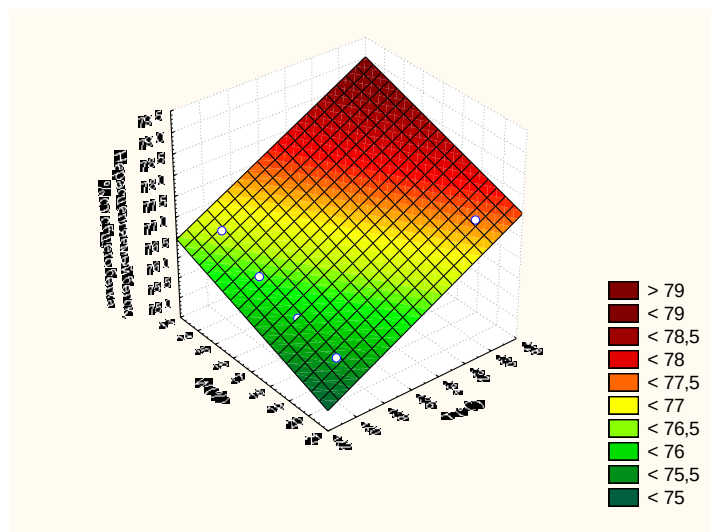


Рис. 10. Поверхность отклика, отражающая влияние температуры и влажности на количество нерасщепляемого белка в диапазоне от 75,595 и выше (точками показаны экспериментальные значения)

The response surface reflecting the effect of temperature and humidity on the amount of non-cleavable protein in the range from 75.595 and above (the dots show the experimental values)

Таблица 12

Результаты регрессионного анализа влияния температуры и влажности на количество нерасщепляемого белка в диапазоне от 75,595 и выше с использованием модели (2)
The results of regression analysis of the effect of temperature and humidity on the amount of non-cleavable protein in the range of 75.595 and higher using the model (2)

Независимая переменная	Коэффициент		Статистическая значимость, p
	бета	b	
Свободный член (b_0)		104,921	< 0,001
T, °C	-1,160	-0,184	< 0,01
W, %	-0,673	-0,183	< 0,01

Таблица 13

Отклонения экспериментальных значений (наблюдаемые значения) количества белка в диапазоне от 75,595 и выше от значений, рассчитанных по уравнению регрессии (теоретические значения)

Deviations of the experimental values (observed values) of the protein amount in the range of 75.595 and higher from the values calculated by the regression equation (theoretical values)

T, °C	W, %	Количество нерасщепляемого белка, % от общего белка		Отклонение наблюдаемого значения от теоретического
		Наблюдаемое значение	Теоретическое значение	
130	20	77,385	77,385	0
140	14	76,695	76,6445	0,050499
140	16	76,225	76,279	-0,054
140	18	75,87	75,9135	-0,0435
140	20	75,595	75,548	0,047005

Заключение. В результате проведенного исследования было установлено, что температура экструзии и влажность жмыха оказывают статистически значимое влияние на содержание клетчатки и количество перевариваемого белка в рапсовом жмыхе в процессе экструдирования. Наибольший эффект воздействия оказывала температура, повышение температуры приводило к значительному снижению количества клетчатки: от 18,44 % при температуре 110 °С до 6,85 % при температуре 150 °С, что свидетельствует о переходе части нерастворимой клетчатки в растворимую форму, повышая тем самым пищевую ценность кормовых добавок. Полученные результаты согласуются с литературными данными [14]. Также было выявлено, что повышение температуры до 130 °С увеличивает количество нерасщепляемого белка от 53,99 % до максимального значения 77,39 %, дальнейшее увеличение температуры приводит к снижению процента нерасщепляемого белка, что может быть связано с процессами денатурации. Так, в исследованиях зарубежных ученых при экструзионной обработке соевого белка было установлено, что при низком содержании влаги (< 36 %) денатурация белка происходит

при температуре выше 140 °С. По мере повышения температуры экструзии белок постепенно подвергался процессам плавления и денатурации, что приводило к изменению его количества и структуры [15].

В результате дисперсионного анализа были установлены показатели силы влияния и взаимодействия факторов. Показатели силы влияния на содержание клетчатки составили 89,65; 4,74 и 5,52 % для температуры экструзии, влажности жмыха и эффекта взаимодействия соответственно. Для количества нерасщепляемого белка показатели силы влияния температуры экструзии, влажности жмыха и эффекта взаимодействия составили 87,64; 3,81 и 8,50 %.

На основании полученных результатов были определены оптимальные параметры экструдирования частично обезжиренного рапсового жмыха при температуре экструзии 130 °С и влажности жмыха 20 %.

В целом экструдирование рапсового жмыха с предварительной кавитационной обработкой представляет собой эффективную технологию по получению кормовых добавок с защищенным белком.

