DOI: https://doi.org/10/21323/2618-9771-2021-4-3S-152-159
Поступила 05.07.2021
Поступила после рецензирования 10.08.2021
Принята в печать 20.08.2021

creative commons

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКИХ МОДИФИКАЦИЙ НА СТЕПЕНЬ РЕЗИСТЕНТНОСТИ ГОРОХОВОГО КРАХМАЛА

Кузина Л.Б.[1, 2]*, Родионова А.В.[1]

[1]Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопродуктов – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, Московская обл., Россия
[2]Центр исследования проблем безопасности РАН, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
нативный крахмал, модификация крахмала, степень резистентности, амилолитические ферменты, глюкоза, пищевые добавки

АННОТАЦИЯ
В ходе исследования был проведен поиск и анализ результатов актуальных научно-исследовательских работ. Было установлено, что с помощью химической модификации можно увеличить степень резистентности (СР) от 1,5 до 20 раз, в случае ацетилированного и гидроксипропилированного дикрахмалфосфатов СР уменьшается до 2-х раз в сравнении с нативным; результаты мировых исследований отличаются из-за использования разных методик определения СР – ферментов (комплекс – панкреатин или только амилолитические), их активности, реактивов, времени гидролиза и оборудования (аналитические весы, высокоэффективный жидкостный хроматограф (ВЭЖХ), спектрофотометр). С учетом изученной научной литературы и перечня разрешенных к использованию пищевых добавок Е, были выбраны наиболее осуществимые в условиях института модификации: ацетилирование, окисление, фосфатирование, адипинирование и карбоксиметилирование. На основании перспективности, было подобрано исходное сырье – гороховый крахмал, с массовой долей амилозы 36,4%, динамической вязкостью 124,4 мПа*с и СР равной 19,1%. Были изготовлены опытные образцы ацетатного, окисленного, фосфатных, адипатных и карбоксиметилированного (КМК) крахмалов, изучены их физико-химические и реологические свойства: СР, НСР = 1,9% (при уровне значимости 0,05), динамическая вязкость, pH, растворимость в воде, степень замещения (СЗ) в КМК. Значимое повышение СР наблюдалось у адипатного (2%) – 22,4% и КМК – 74%. СЗ не превышает установленный нормативными документами порог, равна 0,014 моль/моль. В окисленном, фосфатном (с полифаном) и адипатных крахмалах преобладает медленно перевариваемая фракция, больше 40%, но в качестве ингредиентов, например, для людей больных гипогликемией, целесообразно использовать окисленный и фосфатные крахмалы, изготовленные без карбамида.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: исследования проведены в рамках темы научного исследования № 0585-2019-0031-С-01 по государственному заданию ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ: научным сотрудникам отдела технологии модифицированных крахмалов ВНИИК, Любовь Григорьевне Кузьминой и Марине Феликсовне Никитиной, заведующей отделом, канд. техн. наук, Евгении Кузьминичне Коптеловой; научному сотруднику ВНИИК, Валентине Андреевне Гулаковой; ведущему научному сотруднику ВНИИК, Тамаре Григорьевне Калининой; директору ЦИПБ РАН, д-ру юр. наук, Рустаму Фидайовичу Идрисову.

Received 05.07.2021
Accepted in revised 10.08.2021
Accepted for publication 20.08.2021

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article

STUDYING THE INFLUENCE OF CHEMICAL MODIFICATIONS ON PEA STARCH RESISTANCE DEGREE

Lidia B. Kuzina[1, 2] *, Anastasya V. Rodionova[1]

[1]All-Russian Scientific Research Institute for Starch Products – branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, Moscow Region, Russia
[2] Security problems studies center of RAS, Russia, Moscow

KEY WORDS:
native starch, starch modification, resistance degree, amylolytic enzymes, glucose, food additives

ABSTRACT
In course of study, a search and analysis of the relevant research works results was carried out. It was found that with the help of chemical modification it is possible to increase resistance degree (RS) from 1,5 to 20 times, in the case of acetylated and hydroxypropylated distarch phosphates, the RS decreases up to 2 times in comparison with the native one; the results of world studies differ from the use of different methods for determining CP - enzymes (complex - pancreatin or only amylolytic), their activity, reagents, hydrolysis time and equipment (analytical balance, high performance liquid chromatograph (HPLC), spectrophotometer). Taking into account, studied scientific literature and the list of food additives E permitted for use, the most feasible modifications in institute conditions were selected: acetylation, oxidation, phosphating, adipination and carboxymethylation. Based on the prospects, the starting material was selected - pea starch, with a amylose mass fraction – 36.4%, a dynamic viscosity – 124.4 mPa * s and RS – 19.1%. Were made samples of acetate, oxidized, phosphate, adipate and carboxymethylated (SMC) starches, studied their physicochemical and rheological properties: RD, SSD = 1.9% (significance level 0,05), dynamic viscosity, pH, water solubility, substitution degree (SD) in CMS A significant increase in HR was observed in adipate (2%) – 22.4% and CMS - 74%. SD does not exceed the threshold established by regulatory documents, equal to 0.014 mol / mol. In oxidized, phosphate (with polyphan) and adipate starches, a slowly digestible fraction predominates, more than 40%, but as ingredients, for example, for people with hypoglycemia, it is advisable to use oxidized and phosphate starches made without carbamide.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Кузина, Л.Б., Родионова, А.В.** (2021). Изучение влияния химических модификаций на степень резистентности горохового крахмала. *Пищевые системы*, 4(3S), 152-159. https://doi.org/10.21323/2618–9771-2021-4-3S-152-159

FOR CITATION: **Kuzina, L.B., Rodionova, A.V.** (2021). Studying the influence of chemical modifications on pea starch resistance degree. *Food systems*, 4(3S), 152-159. https://doi.org/10.21323/2618–9771-2021-4-3S -152-159

FUNDING: the article was published as part of the research topic No. 0585-2019-0031-C-01 of the state assignment of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS.

ACKNOWLEDGEMENTS: to researchers of ARSRISP modified starches technology department, Lyubov Grigorievna Kuzmina and Marina Feliksovna Nikitina, head of this department, Candidate of Technical Sciences, Evgeniya Kuzminichna Koptelova; ARSRISP researcher, Valentina Andreevna Gulakova; ARSRISP leading researcher, Tamara Grigorievna Kalinina; to the CSSP RAS director, Doctor of Legal Sciences, Rustam Fidayovich Idrisov.

1. Введение.

Актуальность вопросов правильного подбора ингредиентов для продуктов питания, в многочисленный раз, подтверждена 11 сентября 2018 года. Пять учреждений ООН - ФАО, МФСР, ВПП, ЮНИСЕФ и ВОЗ выступили с докладом «Состояние продовольственной безопасности и питания в мире», первостепенными проблемами человечества были обозначены борьба с голодом и ожирением, и как последствия – сахарным диабетом из-за продуктов низкого качества с «быстрыми углеводами» [1].

