

# ВЛИЯНИЕ ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР И ПЕРЕВАРИМОСТЬ КРАХМАЛА *IN VITRO*\*

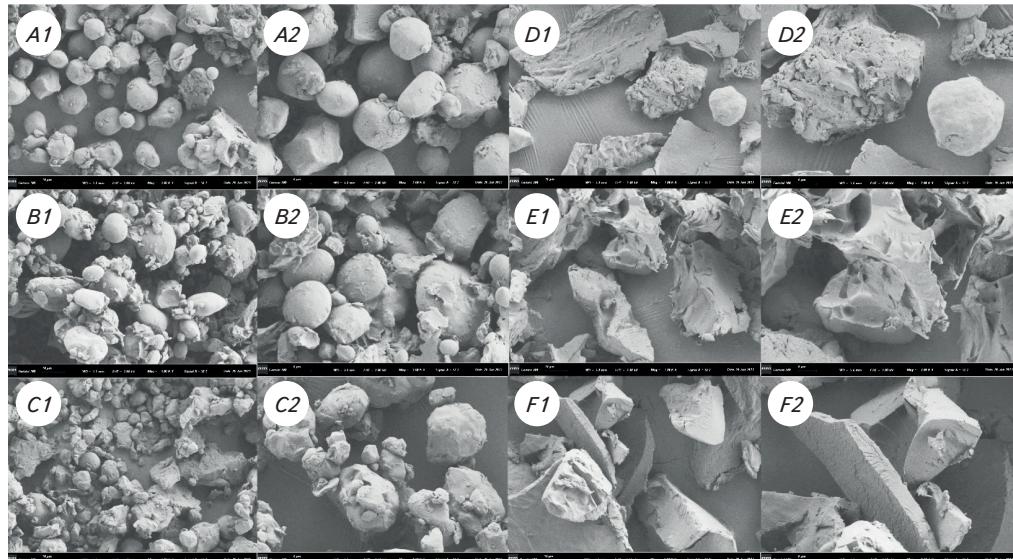
## РЕЗУЛЬТАТ

### Сканирующая электронная микроскопия

Изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, представлены на рисунке 1. На них видно, что размол сырой (в нативном виде) кукурузы представляет собой частицы неправильной квадратной или круглой формы, у некоторых из них шероховатая поверхность и небольшие круглые поры (*A1, A2*). Частицы пшеницы имеют форму эллипса, стремящуюся к круглой, лишь у немногих она неправильная (*B1, B2*). У частиц дробленого риса разнообразная форма, в основном многогранная, неправильная (*C1, C2*). Физическая целостность экструдированных частиц зерна нарушена, наблюдаются их разрывы, разбухание, структурные повреждения и существенный распад. На поверхности частиц кукурузы грубые повреждения, с углублениями и порами (*D1, D2*). Частицы пшеницы потеряли свою типичную эллиптическую форму и превратились в массу с рыхлой пористой структурой (*E1, E2*). Частицы риса разламывались и распадались на более крупные хлопья или фрагменты (*F1, F2*).

### ИК-спектроскопия с преобразованием Фурье

На рисунке 2а, б представлены преобразованные спектры злаков (в нативном и экструдированном виде) в области от 1200 до 800 см<sup>-1</sup> и в соотношении 1047 см<sup>-1</sup>/1022 см<sup>-1</sup> [R<sub>(1047/1022)</sub>]. Изменчительная разница в коэффициенте R между кукурузой, пшеницей и дробленым



**Рис. 1. Сканирующая электронная микрофотография:**  
*А* — сырья кукуруза, *В* — сырья пшеница, *С* — сырой дробленый рис,  
*Д* — экструдированная кукуруза, *Е* — экструдированная пшеница,  
*Ф* — экструдированный дробленый рис; 1 — увеличение  $\times 1000$ ; 2 — увеличение  $\times 2000$ .