Список источников

1. Агапов С.Ю., Рябова М.А., Зуфаров Р.Г., и др. Показатели морфологического и биохимического состава крови дойных коров при применении разных доз протеиновой добавки. В сб.: Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в современных экономических условиях». Волгоград, 2021. С. 433–438.
2. Colmenero J.J.O., Broderick G.A. Effect of dietary crude protein concentration on milk production and nitrogen utilization in lactating dairy cows // J. Dairy Sci. 2006. V. 89. P. 1704–1712. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(06)72238-X.
3. Barros T., Reed K.F., Olmos Colmenero J.J., et al. Milk urea nitrogen as a predictor of urinary nitrogen and urea nitrogen excretions of late-lactation dairy cows fed nitrogen limiting diets // J. Dairy Sci. 2019. V. 102. P. 1601–1607. DOI: 10.3168/jds.2018-14551.
4. Schwab C.G., Broderick G.A. A 100-year review: Protein and amino acid nutrition in dairy cows // J. Dairy Sci. 2017. V. 100. P. 10094–10112. DOI: 10.3168/jds.2017-13320.
5. Giallongo F., Harper M.T., Oh J., et al. Effects of rumen-protected methionine, lysine, and histidine on lactation performance of dairy cows // J. Dairy Sci. 2016. V. 99. P. 4437–4452. DOI: 10.3168/jds.2015-10822.
6. Paredes-Díaz D., Manríquez-Núñez O.M., Montañó-Gómez M.F., et al. Methods to improve the fraction of nondegradable protein in the rumen: A review // Agro Productividad. 2024. Vol. 17, N 9. P. 101–107. DOI: 10.22004/AG.ECON.352041.
7. Iommelli P., Zicarelli F., Musco N., et al. Effect of cereals and legumes processing on in situ rumen protein degradability: A review // Fermentation. 2022. V. 8 (8). P. 363. DOI: 10.3390/fermentation8080363.
8. Lillford P.J. Extrusión. En Food Materials Science: Principles and Practice // Nueva York. NY: Springer New York. 2008. P. 415–435. DOI: 10.1007/978-0-387-71947-4_1.

9. Жаксалыков Р.А., Заболотных М.В. Влияние экструдированных комбикормов на обмен веществ высокопродуктивных коров черно-пестрой породы // Вестник Марийского государственного университета. Сер. «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». 2024. Т. 10, № 4. С. 334–340.
10. Матюшев В.В. Использование белково-витаминного коагулята в производстве экструдированных комбикормов для цыплят-бройлеров // Вестник КрасГАУ. 2020. № 9 (162). С. 171–176. DOI: 10.36718/1819-4036-2020-9-171-176.
11. Варакин А.Т., Саломатин В.В., Симонов Г.А., и др. Биологический эффект комплексной кормовой добавки на статус крови и продуктивность дойных коров // Известия НВ АУК. 2023. № 3. С. 250–259.
12. Смольникова Я.В., Янова М.А., Бопп В.Л., и др. Изменение жирнокислотного состава рапсового и рыжикового жмыхов в процессе экструдирования и оценка их биологической эффективности // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83, № 4. С. 197–203. DOI: 10.20914/2310-1202-2021-4-197-203
13. S-halini S.A., Pavankumar R.M., Mayur R., et al. Non-thermal, energy efficient hydrodynamic cavitation for food processing, process intensification and extraction of natural bioactives: A review // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023. V. 98. P. 106504. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106504.
14. Natalia P.V., Laura Roman V.J. Shiva Swaraj K.V. et al. Enhancing the nutritional value of cold-pressed oilseed cakes through extrusion cooking // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022. V. 77. P. 102956. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.102956.
15. Wang Q., Sivakumar K. & Mohanasundaram S. Impacts of extrusion processing on food nutritional components // *Int J Syst Assur Eng Manag*. 2022. V. 13 (Suppl 1). P. 364–374. DOI: 10.1007/s13198-021-01422-2.

References

1. Agapov SYu, Ryabova MA, Zufarov RG, et al. Pokazateli morfologicheskogo i biohimicheskogo sostava krovi dojnyh korov pri primenении raznyh doz proteinovoj dobavki. In: *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Innovacionnye tekhnologii v agropromyshlennom komplekse v sovremennyh ekonomicheskikh usloviyah»*. Volgograd; 2021. P. 433–438. (In Russ.).
2. Colmenero J.J.O., Broderick G.A. The effect of crude protein concentration in the diet on milk production and nitrogen use in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2006;89:1704-1712. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302 (06)72238-X.
3. Barros T, Reed KF, Olmos Colmenero JJ, et al. Urea nitrogen in milk as a predictor of urine nitrogen content and urea nitrogen excretion in dairy cows at the end of lactation receiving nitrogen-limiting diets. *J. Dairy Sci.* 2019;102:1601-1607. DOI: 10.3168/jds.2018-14551.
4. Shvab K. G., Broderick G. A. Review for 100 years: protein and amino acid nutrition of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2017;100:10094-10112. DOI: 10.3168/jds.2017-13320.
5. Giallongo F, Harper MT, Lopez JO, et al. The effect of methionine, lysine and histidine, which protect the scar, on lactation parameters of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2016;99:4437-4452. DOI: 10.3168/jds.2015-10822 .
6. Paredes-Diaz D, Manriquez-Nunes OM, Montagno-Gomez MF, et al. Methods for increasing the proportion of non-degradable protein in the rumen: an overview. *Agro Productividad*. 2024;17(9):101–107. DOI: 10.22004/AG.ECON.352041.
7. Iommelli P, Zicarelli F, Musko N, et al. The effect of grain and legume processing on the ability of rumen proteins to decompose in situ: an overview. *Fermentation*. 2022;8(8):363. DOI: 10.3390/fermentation8080363.
8. Lilford PJ. *Extrusion. Food Materials Science: Principles and practice*. New York, NY: Springer New York; 2008. P. 415–435. DOI: 10.1007/978-0-387-71947-4_1.
9. Zhaksalykov RA, Zabolotnykh MV. The effect of extruded compound feeds on the metabolism of highly productive black-and-white cows. *Bulletin of the Mari State University. The series «Agricultural sciences. Economic Sciences»*. 2024;10(4):334-340.

