

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФЕРМЕНТАТИВНЫЙ ГИДРОЛИЗ РАПСОВОГО И СОЕОВОГО ЖМЫХОВ

Путилов В.Э.^{1,2}, Непомнящий А.П.¹, Иванова Е.Ю.^{1,2}, Причепина А.О.¹,
Шарова Н.Ю.^{1,2}, д-р техн. наук

¹Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, Российская Федерация, Санкт-Петербург

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Российская Федерация, Санкт-Петербург

Аннотация. В работе исследовано влияние различных методов предварительной обработки на эффективность ферментативного гидролиза рапсового и соевого жмыхов. Установлено, что рапсовый жмых характеризуется ограниченным накоплением углеводов и снижением их концентрации при термощелочной обработке, тогда как белковая фракция демонстрирует высокую чувствительность к условиям подготовки. Динамика гидролиза соевого жмыха более монотонна, что связано с большей ферментативной доступностью его структурных компонентов.

Ключевые слова: рапсовый жмых; соевый жмых; ферментативный гидролиз; предварительная обработка; свободный α-аминный азот.

INFLUENCE OF PRETREATMENT ON ENZYMATIC HYDROLYSIS OF RAPESEED AND SOYBEAN MEALS

Putilov V.E.^{1,2}, Nepomnyashiy A.P.¹, Ivanova E.Y.^{1,2}, Prichepa A.O.¹,
Sharova N.Y.^{1,2}, Grand PhD in Engineering

¹All-Russian Research Institute of Food Additives - a branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Center for Food Systems named after. V.M. Gorbatov» Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Saint Petersburg

²ITMO University, Russian Federation, Saint Petersburg

Abstract. The study examined the effect of different pretreatment methods on the efficiency of enzymatic hydrolysis of rapeseed and soybean meals. Rapeseed meal was characterized by limited accumulation of carbohydrates and a decrease in their concentration under thermo-alkaline treatment, while its protein fraction showed high sensitivity to the pretreatment conditions. In contrast, the hydrolysis dynamics of soybean meal were more gradual and consistent, which can be attributed to the greater enzymatic accessibility of its structural components.

Keywords: rapeseed meal; soybean meal; enzymatic hydrolysis; pretreatment; free α-amino nitrogen.

Введение. Рапсовый жмых (РЖ) и соевый жмых (СЖ) представляют собой важные побочные продукты масложировой промышленности,

отличающиеся высокой концентрацией белков, углеводных компонентов и энергии. РЖ широко используют в качестве органического удобрения и кормового компонента для скота благодаря высокому содержанию белка [1]. Вместе с тем РЖ содержит значительную долю трудноусваиваемых углеводов – до 20–40% (пектинов, ксиланов и др.) [2]. СЖ, являющийся ведущим мировым белковым кормовым ингредиентом, также характеризуется высоким содержанием белка. При этом СЖ содержит 15–20% трудноусваиваемых углеводов и олигосахаридов [3]. Эти компоненты выступают антипитательными факторами и ограничивают полное использование питательной ценности жмыхов традиционным способом [2, 3]

Для более полного извлечения питательных веществ из РЖ и СЖ все активнее используются биотехнологические методы. Ферментативный гидролиз растительной клетчатки и белка позволяет под действием специфических ферментов освобождать углеводные компоненты и расщеплять белки до пептидов и аминокислот [4, 5]. Полученные при этом гидролизаты богаты редуцирующими сахарами и свободными аминокислотами. Ферментативная обработка протекает в относительно мягких условиях и отличается высокой селективностью, что делает этот метод экологически более безопасным по сравнению с химическим гидролизом [6].

Перед ферментативным гидролизом растительное сырьё часто подвергают предварительной обработке для повышения эффективности разложения. Целью таких обработок является разрушение лигноцеллюлозной матрицы клеточных стенок с целью увеличения доступа ферментов к целлюлозе и гемицеллюлозе [7]. Например, обработка высокой температурой вызывает разбухание волокон и частичный гидролиз полисахаридов, а обработка щелочью разрушает эфирные связи в лигнине, способствуя отделению целлюлозы от гемицеллюлозы и лигнина [7, 8]. В результате предварительной обработки получается более легкоусвояемая масса, что позволяет повысить выход ферментируемых сахаров.