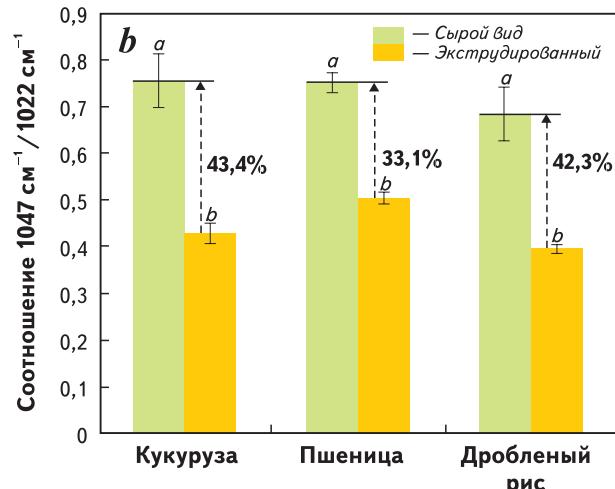
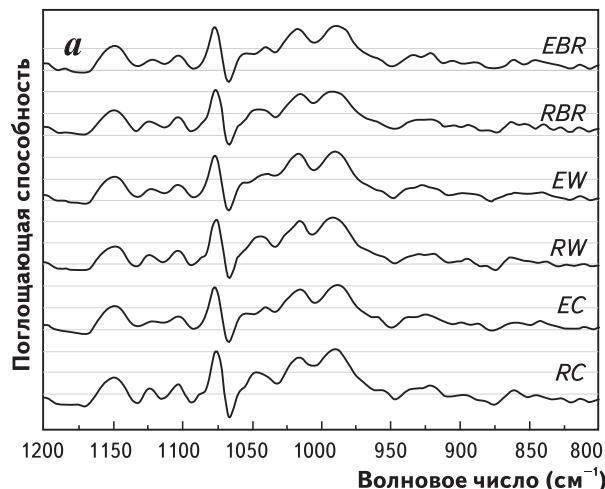
рисом была несущественной. Экструзия значительно уменьшила R, при этом кукуруза и дробленый рис продемонстрировали наиболее выраженный эффект: R понизился на 43,4 и 42,3%, соответственно.

### Химический состав

#### и степень желатинизации

Результаты анализа химического состава и степени желатинизации зерновых представлены в таблице 1. После экструзии содержание сухого вещества в трех видах злаков значительно увеличилось. Количество сырого протеина, золы и общего крахмала существенно не изменилось. В отличие от них содержание амилозы в экструдированных кукурузе, пшенице и рисе значительно возросло — соответственно на 15,8%, 17,1% и 36,1% ( $P < 0,05$ ), что привело к существенному увеличению соотношения амилоза/амилопектин в этих культурах. Степень желатинизации после экструзии заметно повысилась во всех образцах злаков (91,18–95,59%).

\*Окончание. Начало в №5-2025.



Полосы погрешности показывают стандартную ошибку ( $n = 3$ ); полосы, отмеченные разными буквами, значительно различаются ( $P < 0,05$ ). EBR — экструдированный дробленый рис; RBR — сырой дробленый рис; EW — экструдированная пшеница; RW — сырая пшеница; EC — экструдированная кукуруза; RC — сырая кукуруза.

**Рис. 2. Деконволюция ИК-спектра Фурье (FTIR) представлена в диапазоне от 800 до 1200 см<sup>-1</sup> (а) и в соотношении 1047 см<sup>-1</sup>/1022 см<sup>-1</sup> (б).**

**Таблица 1. Химический состав (% сухого вещества), фракции крахмала (% от общего крахмала) и степень желатинизации (%) зерновых культур**