РК – одна из трех фракций крахмала, которая устойчива к гидролизу амилолитическими ферментами в тонком кишечнике млекопитающих, то есть не расщепляется до глюкозы, но ферментируется в толстом кишечнике до короткоцепочечных жирных кислот (КЦЖК). РК получил большое внимание как из-за его потенциальной пользы для здоровья (подобно растворимой клетчатке), так и функциональных свойств [2]. РК положительно влияет на функционирование пищеварительного тракта, микрофлору, уровень холестерина и глюкозы в крови, снижает гликемический индекс продукта и риск возникновения рака толстого кишечника [3-5]. Изучались и вопросы снижения веса при употреблении продукции с высоким содержанием РК [6]. Помимо потенциальной пользы для здоровья, еще одним преимуществом РК является меньшее влияние на органолептические и реологические свойства продуктов питания, по сравнению с традиционными источниками клетчатки, такими как цельное зерно или отруби [2,5].

Ученые выделяют несколько типов РК, в зависимости от особенностей структуры [6]: внутриклеточный [7], высокоамилозный нативный [8], ретроградированный (физически модифицированный) [9], химически модифицированный [10], амилоза-липидный [11] крахмалы.

Модифицированные крахмалы, по сравнению с нативными, несут большую практическую пользу с точки зрения их реологических и физико-химических свойств. Они обладают высокой вязкостью и/или стабильностью при действии высоких и/или низких температур, пленкообразующей способностью, сохраняют структуру при высокой кислотности и/или щелочности, не склонны к синерезису, некоторые хорошо растворимы даже в холодной воде (крахмалы холодного набухания – экструзионной и вальцовой сушки, карбоксиметилированные) [12,13].

Поэтому, для проведения исследования, было выбрано именно это направление. Необходимо найти ту модификацию, по результатам которой снизится перевариваемость крахмала, но при этом улучшаться его свойства.

Цель исследования – провести поисковую научно-исследовательскую работу по установлению химических реагентов, способных статистически значимо повысить СР крахмала.

Для получения необходимого результата, поставлены следующие задачи:

1) Провести поиск и анализ проведенных в мире исследований,
2) Выбрать наиболее осуществимые в условиях института модификации,
3) Подобрать исходное сырье, нативный крахмал, и обосновать выбор,
4) Изготовить опытные образцы модифицированных крахмалов,
5) Определить физико-химические и реологические свойства полученных крахмалов,
6) Рассчитать критерий наименьшей существенной разницы и с его помощью сравнить полученные результаты,
7) Сделать вывод о целесообразности использования выбранных модификаций для повышения СР.

2. Материалы и методы

2.1.Объекты исследования

Нативный гороховый крахмал «NASTAR» (Cosucra, Бельгия), фосфатный крахмал («Полифан» по ТУ 2148-011-00203677-06; триметафосфат натрия по ГОСТ 31686, карбамид по ГОСТ 2081, вода питьевая по ГОСТ Р 51232 или по СанПиН 2.1.4.1074-01), ацетатный крахмал (кислота уксусная по ГОСТ 61; сода кальцинированная по ГОСТ 5100), окисленный крахмал (перекись водорода по ГОСТ 177; железо (II) сернокислое 7-водное по ГОСТ 4148; натрия гидроокись по ГОСТ 4328; воду питьевую по ГОСТ Р 51232 или по СанПиН 2.1.4.1074-01), карбоксиметилированный крахмал (натрия гидроокись по ГОСТ 4328; монохлоруксусная кислота по CAS 79-11-8; спирт этиловый ректификованный по ГОСТ Р 56389; фенолфталеин по ГОСТ 4919.1; кислота соляная по ГОСТ 3118; дистиллированная вода по ГОСТ Р 58144).

2.2.Методы исследования:

— определение СР крахмала (RS) – по Методике ВНИИК (ФР.1.31.2019.35626), после двухстадийного ферментативного гидролиза, в 2-х повторностях, в соответствии со схемой, представленной на Рисунке 1.

— массовая доля глюкозы – на жидкостном хроматографе с углеводной колонкой REZEX 200 x 10.0 мм RSO-Oligosaccharide, 1 151-954-075 (00P-0133-N0), в %.

— массовые доли легкоперевариваемого (RDS), медленно перевариваемого (SDS) крахмалов – расчетным методом, по массовым долям глюкозы: в пробе 1 – RDS, в пробе 2 – SDS,

— массовая доля амилозы – йодометрическим методом по ГОСТ ISO 6647-1–2015.

— сухое вещество, pH («Экотест 2000»)– по ГОСТ 7698–93,

— массовая доля влаги образцов – на весовом влагомере марки MF–50 (фирма AND, Япония).

— степень замещения КМК по методу из ТУ 9187-030-00334735–97 «Густамил».

— температурный режим – термостат марки «LB–216» (водяной, с автоматическим регулированием температуры, обеспечивающий постоянство температуры до 0,1 °C) – с его помощью проводили модификации,

— верхнеприводная пропеллерная мешалка на штативе OST basic, IKA (от 50 до 2000 об/мин),

— декстринизатор барабанный,

— динамическая вязкость – вискозиметр Гепплера (РД 50-366-82),

— растворимость в холодной и горячей воде (5%) – органолептически,

— построение уравнений реакций – программа CHEMWINDOW 6.0,

— математическая обработка – STATISTICA 10, пакет анализа Microsoft Office Excel 2019 (критерий наименьшей существенной разницы (НСР) при уровне значимости $\alpha = 0,05$).