Цель исследования – оценить влияние термической и щелочной предварительной обработки на гидролиз РЖ и СЖ. Переработка побочных продуктов масложировой промышленности в ценные компоненты вписывается в концепцию циркулярной экономики и устойчивого производства пищевых систем.

Материалы и методы. В качестве сырья использовали рапсовый и соевый жмыхи, полученные после промышленного отжима масла. Для оценки влияния различных способов подготовки сырья к ферментативному гидролизу изучали четыре варианта: РЖ/СЖ без предварительной обработки (1); РЖ/СЖ, суспендированный в воде, подвергался автоклавированию при 121 °С в течение 30 мин (2); РЖ/СЖ, суспендированный в 1% растворе NaOH (3); РЖ/СЖ, суспендированный в 1% растворе NaOH, подвергался автоклавированию при 121 °С в течение 30 мин (4).

Углеводный гидролиз проводили с использованием целлюлазы и ксиланазы по 50 ЕД на 1 г сухого РЖ/СЖ при pH 5,0. Протеолитический гидролиз осуществляли с использованием бактериальной протеазы в

количестве 50 ЕД на 1 г сухого РЖ/СЖ при рН 10,0. Гидролиз продолжался в течение 24 часов.

Содержание растворимых углеводов в супернатантах гидролизатов определяли методом капиллярного электрофореза с использованием системы КАПЕЛЬ-105М [9]. Перед анализом образцы центрифугировали при 10 000 g в течение 10 мин и фильтровали через мембраны с размером пор 0,22 мкм. Определение свободного α -аминного азота (FAN) проводили методом с использованием нингидрина [10], детекция проводилась спектрофотометрическим методом при длине волны 570 нм.

Результаты и обсуждения. Динамика накопления растворимых углеводов при ферментативном гидролизе РЖ представлена на рисунке 1. В контрольной серии содержание сахаров оставалось практически неизменным ($6,3 \pm 0,3 - 6,4 \pm 0,3$ г/л), что указывает на ограниченный доступ ферментов к полисахаридам без предварительной обработки. При щелочной обработке наблюдалось умеренное увеличение концентрации сахаров (до $8,6 \pm 0,4$ г/л к 24 ч), что, вероятно, связано с частичным разрушением лигноцеллюлозной матрицы под действием гидроксида натрия. Автоклавирование при 121°C обеспечивало соизмеримое высвобождение сахаров, достигая $8,80 \pm 0,4$ г/л к 12–18 ч. Динамика в серии, где использовались щелочная и температурная предобработка, отличается: после достижения пика ($8,6 \pm 0,4$ г/л к 12 ч) наблюдалось резкое падение концентрации до $4,5 \pm 0,2$ г/л к 24 ч. Подобное снижение может быть связано с интенсивным образованием ингибирующих побочных продуктов (фурфурола, гидроксиметилфурфурола).