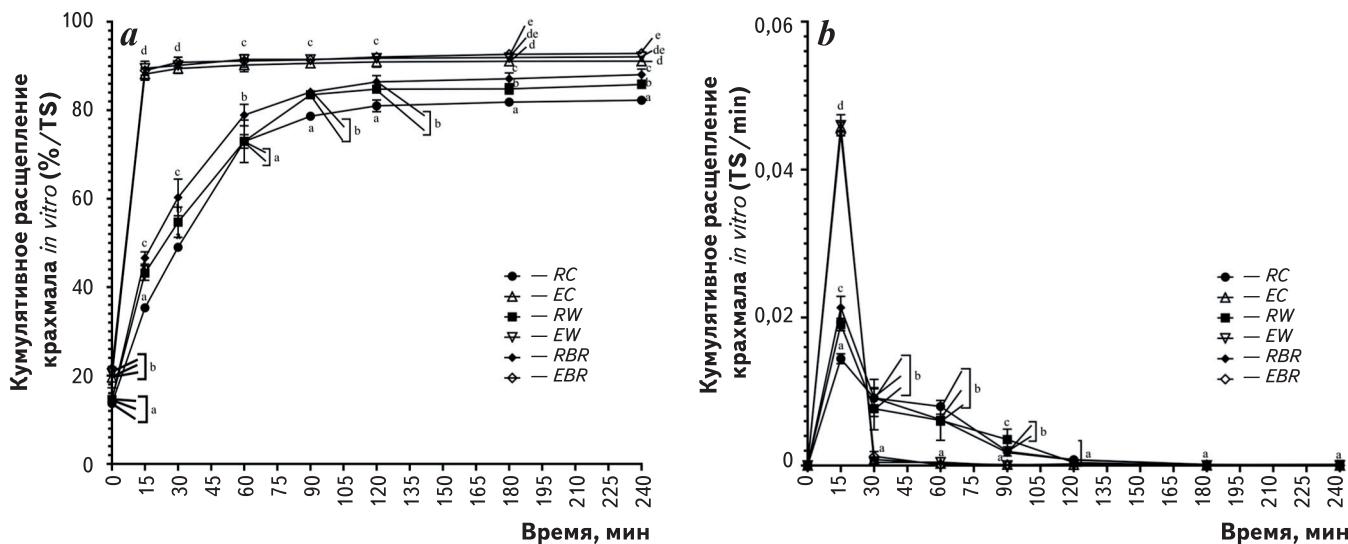
Показатель	Кукуруза		Пшеница		Дробленый рис		Р-значение
	сырая	экструдированная	сырая	экструдированная	сырой	экструдированый	
DM	89,40 ± 0,12 <sup>b</sup>	92,79 ± 0,01 <sup>d</sup>	90,6 ± 0,13 <sup>c</sup>	93,63 ± 0,08 <sup>e</sup>	88,17 ± 0,12 <sup>a</sup>	92,87 ± 0,37 <sup>d</sup>	<0,001
CP	8,52 ± 0,45 <sup>bc</sup>	9,04 ± 0,39 <sup>c</sup>	12,62 ± 0,20 <sup>d</sup>	12,23 ± 0,47 <sup>d</sup>	7,57 ± 0,06 <sup>a</sup>	7,99 ± 0,46 <sup>ab</sup>	<0,001
TS	65,63 ± 2,83 <sup>b</sup>	64,56 ± 1,73 <sup>ab</sup>	61,44 ± 2,31 <sup>ab</sup>	60,21 ± 3,85 <sup>a</sup>	74,00 ± 3,01 <sup>c</sup>	71,20 ± 2,74 <sup>c</sup>	<0,001
AM	33,69 ± 1,18 <sup>b</sup>	40,03 ± 0,79 <sup>c</sup>	29,75 ± 1,51 <sup>a</sup>	35,90 ± 1,38 <sup>b</sup>	22,88 ± 1,50 <sup>a</sup>	35,82 ± 0,71 <sup>b</sup>	<0,001
AP	66,31 ± 1,18 <sup>b</sup>	59,97 ± 0,79 <sup>a</sup>	70,25 ± 1,51 <sup>c</sup>	64,10 ± 1,38 <sup>b</sup>	77,12 ± 1,50 <sup>d</sup>	64,18 ± 0,71 <sup>b</sup>	<0,001
AM/AP	0,51 ± 0,03 <sup>c</sup>	0,67 ± 0,02 <sup>e</sup>	0,42 ± 0,03 <sup>b</sup>	0,56 ± 0,32 <sup>d</sup>	0,30 ± 0,03 <sup>a</sup>	0,56 ± 0,12 <sup>d</sup>	<0,001
DG	23,25 ± 1,51 <sup>a</sup>	95,59 ± 0,41 <sup>d</sup>	38,10 ± 1,57 <sup>b</sup>	91,18 ± 0,79 <sup>c</sup>	24,75 ± 0,66 <sup>a</sup>	91,28 ± 2,01 <sup>c</sup>	<0,001

Среднее значение трех повторов. Различия ( $P < 0,05$ ) обозначены значениями в каждом столбце, за которыми следуют разные буквы. DM — сухое вещество, CP — сырой протеин, TS — общий крахмал, AM — амилоза, AP — амилопектин; AM/AP — отношение содержания амилозы к содержанию амилопектина; DG — степень желатинизации.