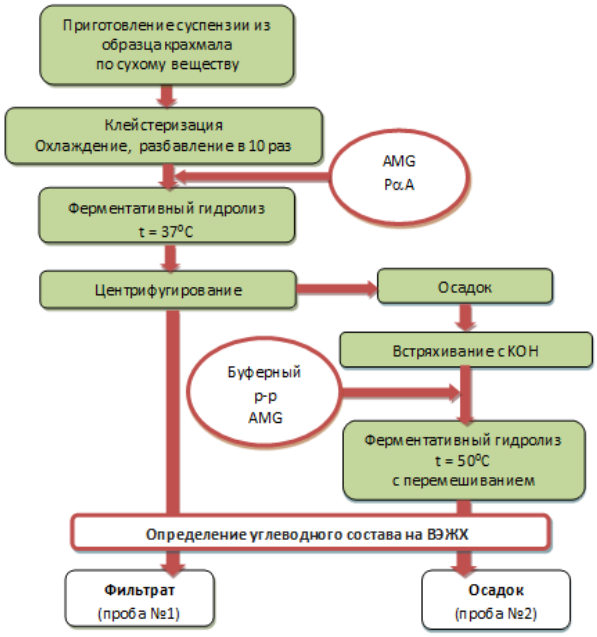


Рисунок 1. Схема оценки степени резистентности крахмалов

3. Результаты и обсуждение

На подготовительном этапе осуществлялся поиск и анализ зарубежной и отечественной литературы. Использование модифицированных крахмалов в продуктах питания регулируется Техническим регламентом Таможенного союза 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств». В перечень разрешенных пищевых добавок входит 17 модифицированных крахмалов: E1400 - Декстрины, крахмал, обработанный термически, белый и желты; E1401 – Крахмал, обработанный кислотой; E1402 – Крахмал, обработанный щелочью; E1403 – Крахмал отбеленный; E1404 – Крахмал окисленный; E1405 – Крахмал, обработанный ферментами; E1410 – Монокрахмалфосфат; E1412 – Дикрахмалфосфат; E1413 – Фосфатированный дикрахмалфосфат; E1414 – Дикрахмалфосфат ацетилированный; E1420 – Крахмал ацетилированный; E1422 – Дикрахмаладипат ацетилированный; E1440 – Крахмал оксипропилированный; E1442 – Дикрахмалфосфат оксипропилированный; E1450 – Эфир крахмала и натриевой соли октенилянтарной кислоты; E1451 – Крахмал ацетилированный окисленный; E1452 – Крахмала и алюминиевой соли октенилянтарной кислоты эфир.

На Рисунке 2 изображены виды химических воздействий на крахмал, которые приводят к улучшению его функциональных свойств. В каждом случае, химический реагент препятствует правильному взаимодействию крахмал-фермент [8,14].

Рисунок 2. Химические модификации крахмала

Учеными разных стран выявлено влияние химических реагентов на СР крахмалов:

– Ацетилированный и гидроксипропилированный крахмалы характеризуются высокой СР – в 2-6 раза выше, чем у исходных, у цитратных крахмалов в 6 раз [15-17].

– Фосфатирование повышает СР в 1,5 – 20 раз, в зависимости от вида исходного сырья, концентрации и используемых реагентов (триметафосфат или триполифосфат натрия) [18-21].

– При окислении (кислород, озон, гипохлорит натрия, перекись водорода) образуются функциональные группы (карбонильные и карбоксильные), которые препятствуют ферментативному гидролизу [22,23].

– Гидроксипропиловый дикрахмалфосфат и ацетилированный дикрахмалфосфат проявляют в 2 раза более низкую СР по сравнению с нативным крахмалом [22].

– Декстрины, полученные при определенных условиях, демонстрируют высокую СР, причем она увеличивается с возрастанием степени декстринизации и времени процесса (в 3-6 раз) [24-26].

– Карбоксиметилирование повышает СР, по литературным данным, в 2-3 раза [27].

– Кислотный гидролиз – получение модифицированного крахмала обработкой неорганической кислотой. Из-за разрушения аморфных участков крахмала обработка соляной кислотой приводит к увеличению соотношения кристаллических частей, к которым ферментам труднее получить доступ. При этом доля РК увеличивается от 2 до 10 раз [28].

Каждая группа ученых использовала разные методы определения СР, опираясь на возможности и приборную базу своих лабораторий. Описывалось использование панкреатин-гравиметрических, ВЭЖХ, фотоколориметрических методов при разных активностях ферментов, температурах и времени гидролиза, поэтому данные по СР сильно варьируются. Необходимо проверить найденные гипотезы.

Для исследования и дальнейших модификаций был использован гороховый крахмал, перечислим основные причины, обосновывающие выбор:

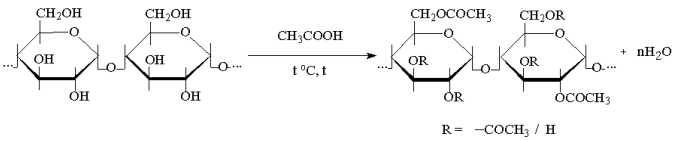
1) гороховый крахмал обладает высоким содержанием амилозы, значит, наиболее перспективен как сырье для использования в технологиях повышения СР, так как чем выше массовая доля амилозы, тем больше фракция РК [29].

2) в РФ имеет место значительный рост интереса к глубокой переработке зерна гороха с целью производства растительного протеина, в таком случае, гороховый крахмал становится многотоннажным отходом [30,31].

3) горох – это бобовая азотфиксирующая культура (клубеньковые бактерии рода Rhizobium фиксируют азот из воздуха, до 130 кг/га), универсальный предшественник в севооборотах, который повышает плодородие почв: переводит фосфор из трудно- в легкодоступную форму, увеличивает численность и активность микробной биомассы почвы [32-34].

Исходя из изученной литературы, разрешенного перечня пищевых модифицированных крахмалов и возможностей института, было принято решение использовать следующие модификации: ацетилирование, окисление, фосфатирование, адипинирование и карбоксиметилирование.

Ацетилированный крахмал – E 1420 (ГОСТ 33782-2016). Относится к категории стабилизаторов консистенции продуктов. Получают с использованием ледяной уксусной кислоты или уксусного ангидрида, путем выдерживания смеси при температуре кипения:



Ацетилирование крахмала снижает вязкость его клейстеров, но повышает их стабильность и пленкообразующую способность. На Рисунке 3 изображена шаги, необходимые для проведения реакции.

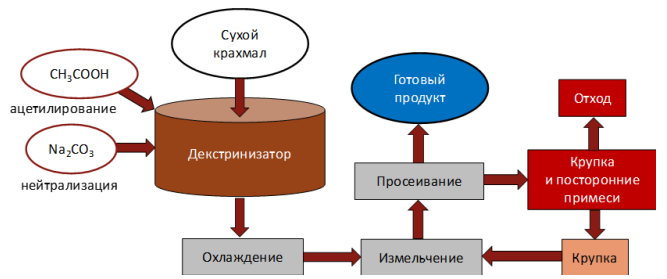
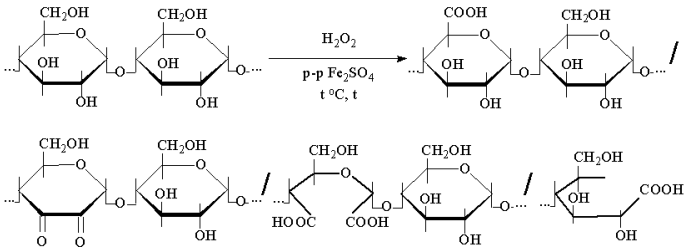


Рисунок 3. Технологическая схема получения ацетатного крахмала «полусухим» способом

Окисленный крахмал (желирующий) – Е1404 (СанПиН 2.3.2.1293-03, ГОСТ Р 54647-2011) регулирует консистенцию – выполняет функции стабилизатора, загустителя, структурообразователя. Реакцию окисления проводят с использованием перекиси водорода или перманганата калия и катализатора, сернокислого железа (Рисунок 4):