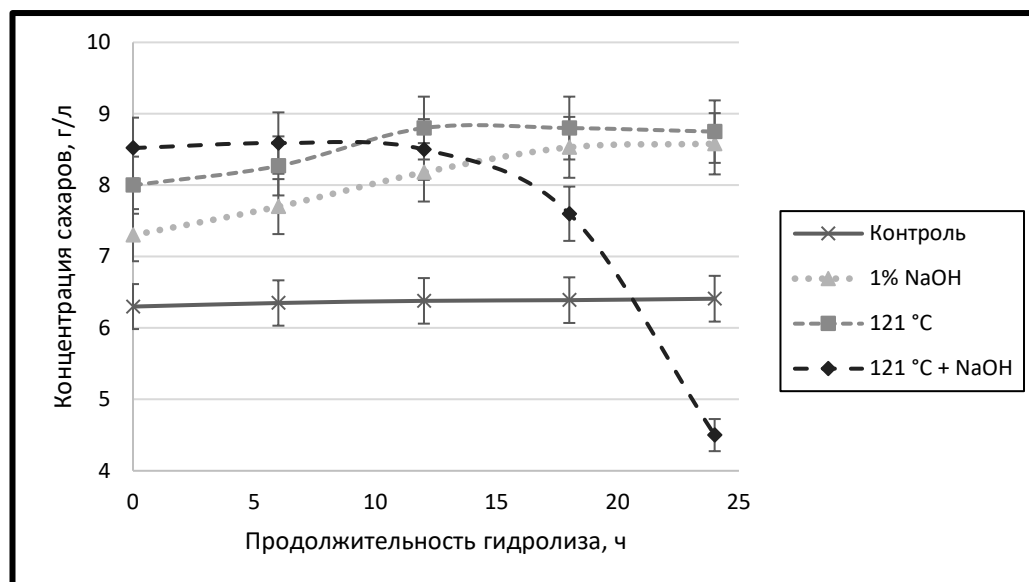


Рисунок 1. Содержание сахаров при ферментативном гидролизе РЖ

Результаты углеводного гидролиза СЖ (рисунок 2) демонстрируют иную динамику. Уже на 6 ч содержание сахаров резко возросло (до $5,0 \pm 0,2 - 5,1 \pm 0,2$ г/л в контроле и при обработке NaOH), что указывает на более доступную структуру субстрата по сравнению с РЖ. Наиболее выраженный рост наблюдался при автоклавировании в присутствии щёлочи:

концентрация сахаров достигала $8,5 \pm 0,4$ г/л к 24 ч. Вариант с автоклавированием без щёлочи также показал высокую эффективность ($7,2 \pm 0,4$ г/л к 24 ч), в то время как контроль и серия с обработкой щелочью без нагрева обеспечили умеренные показатели ($6,0 \pm 0,3$ и $6,6 \pm 0,3$ г/л соответственно). Эти результаты свидетельствуют о том, что для СЖ комбинированная обработка более эффективна для повышения доступности углеводов.

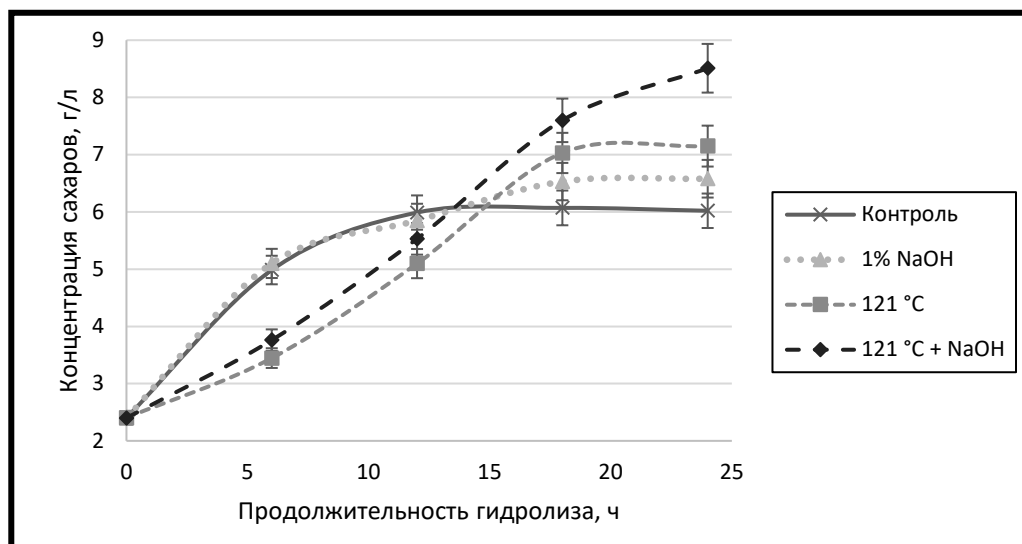


Рисунок 2. Содержание сахаров при ферментативном гидролизе СЖ

Динамика накопления FAN при гидролизе РЖ представлена на рисунке 3. Во всех сериях, кроме комбинированной предварительной обработки, концентрация FAN монотонно возрастала. В серии термической и щелочной обработки концентрация FAN была высокой на старте ($248,7 \pm 12,4$ мг/л) и снижалась на протяжении процесса до $151,5 \pm 7,6$ мг/л к 24 ч. Такая динамика, вероятно, связана с тем, что в процессе термощелочной подготовки сразу гидролизуется значительная часть белка, но далее свободные аминокислоты частично вступают в химические реакции (в том числе с редуцирующими сахарами) или сорбируются/коагулируют, что уменьшает количество детектируемого FAN.