### Переваримость крахмала *in vitro*

Временная шкала средней и абсолютной кривых накопленных относительных частот для переваримости крахмала *in vitro* показала значительные различия между культурами ( $P < 0,05$ ) (рис. 3а). Скорость переваривания была существенно выше у зерновых после экструзии по сравнению с исходными образцами ( $P < 0,05$ ). Переваримость кукурузы демонстрирует низкие показатели, а пшеницы и дробленого риса — высокие. Максимальные значения кривых переваривания крахмала *in vitro* для всех злаков достигались через 15 мин после начала наблюдения, составляя 89,5%, 89,0%, 88,2%, 46,6%, 43,2% и 35,3%, соответственно. После экструзии заметных различий по этому показателю обнаружено не было. У всех злаков через 15 мин наблюдалось различное снижение скорости высвобождения глюкозы. В течение 15–30 мин скорость этого процесса в образцах, подвергнутых экс-

трузии, резко упала, в то время как у исходного сырья снижение было умеренным. Через 30 мин она существенно не различалась во всех экструдированных образцах, как и суммарная скорость переваривания крахмала. Скорость высвобождения глюкозы из образцов, не подвергнутых экструзии, также существенно не различалась. Однако наблюдались значительные различия в суммарной скорости переваривания крахмала: кукуруза показала самую низкую скорость (49%), дробленый рис — самую высокую (60,3%). Во время теста *in vitro*, длившегося от 30 до 60 мин, скорость высвобождения глюкозы в экструдированных злаках демонстрировала относительную стабильность, в то время как у злаков, не подвергнутых экструзии, этот показатель продолжал снижаться. С 60-й по 120-ю минуту скорость стремилась к нулю, существенных различий не наблюдалось (для исходного сырья она по-прежнему различалась). Скорость данного процесса



Строчные верхние индексы указывают на значимые различия ( $P < 0,05$ ).

Рис. 3. Динамика кумулятивной переваримости крахмала *in vitro* (а) и абсолютной скорости усвоения крахмала *in vitro* (б) для каждого злака.

для всех злаков приближалась к нулю в период между 120-й и 240-й минутами, без существенных различий.

В таблице 2 приведены данные об изучаемых видах сырья и его переваримости. Установлено различие по уровню быстро перевариваемого крахмала (RDS) среди культур до экструдирования: наибольшим этот показатель был в дробленом рисе, наименьшим — в кукурузе, пшеница заняла среднее положение ( $P < 0,05$ ). Кукуруза продемонстрировала самое высокое содержание медленно переваривающегося крахмала (SDS) (40,18%), дробленый рис — самое низкое (33,11%), кукуруза также отличалась наибольшим содержанием устойчивого/резистентного крахмала (RS) ( $P < 0,05$ ). Во время экструзии частицы крахмала зерновых культур претерпели заметные изменения. По сравнению с исходным зерном, в экструдированных кукурузе, пшенице и дробленом рисе значительно увеличилось содержание RDS — на 53,2%, 47,6% и 40,38% ( $P < 0,05$ ). В то же время отмечено снижение уровня SDS на 95,6%, 95% и 92%, RS — на 50,1%, 46,2% и 41,3%, соответственно ( $P < 0,05$ ).

Через 120 мин после начала эксперимента высвобождение глюкозы из всех злаков переходило в фазу плато, поэтому кинетические параметры этого процесса рассчитывались на основе данных, полученных за 120 мин. Результаты указывают на увеличение ( $P < 0,05$ ) уровня переваривания белка в 0 мин времени ( $C_0$ ) в пшенице и дробленом рисе по сравнению с кукурузой. В то же время не наблюдалось заметных различий в потенциальной усвояемости ( $C_\infty$ ) и коэффициенте переваримости крахмала ( $k$ ) между кукурузой, пшеницей и дробленым рисом. После экструзии увеличилось значение  $C_0$  и  $k$  для всех трех злаков ( $P < 0,05$ ), но при этом  $C_\infty$  оставался неизменным.

#### Прогнозируемый гликемический индекс (pGI)

В таблице 2 приведены также данные о прогнозируемом гликемическом индексе зерновых. Обнаружены значительные различия по этому показателю между тремя исходными образцами. Наибольшим он был у дробленого риса, у пшеницы — ниже, у кукурузы — самым низким.