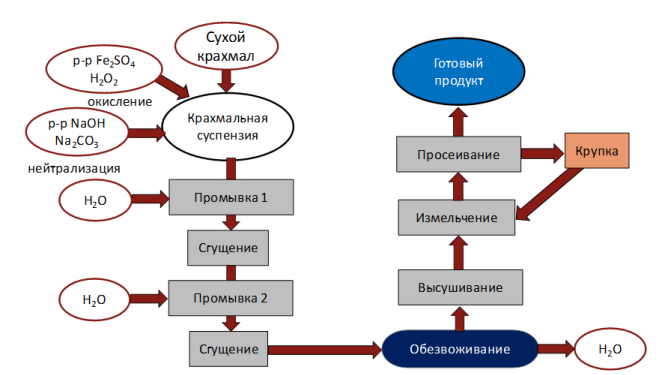
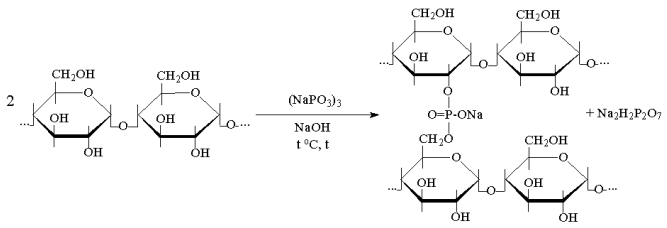


Рисунок 4. Технологическая схема получения окисленного крахмала

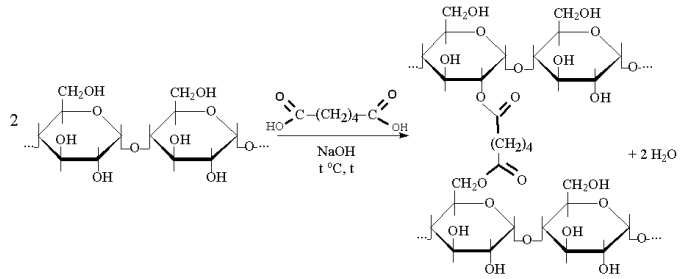
Дикрахмалфосфат – Е1412 (СанПиН 2.3.2.1293-03, ГОСТ Р 33782-2016) связующий агент, загуститель, стабилизатора. Получают реакцией этерификации, при мо помощи натриевых солей метафосфорной кислоты или других фосфорилирующих агентов, иногда с карбамидом:



Принципиальная схема получения дикрахмалфосфата представлена на Рисунке 5.

Рисунок 5. Технологическая схема получения фосфатного крахмала

Дикрахмаладипат – модифицированный крахмал, сшитый адипиновой кислотой или ее ангидридом (ГОСТ 32902-2014):



Реакцию с адипиновой кислотой проводили в соответствии со схемой, представленной на Рисунке 6.

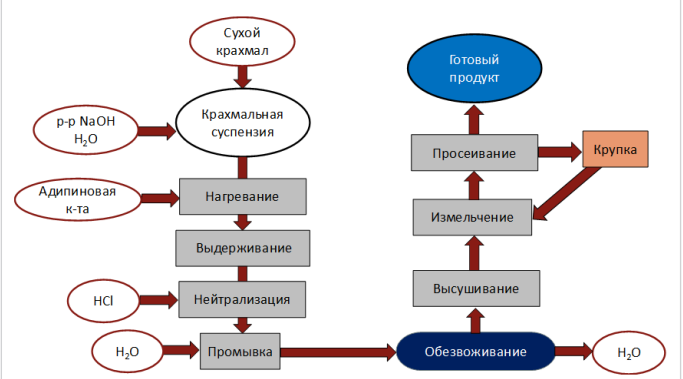
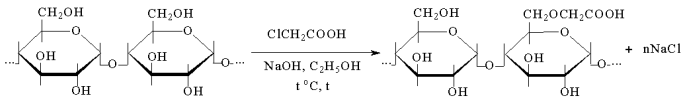


Рисунок 6. Технологическая схема получения адипатного горохового крахмала

Карбоксиметилкрахмал – модифицированный крахмал, анионный карбоксиметилкрахмал, анионно-модифицированный крахмал, крахмальная камедь, CMS, карбоксиметиловые эфиры крахмала (номер CAS 9063-38-1). GB 29937-2013 «Карбоксиметилкрахмал - пищевая добавка, национальный стандарт пищевой безопасности» (Китай, Тайвань, Вьетнам), степень замещения не более 0,2 по Керу (0,02 по ТУ «Густамил») моль/моль.

При степени замещения 0,1 (0,01) моль/моль и выше КМК в холодной воде образует устойчивые вязкие клейстеры, что делает его хорошим загустителем, стабилизатором, структурообразователем разных пищевых (мороженое, низкожировые маргарины, масло, кремы, майонезы) и непищевых систем. КМК широко используется в пероральных фармацевтических препаратах, в составах капсул и таблеток. Дозировка обычно составляет от 2% до 8%. Хотя во

многих случаях достаточно 2%, оптимальное содержание составляет 4%. КМК также можно применять и применяют в качестве суспендирующего агента. КМК может усиливать работу иммунных органов организма (тимуса), увеличивать количество клеток; избирательно стимулирует Т-клетки, способствует созреванию и дифференцировке Т-клеток; способствует трансформации лимфобластов, увеличивает абсолютное количество лимфоцитов; повышает концентрации IgA, IgG в плазме [35]. Поэтому наряду с другими модификациями проведено карбоксиметилирование горохового крахмала:



За основу был взят метод получения КМК мокрым способом ВНИИК, доработанный с учетом условий использования горохового КМК в пищевых целях (Рисунок 7). МХУК или хлоруксусная кислота, необходимая для получения КМК, относится ко 2 классу опасности, является высокотоксичным химическим соединением, поэтому необходимо строго соблюдать правила техники безопасности и использовать средства индивидуальной защиты.