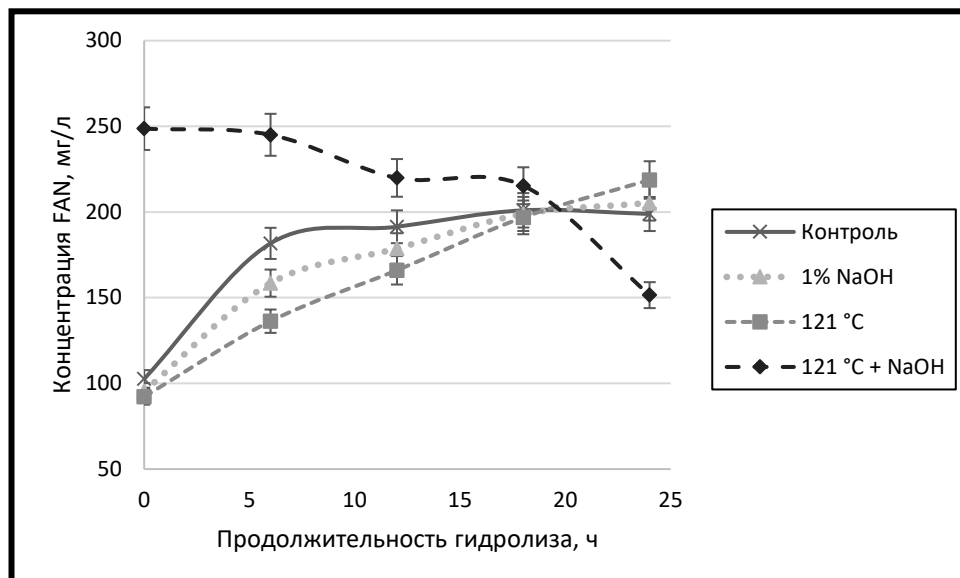


Рисунок 3. Содержание FAN при ферментативном гидролизе РЖ

Для соевого жмыха наблюдалась подобная зависимость (рисунок 4). В результате термической обработки получено наибольшее количество FAN к 24 ч ($178,7 \pm 8,9$ мг/л), тогда как при термощелочной обработке выявлены высокие уровни показателя в начале гидролиза ($228,7 \pm 11,4$ мг/л) и их последующее снижение до $151,5 \pm 7,6$ мг/л.