Таблица 2. Соотношение фракций крахмала, кинетические параметры пищеварения и pGI зерна

Показатель	Кукуруза		Пшеница		Дробленый рис		Р-значение
	сырая	экструдированная	сырая	экструдированная	сырой	экструдированный	
RDS	41,67 ± 0,78 <sup>a</sup>	89,17 ± 0,96 <sup>d</sup>	47,07 ± 1,19 <sup>b</sup>	89,91 ± 0,76 <sup>d</sup>	53,30 ± 1,11 <sup>c</sup>	89,40 ± 0,43 <sup>d</sup>	<0,001
SDS	40,18 ± 1,20 <sup>d</sup>	1,76 ± 0,31 <sup>a</sup>	37,71 ± 0,87 <sup>c</sup>	1,88 ± 0,64 <sup>a</sup>	33,11 ± 1,67 <sup>b</sup>	2,62 ± 0,26 <sup>a</sup>	<0,001
RS	18,16 ± 1,21 <sup>c</sup>	9,06 ± 1,19 <sup>a</sup>	15,3 ± 0,35 <sup>b</sup>	8,22 ± 0,26 <sup>a</sup>	13,59 ± 1,40 <sup>b</sup>	7,98 ± 0,60 <sup>a</sup>	<0,001
$C_0(120 \text{ min})$	12,98 ± 0,20 <sup>a</sup>	19,58 ± 2,34 <sup>c</sup>	15,52 ± 0,95 <sup>b</sup>	20,50 ± 0,62 <sup>c</sup>	15,07 ± 0,89 <sup>b</sup>	21,58 ± 0,71 <sup>c</sup>	<0,001
$C_\infty(120 \text{ min})$	73,29 ± 1,28 <sup>b</sup>	70,75 ± 1,50 <sup>ab</sup>	72,13 ± 2,47 <sup>ab</sup>	70,76 ± 1,19 <sup>ab</sup>	72,39 ± 1,01 <sup>ab</sup>	69,80 ± 0,52 <sup>a</sup>	0,100
$k(120 \text{ min})$	0,02 ± 0,00 <sup>a</sup>	0,23 ± 0,02 <sup>b</sup>	0,03 ± 0,00 <sup>a</sup>	0,26 ± 0,05 <sup>b</sup>	0,03 ± 0,00 <sup>a</sup>	0,22 ± 0,11 <sup>b</sup>	<0,001
pGI	53,07 ± 0,61 <sup>a</sup>	82,68 ± 1,25 <sup>d</sup>	58,64 ± 0,71 <sup>b</sup>	82,85 ± 2,00 <sup>d</sup>	63,13 ± 2,74 <sup>c</sup>	81,00 ± 1,09 <sup>d</sup>	<0,001

Среднее значение трех повторов. Различия ( $P < 0,05$ ) обозначены значениями в каждом столбце, за которыми следуют разные буквы.

После экструзии значения pGI кукурузы, пшеницы и дробленого риса увеличились соответственно на 35,8%, 29,2 и 22% ( $P < 0,05$ ).