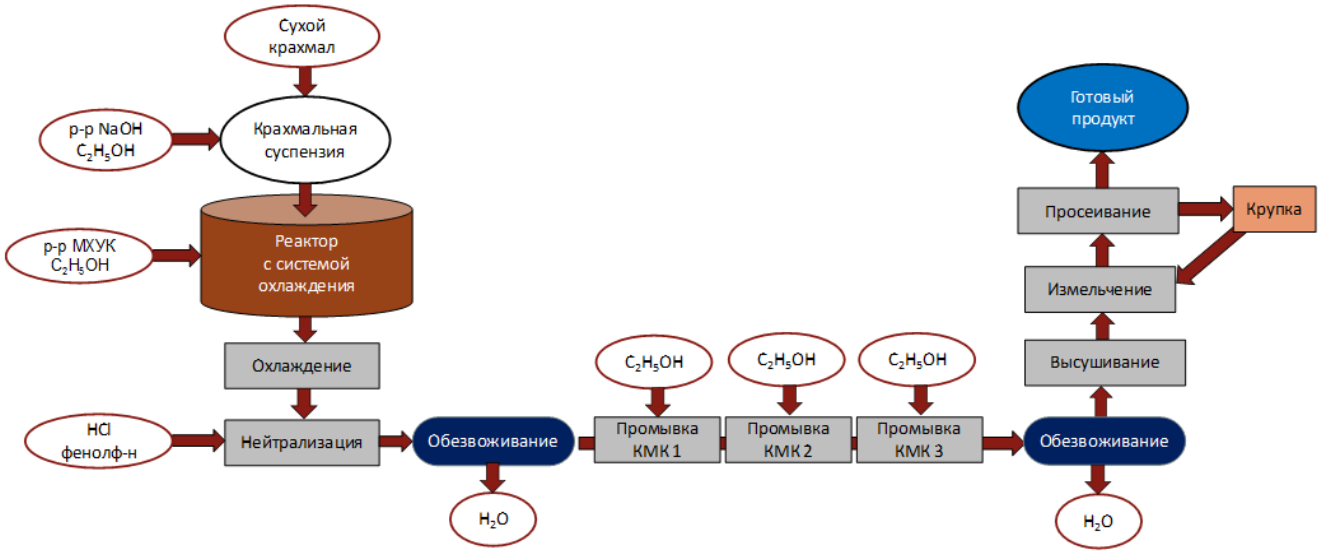


Рисунок 7. Технологическая схема получения карбоксиметилированного крахмала «мокрым» способом

Значимое повышение СР наблюдается у обработанного 2%-ным раствором адипиновой кислоты и карбоксиметилированного крахмалов, на это указывается рассчитанный критерий НСР, при уровне значимости 0,05 (Таблица 1).

Таблица 1

Сравнительная таблица физико-химических и реологических свойств модификаций из горохового крахмала

Крахмалы	RS (СР), % $НСР_{0,05}$ = 1,9 %	Динамическая вязкость по Гепплеру, мПа*с и % клейстера	Растворимость в воде (органолептически)	pH (ГОСТ 7698-93)	Устойчивость к термоокислению (лит. данные)	Стоимость, руб/кг (агросервер.ру)
Нативный Амилоза = 36,4%	19,1	124,4 4 %	Хорошо растворим в горячей воде	6,5	~120 °C	~80
Ацетатный 1% E1420	15,5	40 6 %	Хорошо растворим в горячей воде	6,0	~150 °C	~100-150
Окисленный 1% E1404	13,0	35 с 8 %	Хорошо растворим в горячей воде	6,0	~150 °C	~100-150
Фосфатный (ТМФ) E1412	14,9	36,63 4 %	Хорошо растворим в горячей воде	7,5	~150 °C	~100-150
Фосфатный (Полифан) E1412	12,5	16 4 %	Хорошо растворим в горячей воде	7,5	~150 °C	~100-150
Фосфатный (ТМФ +кабрамид) E1412	19,3	10 4 %	Хорошо растворим в горячей воде	7,0	~150 °C	~100-150
Фосфатный (Полифан +карбамид) E1412	15,3	12 4 %	Хорошо растворим в горячей воде	7,0	~150 °C	~100-150
Адипатный 1%	19,6	29,7 4 %	Хорошо растворим в горячей воде	7,0	~150 °C	~100-150
Адипатный 2%	22,4	59,4 4 %	Хорошо растворим в горячей воде	7,0	~150 °C	~100-150
Адипатный 4%	20,5	54,45 4 %	Хорошо растворим в горячей воде	7,4	~150 °C	~100-150
КМК	74,0	3785,84 2 %	Хорошо растворим в холодной воде	7,0	Выше 150 °C	~180-250

Наиболее резистентным среди исследуемых образцов крахмалов оказался КМК, СР повысилась в 5 раз, а вязкость в 30 раз по сравнению с исходным. СЗ полученного горохового КМК составила 0,014 моль/моль, что соответствует требованиям безопасности пищевых КМК (не более 0,02 моль/моль).

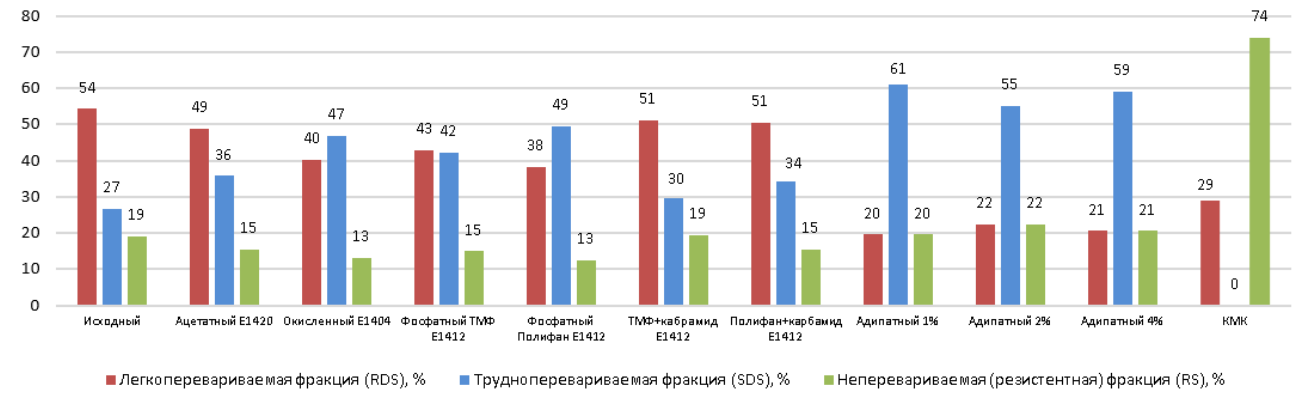


Рисунок 8. Фракционный состав исследуемых модифицированных крахмалов

Проанализировав полученный фракционный состав исследуемых крахмалов (Рисунок 8), можно сделать вывод о возможности использования окисленного и фосфатных (с применением ТМФ и полифана) крахмалов в продуктах питания для людей, больных гипогликемией. Благодаря преобладанию медленно перевариваемой фракции, постпрандиальный уровень глюкозы в крови будет более стабильным, без существенных скачкообразных изменений. Требуется провести дополнительные эксперименты по изменению концентраций реагентов, времени модификации и температуре.

4. Выводы

В ходе исследования был проведен поиск и анализ результатов актуальных научно-исследовательских работ. С учетом изученной научной литературы и перечня разрешенных к использованию пищевых были выбраны наиболее осуществимые в условиях института модификации: ацетилирование (E1420), окисление (E1404), фосфатирование (E1412), адипинирование и карбоксиметилирование. Сырьем для проведения испытаний послужил гороховый крахмал «Nastar» («Cosucra»), единственной компании в мире, которая производит крахмал из гороха в промышленных масштабах. Значимое повышение СР наблюдалось у адипатного (2%) – 22,4% и КМК – 74%. СЗ КМК не превысила установленный нормативными документами порог (0,02 моль/моль) и равна 0,014 моль/моль. В окисленном, фосфатном (с полифаном) и адипатных крахмалах преобладает медленно перевариваемая фракция, выше 40%, но в качестве ингредиентов, например, для людей больных гипогликемией, целесообразно использовать окисленный и фосфатные крахмалы, изготовленные без карбамида. По результатам анализа in vitro, именно эти пищевые добавки смогут гарантировать пролонгированное действие и обеспечить стабильный уровень глюкозы в крови, так как разница в массовых долях перевариваемых фракций варьируется от 1 до 12%.