10. Matyushev V.V. The use of protein-vitamin coagulate in the production of extruded compound feeds for broiler chickens. *Bulletin of KSAU*. 2020;(9):171-176. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2020-9-171-176.
11. Varakin AT, Salomatina VV, Simonov GA, et al. The biological effect of a complex feed additive on the blood status and productivity of dairy cows. *Izvestiya NV AUK*. 2023;(3):250-259. (In Russ.).
12. Smolnikova YaV, Yanova MA, In Bopp L, et al. Changes in the fatty acid composition of rapeseed and ginger cakes during extrusion and assessment of their biological effectiveness. *Bulletin of VGUIT*. 2021;83(4):197-203. (In Russ.). DOI: 10.20914/2310-1202-2021-4-197-203.
13. S-Khalini SA, Pavankumar RM, Mayur R, et al. Non-thermal, energy-efficient hydrodynamic cavitation for the food industry, intensification of processes and extraction of natural bioactive substances: an overview. *Ultrasonic Sonochemistry*. 2023;98:106504. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106504.
14. Natalia PV, Laura Roman VJ, Shiva Swaraj KV, et al. Increasing the nutritional value of cold-pressed oilseed cakes due to extrusion cooking. *Innovative Food Science and New Technologies*. 2022;77:102956. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.102956.
15. Wang K, Sivakumar K, Mohanasundaram S. The effect of extrusion processing on food components. *Int. J System Assur Eng Manag*. 2022;13(sup. 1):364-374. DOI: 10.1007/s13198-021-01422-2.

Статья принята к публикации 20.04.2026 / The article accepted for publication 20.04.2026.

Информация об авторах:

Яна Викторовна Смольникова, доцент кафедры технологии консервирования и пищевой биотехнологии, кандидат технических наук

Сергей Витальевич Хижняк, профессор кафедры экологии и природопользования, доктор биологических наук, доцент

Марина Анатольевна Янова, заведующая, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского и макаронного производств, доктор технических наук, доцент

Оксана Валериевна Стутко, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории проблем переработки масличных культур

Андрей Витальевич Макаров, доцент кафедры эпизоотологии, микробиологии, паразитологии и ветеринарно-санитарной экспертизы, кандидат биологических наук

Вера Александровна Ханипова, доцент кафедры эпизоотологии, микробиологии, паразитологии и ветеринарно-санитарной экспертизы, кандидат биологических наук

Радосвет Дмитриевич Землянский, ассистент кафедры эпизоотологии, микробиологии, паразитологии и ветеринарно-санитарной экспертизы

Анастасия Сергеевна Тимофеева, ассистент кафедры эпизоотологии, микробиологии, паразитологии и ветеринарно-санитарной экспертизы

Доминик Василь Брошко, сотрудник научно-исследовательской лаборатории проблем переработки масличных культур

Information about the authors:

Yana Viktorovna Smolnikova, Associate Professor, Department of Canning Technology and Food Biotechnology, Candidate of Technical Sciences

Sergey Vitalievich Khizhnyak, Professor of the Department of Ecology and Nature Management, Doctor of Biological Sciences, Docent

Marina Anatolyevna Yanova, Head and Professor, Department of Bakery, Confectionery, and Pasta Production Technology, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Oksana Valerievna Stutko, Researcher, Research Laboratory for Oilseed Processing Problems

Andrey Vitalievich Makarov, Associate Professor, Department of Epizootology, Microbiology, Parasitology, and Veterinary-Sanitary Expertise, Candidate of Biological Sciences

Vera Aleksandrovna Khanipova, Associate Professor, Department of Epizootology, Microbiology, Parasitology, and Veterinary-Sanitary Expertise, Candidate of Biological Sciences

Radosvet Dmitrievich Zemlyansky, Assistant Professor, Department of Epizootology, Microbiology, Parasitology, and Veterinary-Sanitary Expertise

Anastasia Sergeevna Timofeeva, Assistant Professor, Department of Epizootology, Microbiology, Parasitology, and Veterinary-Sanitary Expertise

Dominik Vasil Broshko, Researcher, Oilseed Crop Processing Problems Laboratory