### Взаимосвязь между химическим составом, фракциями крахмала и pGI

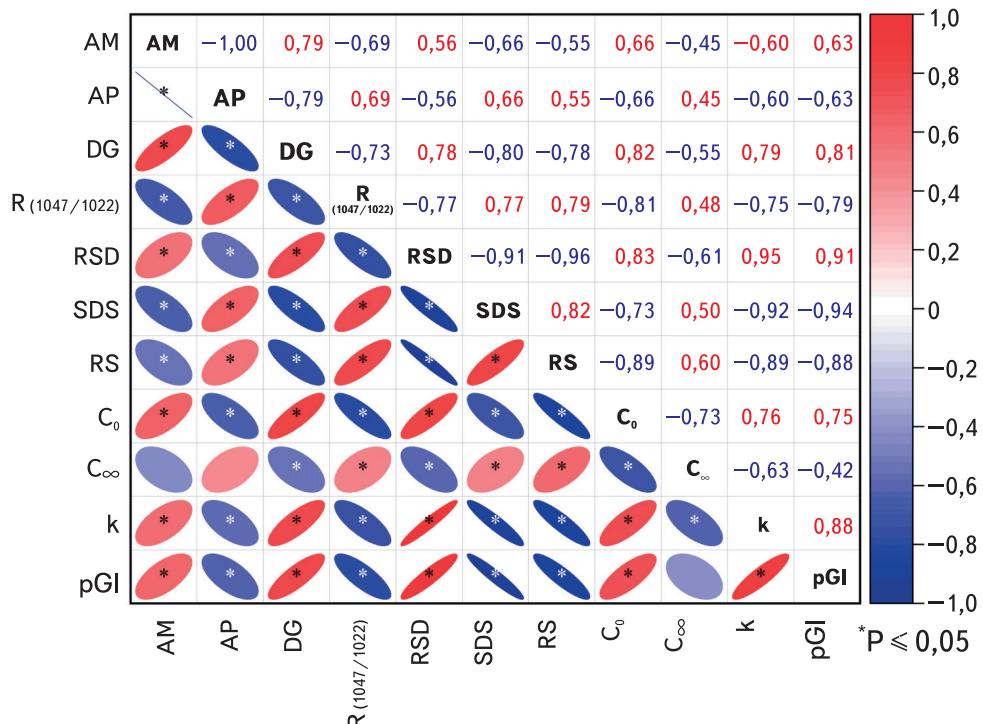
На рисунке 4 представлены результаты корреляционного анализа между физико-химическими свойствами, характеристиками пищеварения и прогнозируемым гликемическим индексом образцов. Положительную связь прогнозируемый гликемический индекс показал с быстро перевариваемым крахмалом ( $r = 0,91, P < 0,05$ ), коэффициентом  $k$  ( $r = 0,88, P < 0,05$ ), степенью желатинизации (DG) ( $r = 0,81, P < 0,05$ ),  $C_0$  ( $r = 0,75, P < 0,05$ ) и амилозой (AM) ( $r = 0,63, P < 0,05$ ). И наоборот, выявлена значительная отрицательная взаимосвязь с медленно перевариваемым ( $r = -0,94, P < 0,05$ ) и резистентным крахмалом ( $r = -0,88, P < 0,05$ ), амилопектином (AP) ( $r = -0,61, P < 0,05$ ), коэффициентом поглощения  $R_{(1047/1022)}$  ( $r = -0,79, P < 0,05$ ), коэффициентом  $k$  ( $r = 0,88, P < 0,05$ ), степенью желатинизации (DG) ( $r = 0,81, P < 0,05$ ),  $C_0$  ( $r = 0,75, P < 0,05$ ) и амилозой (AM) ( $r = 0,63, P < 0,05$ ).

Последний достоверно положительно коррелировал с RS ( $r = 0,79, P < 0,05$ ), SDS ( $r = 0,77, P < 0,05$ ) и амилопектином ( $r = 0,69, P < 0,05$ ), но значительно отрицательно с  $C_0$  ( $r = -0,81, P < 0,05$ ),  $k$  ( $r = -0,75, P < 0,05$ ), RDS ( $r = -0,77, P < 0,05$ ), степенью желатинизации крахмала ( $r = -0,73, P < 0,05$ ) и амилозой ( $r = -0,69, P < 0,05$ ). Степень желатинизации крахмала существенно положительно коррелировала с  $C_0$  ( $r = 0,82, P < 0,05$ ),  $k$  ( $r = 0,79, P < 0,05$ ), RDS ( $r = 0,78, P < 0,05$ ) и амилозой ( $r = 0,79, P < 0,05$ ), но существенно отрицательно с SDS ( $r = -0,80, P < 0,05$ ), RS ( $r = -0,78, P < 0,05$ ) и амилопектином ( $r = -0,79, P < 0,05$ ).

### ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что строение частиц злаков играет решающую роль в определении модели (паттерна) переваривания крахмала. Поэтому для изучения изменения состава частиц различных злаков до и после экструзии использовался метод электронной микроскопии. Их форма разнообразна, что согласуется с результатами предыдущих исследований. Появление белковых тел или их фрагментов, визуализирующихся как шаровидные или неправильной формы частицы, находящиеся между гранулами крахмала или прикрепленные к ним, было обусловлено разрушением белковой матрицы во время размола. Замечено, что гранулы крахмала экструдированного зерна теряют физическую целостность. По данным Zhang и соавт., гранулы крахмала нативного риса имели угловатую многогранную форму, в то время как гранулы экструдированного крахмала были сплошными и пористыми.