По промежуточным результатам, только адипатный и КМК удовлетворяют поставленной цели, то есть значимо повышают СР. Уже ведутся эксперименты по:

1) уточнению технологических параметров (температуры, времени, концентрации реагентов – щелочи и МХУК) для получения карбоксиметилированного крахмала с наиболее высокой СР;

2) исследованию влияния двойной химической модификации, так как еще в 2004 году возникли утверждения, что доля РК увеличивается с ростом числа химических воздействий на него, проведенных одновременно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. SOFI Press Conference. (2018, 11 September). *Launch of the State of Food Security and Nutrition in the World* Sheikh Zayed Centre (FAO Headquarters). Retrieved from http://www.fao.org/webcast/home/en/item/4828/icode/ Accessed April 01, 2019
2. Shen, D., Bai, H., Li, Z., Yu, Y., Zhang, H., Chen, L. (2016). Positive effects of resistant starch supplementation on bowel function in healthy adults: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 68(2), 149-157. https://doi.org/10.1080/09637486.2016.1226275
3. Umu, O.C., Frank, J.A., Fangel, J.U., Oostindjer, M., da Silva, C.S., Bolhuis, E.J., et. al. (2015). Resistant starch diet induces change in the swine microbiome and a predominance of beneficial bacterial populations. *Microbiome*, 3, Article 16. https://doi.org/10.1186/s40168-015-0078-5
4. Young, W., Roy, N.C., Lee, J., Lawley, B., Otter, D., Henderson, G., et. al. (2012). Changes in bowel microbiota induced by feeding weanlings resistant starch stimulate transcriptomic and physiological responses. *Applied and Environmental Microbiology*, 78, 6656-6664. https://doi.org/10.1128/AEM.01536-12
5. Jyoshna, E., Dr. Hymavathi, T.V. (2017). Review of studies on effect of resistant starch supplementation on glucose and insulin. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(3), 55-58.
6. Hendrich, S. (2010). Battling obesity with resistant starch. *Food technology*, 64(3), 22-30.
7. Wong, T.H.T., Louie, J.C.Y. (2016). The relationship between resistant starch and glycemic control: A review on current evidence and possible mechanisms. *Starch - Stärke*, 69(7-8), 1600205. https://doi.org/10.1002/star.201600205
8. Khoozani, A. A., Birch, E.-J., Bekhit, E.-D. A. (2019). Resistant Starch Preparation Methods. Chapter in a book: Encyclopedia of Food Chemistry, 2, 390-394. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.22491-8
9. Shi, Y.-C., Jeffcoat, R. (2009). Structural Features of Resistant Starch. *Advanced Dietary Fibre Technology*, 430-439. https://doi.org/10.1002/9780470999615.ch37
10. Sharma, A., Yadav, B.S., Yadav, R.B. (2008). Resistant Starch: Physiological Roles and Food Applications. *Food Reviews International*, 24(2), 193-234. https://doi.org/10.1080/87559120801926237
11. Goderis, B., Putseys, J.A., Gommes, C.J., Bosmans, G.M., Delcour, J.A. (2014). The Structure and Thermal Stability of Amylose–Lipid Complexes: A Case Study on Amylose–Glycerol Monostearate. *Crystal Growth & Design*, 14(7), 3221-3233. https://doi.org/10.1021/cg4016355
12. Gul, K., Mir, N.A., Yuosof, B., Allai, F.M., Sharma, S. (2021). Starch: An Overview. Chapter in a book: Food biopolymers: Structural, functional and nutraceutical properties, 3-17. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27061-2_1
13. Wang, S., Ren, F., Chao, C., Liu, X. (2021). Alterations of polysaccharides, starch gelatinization, and retrogradation. Chapter in a book: Chemical Changes During Processing and Storage of Foods, 171-214. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817380-0.00005-1

14. Dobranowski, P.A., Stintzi, A. (2021). Resistant starch, microbiome, andprecision modulation, *Gut Microbes*, 13(1), Article 1926842. https://doi.org/10.1080/19490976.2021.1926842
15. Golachowski, A., Zieba, T., Kapelko-Zeberska, M., Drozdz, W., Gryszkin, A., Grzechac, M. (2015). Current research addressing starch acetylation. *Food Chemistry*, 176, 350-356. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.12.060.49
16. Ashwar, B. A., Gani, A., Shah, A., Masoodi, F. A. (2016). Production of RS4 from rice by acetylation: Physico-chemical, thermal, and structural characterization. *Starch - Stärke*, 69(1-2), 1600052. https://doi.org/10.1002/star.201600052
17. Fu, Z., Zhang, L., Ren, M.-H., BeMiller, J.N. (2019). Developments in hydroxypropylation of starch: a review. *Starch – Stärke*, 71(1-2), Article 1800167. https://doi.org/10.1002/star.201800167.48
18. Iacovou, M., Lim, J., Maningat, C.C., Bogatyrev, A., Ly, E., Dhital, S., et. al. (2017). In vivo digestibility of cross-linked phosphorylated (RS4) wheat starch in ileostomy subjects. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 12, 25-36. https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2017.08.002.47
19. Shi, M., Gu, F., Wu, J., Yu, S., Gao, Q. (2013). Preparation, physicochemical properties, and in vitro digestibility of cross-linked resistant starch from pea starch. *Starch - Stärke*, 65(11-12), 947-953. https://doi.org/10.1002/star.201300008
20. Song, J.-Y., Park, J.-H., Shin, M. (2010). The effects of annealing and acid hydrolysis on resistant starch level and the properties of cross-linked RS4 rice starch. *Starch - Stärke*, 63(3), 147-153. https://doi.org/10.1002/star.201000097
21. Siroha, A. K., Sandhu, K. S. (2018). Physicochemical, rheological, morphological, and in vitro digestibility properties of cross-linked starch from pearl millet cultivars. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 1371-1385. https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1489841
22. Leszczynski, W. (2004). Resistant starch. *Polish journal of food and nutrition sciences*, 13/54, 37-50.
23. Wronkowska, M., Krupa-Kozak, U., Soral-Smietana, M. (2009). Chemically Modified Potato Starch as a Source of Nutritional and Non-nutritional Components. Czech Journal of Food Sciences. Conference: 6th Chemical Reactions in Food Conferene, 27, Czech Republic
24. Slizewska, K., Kapusniak, J., Barczynska, R., Jochym, K. (2012). Resistant Dextrins as Prebiotic. Chapter in a book: Carbohydrates - Comprehensive Studies on Glycobiology and Glycotechnology. Open access peer-reviewed chapter. IntechOpen. 261-288. https://doi.org/10.5772/51573
25. Katarzyna, S. (2015). The Effect of Tartaric Acid-modified Enzyme-resistant Dextrin from Potato Starch on Growth and Metabolism of Intestinal Bacteria. *Journal of Plant Pathology & Microbiology*, 06(05). Article 1000269. https://doi.org/10.4172/2157-7471.1000269
26. Chaiwanichsiri, S., Kasikitwiwa, P., Laohasongkram, K. (2012) Effect of citric acid modification on resistant starch and physicochemical properties of rice flour. *KKU Science Journal*, 40, 72-79.
27. Liu, J., Ming, J., Li, W., Zhao, G. (2012). Synthesis, characterisation and in vitro digestibility of carboxymethyl potato starch rapidly prepared with microwave-assistance. *Food Chemistry*, 133(4), 1196-1205. https://doi.org10.1016/j.foodchem.2011.05.061
28. Nagahata, Y., Kobayashi, I., Goto, M., Nakaura, Y., Inouchi, N. (2013). The Formation of Resistant Starch during Acid Hydrolysis of High-amylose Corn Starch. *Journal of Applied Glycoscience*, 60(2), 123-130. https://doi.org/10.5458/jag.jag.jag-2012_008
29. Sofi, S.A., Ayoub, A., Jan, A., Gupta, P. (2017). Resistant starch as functional ingredient: A review. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 2(6), 195-199.
30. РБК. (РосБизнесКонсалтинг) (2020). В Липецкой области будут выпускать гороховый протеин. Электронный ресурс https://chr.rbc.ru/chr/freenews/5e6b48069a794787c6273bb7 Дата доступа 01.07. 2021
31. Forbes. (2021). «Уралхим» вложил 300 млн рублей в разработку альтернативных продуктов из гороха. Электронный ресурс https://www.forbes.ru/newsroom/biznes/434675-uralhim-vlozhil-300-mln-rubley-v-razrabotku-alternativnyh-produktov-iz-goroha Дата доступа 01.07.2021
32. Конончук В. В., Штырхунов В. Д., Благовещенский Г. В., Тимошенко С. М., Соболев С. В., Назарова Т. О. (2019). Азотфиксация гороха сортов Немчиновской селекции в зависимости от удобрений на дерново- подзолистой почве Центрального Нечерноземья и вклад фиксированного азота в малый биологический круговорот. *Зернобобовые и крупяные культуры*, 2(30), 27-35. https://doi.org/10.24411/2309-348X-2019-11084
33. Rose, T.J., Hardiputra, B., Rengel, Z. (2010). Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics. *Plant and Soil*, 326, 159-170.
34. Blanchart, E., Villenave, C., Viallatoux, A., Barthes, B., Girardin, C., Azontonde, A. et. al. (2005). Long-term effect of a legume cover crop (Mucuna pruriens var. utilis) on the communities of soil macrofauna and nematofauna under maize cultivation, in southern Benin. *European Journal of Soil Biology*, 42, 136-144.
35. OKCHEM. (2019). Facts about Sodium carboxymethyl starch uses. Retrieved from https://www.okchem.com/news/uHfRpKFmZ/Facts-about-Sodium-carboxymethyl-starch-Uses.html Accessed July 01, 2021