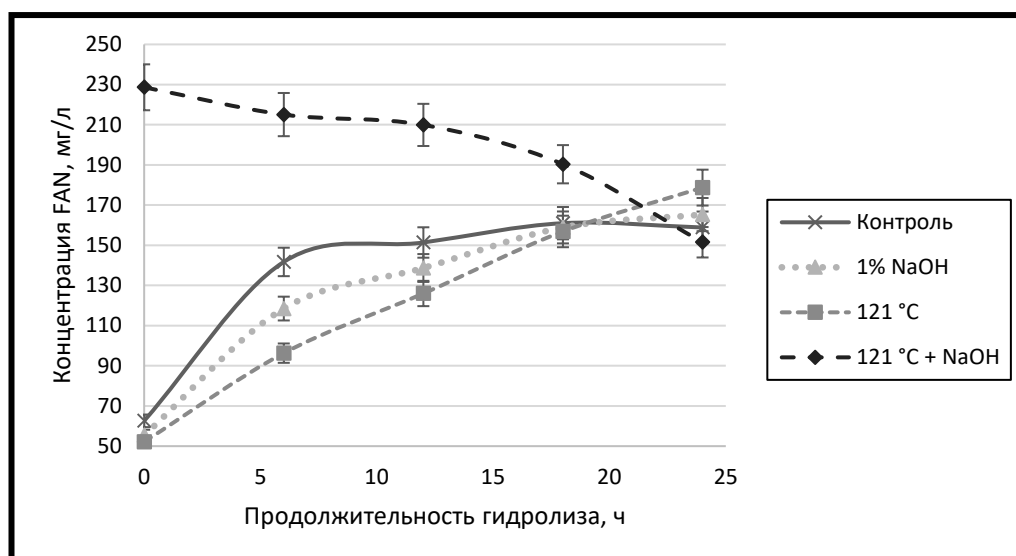


Рисунок 4. Содержание FAN при ферментативном гидролизе СЖ

Заключение. Полученные результаты продемонстрировали различия в закономерностях изменения состава РЖ и СЖ при ферментативном гидролизе после различных вариантов предварительной обработки. Для РЖ характерна ограниченная динамика накопления углеводов: концентрация сахаров после автоклавирования возрастала лишь до 12–18 ч процесса, а в условиях термощелочной обработки наблюдался резкий спад на поздних стадиях. Это указывает на высокую химическую реакционную способность высвобождае-

мых сахаров в системе РЖ и их склонность к вторичным превращениям, что снижает устойчивость углеводной фракции при последующих воздействиях. Вместе с тем, белковая часть РЖ оказалась чувствительной к условиям подготовки: при термощелочной обработке наблюдалось высвобождение большого количества растворимых азотсодержащих соединений, но последующее снижение концентрации FAN. СЖ, напротив, проявил монотонное высвобождение как углеводов, так и FAN. Белковая фракция СЖ также продемонстрировала более стабильный профиль, чем в РЖ, хотя при термощелочной подготовке количество FAN снижалось в процессе гидролиза.

Литература

1. Dygas D. et al. Rapeseed meal waste biomass as a single-cell protein substrate for nutritionally-enhanced feed components //Processes. 2023. Т. 11. №. 5. P. 1556.
2. Long C., Venema K. Pretreatment of rapeseed meal increases its recalcitrant fiber fermentation and alters the microbial community in an in vitro model of swine large intestine //Frontiers in microbiology. 2020. Т. 11. P. 588264.
3. Opazo R. et al. Reduction of soybean meal non-starch polysaccharides and α -galactosides by solid-state fermentation using cellulolytic bacteria obtained from different environments. 2012.
4. Weng Z. et al. Assessment the flavor of soybean meal hydrolyzed with Alcalase enzyme under different hydrolysis conditions by E-nose, E-tongue and HS-SPME-GC-MS //Food Chemistry: X. 2021. Т. 12. P. 100141.
5. Du Z. et al. Obtaining higher yield and quality rapeseed protein: complex enzymatic hydrolysis assisted alkaline water extraction of cold pressed-extracted rapeseed meal //Food Chemistry: X. 2025. P. 102837.
6. Silva S. O. et al. Biotechnology in Agro-Industry: Valorization of Agricultural Wastes, By-Products and Sustainable Practices //Microorganisms. 2025. Т. 13. №. 8. P. 1789.
7. Brodeur G. et al. Chemical and physicochemical pretreatment of lignocellulosic biomass: a review //Enzyme research. 2011. Т. 2011. №. 1. P. 787532.
8. Mathew A. K. et al. Alkaline pre-treatment of oilseed rape straw for bioethanol production: Evaluation of glucose yield and pre-treatment energy consumption //Bioresource technology. 2011. Т. 102. №. 11. P. 6547-6553.
9. Якуба Ю.Ф., Марковский М.Г. Определение глюкозы, сахарозы и фруктозы методом капиллярного электрофореза //Вопросы питания. 2015. Т. 84. №. 1. С. 89-94.
10. Lie S. The EBC-ninhydrin method for determination of free alpha amino nitrogen //Journal of the Institute of Brewing. 1973. Т. 79. №. 1. P. 37-41.