Эта морфологическая особенность может быть результатом денатурации белка, желатинизации крахмала и склеивания его гранул. Во время экструзии зерно на короткий период времени подвергается воздействию высокой температуры, трения и низкой влажности. После этого давление сбрасывается, температура падает,



**Рис. 4. Термометрическая карта, полученная из корреляции Пирсона между физико-химическими свойствами, характеристиками пищеварения и прогнозируемым гликемическим индексом зерна:**

**AM** — амилоза; **AP** — амилопектин; **DG** — степень желатинизации; **R<sub>(1047/1022)</sub>** — коэффициент поглощения  $1047 \text{ см}^{-1}/1022 \text{ см}^{-1}$ ; **RDS** — быстро перевариваемый крахмал; **SDS** — медленно перевариваемый крахмал; **RS** — резистентный крахмал; **C<sub>0</sub>** — коэффициент усвоения крахмала в момент времени 0 мин; **C<sub>∞</sub>** — потенциальная усвоемость; **k** — коэффициент скорости усвоения крахмала; **pGI** — прогнозируемый гликемический индекс.

что приводит к резкому выбросу влаги, и зерно с плотной структурой превращается в губчатую, неоднородную массу. В отличие от сырого зерна, экструдат имел рыхлую, пористую структуру, что позволяет пищеварительному ферменту проникать вглубь гранулы. Поскольку ферментам было легко атаковать эту массу, экструдированные частицы переваривались быстрее. Кроме того, эффективная площадь поверхности была дополнительно увеличена за счет трещин и повреждений на поверхности гранул экструдата. Согласно исследованиям большая относительная площадь поверхности частиц повышает эффективность контакта с ферментами и скорость связывания их с макромолекулами, ускоряя тем самым гидролиз.

Знание внутренней структуры зерна позволяет оказывать влияние на степень использования питательных веществ. Для более детального изучения структуры экструдированного крахмала в данном исследовании использовали ИК-Фурье спектрометр. Чувствительная зона перекрытия структуры крахмала была обнаружена в области 1200–800 см<sup>-1</sup> инфракрасного спектра. Считается, что полоса в этом диапазоне является результатом валентных колебаний С-О и С-С. Обработка методом деконволюции (восстановление исходного спектра из искаженного, полученного при измерении прибором) позволяет улучшить разрешение различных режимов колебаний (мод). Изменение поглощения при 1047 см<sup>-1</sup> и 1022 см<sup>-1</sup> показало значительную степень чувствительности к физическому состоянию крахмала. В предыдущих исследованиях было выявлено, что степень кристаллизации и порядок молекул полимерных соединений крахмала связаны с пиком при 1047 см<sup>-1</sup>, в то время как на аморфную фазу или неупорядоченность структуры указывает интенсивность полосы при 1022 см<sup>-1</sup>. Аморфные слои обычно считаются легко перевариваемыми по сравнению с кристаллическими, поэтому коэффициент поглощения  $R_{(1047/1022)}$  часто используется для оценки степени короткодействующей упорядоченности крахмала (кристалличность структуры крахмальных зерен). Более высокое значение  $R_{(1047/1022)}$  указывает на большую степень кристалличности структуры (когда упорядоченное расположение атомов или молекул в материале преобладает над неупорядоченным, или аморфным). Злаки в нативном виде демонстрируют высокий коэффициент поглощения. Различия по этому показателю были незначительными для кукурузы, пшеницы и дробленого риса, что свидетельствует о существовании одинаково упорядоченных крахмальных соединений. По сравнению с исходными образцами зерновых культур пик интенсивности поглощения в экструдированных постепенно увеличивается и составляет приблизительно 1022 см<sup>-1</sup>, в то время как пик в районе 1047 см<sup>-1</sup> более сглажен, что согласуется с предыдущими исследованиями. Все три экструдированных образца имели низкий коэффициент  $R_{(1047/1022)}$ . Под воздействием высоких температур и сил трения водородные связи в крахмале, вероятно, были разрушены, что привело к образованию неупорядоченной

структурь в кристаллической области. Cervantes-Ramirez и соавт. также сообщали, что процесс экструзии разрушает морфологический статус и внутреннюю кристаллическую структуру крахмальных гранул, а также влияет на свойства желатинизации.