REFERENCES

1. SOFI Press Conference. (2018, 11 September). *Launch of the State of Food Security and Nutrition in the World Sheikh Zayed Centre* (FAO Headquarters). Retrieved from http://www.fao.org/webcast/home/en/item/4828/icode/ Accessed April 01, 2019
2. Shen, D., Bai, H., Li, Z., Yu, Y., Zhang, H., Chen, L. (2016). Positive effects of resistant starch supplementation on bowel function in healthy adults: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 68(2), 149-157. https://doi.org/10.1080/09637486.2016.1226275
3. Umu, O.C., Frank, J.A., Fangel, J.U., Oostindjer, M., da Silva, C.S., Bolhuis, E.J., et. al. (2015). Resistant starch diet induces change in the swine microbiome and a predominance of beneficial bacterial populations. *Microbiome*, 3, Article 16. https://doi.org/10.1186/s40168-015-0078-5
4. Young, W., Roy, N.C., Lee, J., Lawley, B., Otter, D., Henderson, G., et. al. (2012). Changes in bowel microbiota induced by feeding weanlings resistant starch stimulate transcriptomic and physiological responses. *Applied and Environmental Microbiology*, 78, 6656-6664. https://doi.org/10.1128/AEM.01536-12
5. Jyoshna, E., Dr. Hymavathi, T.V. (2017). Review of studies on effect of resistant starch supplementation on glucose and insulin. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(3), 55-58.
6. Hendrich, S. (2010). Battling obesity with resistant starch. *Food technology*, 64(3), 22-30.
7. Wong, T.H.T., Louie, J.C.Y. (2016). The relationship between resistant starch and glycemic control: A review on current evidence and possible mechanisms. *Starch - Stärke*, 69(7-8), 1600205. https://doi.org/10.1002/star.201600205
8. Khoozani, A. A., Birch, E.-J., Bekhit, E.-D. A. (2019). Resistant Starch Preparation Methods. Chapter in a book: Encyclopedia of Food Chemistry, 2, 390-394. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.22491-8
9. Shi, Y.-C., Jeffcoat, R. (2009). Structural Features of Resistant Starch. *Advanced Dietary Fibre Technology*, 430-439. https://doi.org/10.1002/9780470999615.ch37
10. Sharma, A., Yadav, B.S., Yadav, R.B. (2008). Resistant Starch: Physiological Roles and Food Applications. *Food Reviews International*, 24(2), 193-234. https://doi.org/10.1080/87559120801926237
11. Goderis, B., Putseys, J.A., Gommes, C.J., Bosmans, G.M., Delcour, J.A. (2014). The Structure and Thermal Stability of Amylose–Lipid Complexes: A Case Study on Amylose–Glycerol Monostearate. *Crystal Growth & Design*, 14(7), 3221-3233. https://doi.org/10.1021/cg4016355
12. Gul, K., Mir, N.A., Yuosof, B., Allai, F.M., Sharma, S. (2021). Starch: An Overview. Chapter in a book: Food biopolymers: Structural, functional and nutraceutical properties, 3-17. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27061-2_1
13. Wang, S., Ren, F., Chao, C., Liu, X. (2021). Alterations of polysaccharides, starch gelatinization, and retrogradation. Chapter in a book: Chemical Changes During Processing and Storage of Foods, 171-214. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817380-0.00005-1
14. Dobranowski, P.A., Stintzi, A. (2021). Resistant starch, microbiome, andprecision modulation, *Gut Microbes*, 13(1), Article 1926842. https://doi.org/10.1080/19490976.2021.1926842
15. Golachowski, A., Zieba, T., Kapelko-Zeberska, M., Drozdz, W., Gryszkin, A., Grzechac, M. (2015). Current research addressing starch acetylation. *Food Chemistry*, 176, 350-356. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.12.060.49
16. Ashwar, B. A., Gani, A., Shah, A., Masoodi, F. A. (2016). Production of RS4 from rice by acetylation: Physico-chemical, thermal, and structural characterization. *Starch - Stärke*, 69(1-2), 1600052. https://doi.org/10.1002/star.201600052
17. Fu, Z., Zhang, L., Ren, M.-H., BeMiller, J.N. (2019). Developments in hydroxypropylation of starch: a review. *Starch – Stärke*, 71(1-2), Article 1800167. https://doi.org/10.1002/star.201800167.48
18. Iacovou, M., Lim, J., Maningat, C.C., Bogatyrev, A., Ly, E., Dhital, S., et. al. (2017). In vivo digestibility of cross-linked phosphorylated (RS4) wheat starch in ileostomy subjects. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 12, 25-36. https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2017.08.002.47
19. Shi, M., Gu, F., Wu, J., Yu, S., Gao, Q. (2013). Preparation, physicochemical properties, and in vitro digestibility of cross-linked resistant starch from pea starch. *Starch - Stärke*, 65(11-12), 947-953. https://doi.org/10.1002/star.201300008
20. Song, J.-Y., Park, J.-H., Shin, M. (2010). The effects of annealing and acid hydrolysis on resistant starch level and the properties of cross-linked RS4 rice starch. *Starch - Stärke*, 63(3), 147-153. https://doi.org/10.1002/star.201000097
21. Siroha, A. K., Sandhu, K. S. (2018). Physicochemical, rheological, morphological, and in vitro digestibility properties of cross-linked starch from pearl millet cultivars. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 1371-1385. https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1489841
22. Leszczynski, W. (2004). Resistant starch. *Polish journal of food and nutrition sciences*, 13/54, 37-50.

23. Wronkowska, M., Krupa-Kozak, U., Soral-Smietana, M. (2009). Chemically Modified Potato Starch as a Source of Nutritional and Non-nutritional Components. Czech Journal of Food Sciences. Conference: 6th Chemical Reactions in Food Conferene, 27, Czech Republic
24. Slizewska, K., Kapusniak, J., Barczynska, R., Jochym, K. (2012). Resistant Dextrins as Prebiotic. Chapter in a book: Carbohydrates - Comprehensive Studies on Glycobiology and Glycotechnology. Open access peer-reviewed chapter. IntechOpen. 261-288. https://doi.org/10.5772/51573
25. Katarzyna, S. (2015). The Effect of Tartaric Acid-modified Enzyme-resistant Dextrin from Potato Starch on Growth and Metabolism of Intestinal Bacteria. *Journal of Plant Pathology & Microbiology*, 06(05). Article 1000269. https://doi.org/10.4172/2157-7471.1000269
26. Chaiwanichsiri, S., Kasikitwiwa, P., Laohasongkram, K. (2012) Effect of citric acid modification on resistant starch and physicochemical properties of rice flour. *KKU Science Journal*, 40, 72-79.
27. Liu, J., Ming, J., Li, W., Zhao, G. (2012). Synthesis, characterisation and in vitro digestibility of carboxymethyl potato starch rapidly prepared with microwave-assistance. *Food Chemistry*, 133(4), 1196-1205. https://doi.org10.1016/j.foodchem.2011.05.061
28. Nagahata, Y., Kobayashi, I., Goto, M., Nakaura, Y., Inouchi, N. (2013). The Formation of Resistant Starch during Acid Hydrolysis of High-amylose Corn Starch. *Journal of Applied Glycoscience*, 60(2), 123-130. https://doi.org/10.5458/jag.jag.jag-2012_008
29. Sofi, S.A., Ayoub, A., Jan, A., Gupta, P. (2017). Resistant starch as functional ingredient: A review. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 2(6), 195-199.
30. RBC. (RosBusinessConsulting) (2020). Pea protein will be produced in the Lipetsk region. Retrieved from https://chr.rbc.ru/chr/freenews/5e6b48069a794787c6273bb7 Accessed July 01, 2021 (In Russian)
31. Forbes. (2021). «Uralchem» invested 300 million rubles in the development of alternative pea products. Retrieved from https://www.forbes.ru/newsroom/biznes/434675-uralhim-vlozhil-300-mln-rubley-v-razrabotku-alternativnyh-produktov-iz-goroha Accessed July 01, 2021 (In Russian)
32. Kononchuk, V.V., Shtyrhunov, V.D., Blagoveschenskij, G.V., Timoshenko, S.M., Sobolev, S.V., Nazarova, T.O. (2019). Nitrogen fixation of pea varieties of nemchinovka selection in dependence on fertilizers on sod-podzolic soil of the central nonblack earth region and contribution of fixed nitrogen into small. *Legumes and cereals*, 2(30), 27-35. https://doi.org/10.24411/2309-348X-2019-11084 (In Russian)
33. Rose, T.J., Hardiputra, B., Rengel, Z. (2010). Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics. *Plant and Soil*, 326, 159-170.
34. Blanchart, E., Villenave, C., Viallatoux, A., Barthes, B., Girardin, C., Azontonde, A. et. al. (2005). Long-term effect of a legume cover crop (Mucuna pruriens var. utilis) on the communities of soil macrofauna and nematofauna under maize cultivation, in southern Benin. *European Journal of Soil Biology*, 42, 136-144.
35. OKCHEM. (2019). Facts about Sodium carboxymethyl starch uses. Retrieved from https://www.okchem.com/news/uHfRpKFmZ/Facts-about-Sodium-carboxymethyl-starch-Uses.html Accessed July 01, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Лидия Борисовна Кузина – младший научный сотрудник, отдел технологии модифицированных крахмалов, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопродуктов – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН 140052, Московская обл., Люберецкий р-н, пос. Коренево, ул. Некрасова, 11 – научный сотрудник, Центр исследования проблем безопасности РАН. 117335, Москва, ул. Гарибальди, 21Б. Тел.: +7-916-887-14-97. E-mail: kulibo.kavai@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2928-2510 *автор для контактов	**Lidia B. Kuzina** – researcher assistant, Department of modified starch technology, All-Russian Scientific Research Institute for Starch Products – branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS 11, Nekrasova str., 140052, Moscow region, Luberetskiy district, v. Korenevo, Russia – researcher, Security problems studies center of RAS. 21B, Garibaldy str., 117335, Moscow, Russia Tel.: +7-925-925-59-11. E-mail: nastya.rodi123@andex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2928-2510 *corresponding author
Анастасия Валериевна Родионова - младший научный сотрудник, отдел технологии модифицированных крахмалов, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопродуктов – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН 140052, Московская обл., Люберецкий р-н, пос. Коренево, ул. Некрасова, 11 Тел.: +7-916-887-14-97 E-mail: kulibo.kavai@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9299-4422	**Anastasya V. Rodionova** - researcher assistant, Department of modified starch technology, 1All-Russian Scientific Research Institute for Starch Products – branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS 11, Nekrasova str., 140052, Moscow region, Luberetskiy district, v. Korenevo, Russia Tel.: +7-925-925-59-11 E-mail: nastya.rodi123@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9299-4422

Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	The authors declare no conflict of interest