После экструзии химический состав и степень желатинизации зерна изменяются. Под действием тепловой обработки и при последующем высушивании содержание сухого вещества в экструдате становится выше, чем в неэкструдированном зерне. Уменьшается уровень липидов, что может быть следствием образования тандема амилозалипиды или соединения липидов с другими веществами, что снижает их растворимость и видимое содержание. Другим возможным объяснением может быть то, что материал испытывает сильное трение внутри цилиндра экструдера и высокое давление в формующей головке, что приводит к отделению липидов от материала.

Крахмал состоит из двух полисахаридов — амилозы и амилопектина. Амилоза — линейный полисахарид с  $\alpha$ -1-4-гликозидными связями, в то время как молекулы амилопектина более крупные, имеют разветвленное строение и содержат как  $\alpha$ -1-4-, так и  $\alpha$ -1-6-гликозидные связи. В сыром крахмале уровень амилопектина выше, чем амилозы: на него приходится 70–80% сухой массы крахмала. Поскольку соотношение амилозы/амилопектин варьируется, оно является важной характеристикой крахмала и может влиять на его способность к набуханию и перевариванию. Согласно результатам данного эксперимента содержание амилозы в крахмале увеличилось во всех трех видах сырья после экструзионной обработки, в то время как амилопектина стало меньше, что значительно повысило соотношение амилоза/амилопектин. Аналогичные результаты были получены Liu и соавт., которые показали, что количество амилозы в крахмале кукурузного экструдата по сравнению с исходным сырьем увеличилось на 37,52% и 29,37%, соответственно. Это происходит из-за разрыва гликозидных связей во время экструзии и разрушения молекул крахмала. Амилоза характеризуется минимальным разветвлением длинных цепей, поэтому при интенсивном воздействии трения она в меньшей степени разрушается по сравнению с амилопектином. Кроме того, из-за большего размера молекул амилопектина и большей восприимчивости  $\alpha$ -1,6-гликозидных связей к разрыву по сравнению с  $\alpha$ -1,4-гликозидными связями амилозы многочисленные точки разветвления легко разрушаются во время экструзии, образуя компоненты амилозы.

Желатинизация — это процесс, в ходе которого сырой крахмал превращается в готовую, легко перевариваемую форму под воздействием воды и тепла. После экструзии степень желатинизации всех изучаемых злаков увеличилась. Взаимодействие тепла, влаги и механического трения обусловило быстрое превращение молекул крахмала из твердого состояния в расплавленное. Нарушение внутримолекулярных и межмолекулярных водородных связей

привело к трансформации молекул крахмала из нативного состояния в желатинизированную форму. Wang и соавт. установили, что желатинизация крахмала сопровождается разрушением кристаллической структуры и деструкцией двойных спиралей амилопектина, что согласуется с указанными выше результатами.

Крахмал расщепляется с выделением глюкозы, которая регулирует выработку инсулина в организме. Этот процесс играет важную роль в регулировании усвоения питательных веществ и общих метаболических функций. С целью определения основных свойств шести образцов злаков, влияющих на пищеварение, мы провели опыты *in vitro*. Результаты показали, что ранжирование незэкструдированных образцов по их суммарному крахмалу согласуется с более ранними данными. Исследования показывают, что эффективность воздействия амилазы на гранулы крахмала зависит от внутреннего строения, включая содержание амилозы и амилопектина, строение поверхности (например, наличие пор), и от типа кристаллической структуры. В отличие от пшеницы и дробленого риса кукуруза имеет высокое содержание амилозы и демонстрирует более низкую скорость и степень переваривания. Поскольку у полимеров амилозы меньшая площадь поверхности и более высокая степень внутримолекулярной водородной связи, чем у амилопектина, они могут образовывать комплексы с поверхностно-активными веществами. Кроме того, экструзия значительно повышает переваримость крахмала зерновых культур. Chien и соавт. установили, что экструдированные дробленый рис и кукуруза имели начальную скорость гидролиза выше как минимум в 29; 6,2 и 16,9 раза, соответственно, чем незэкструдированные. Аналогичным образом эксперименты *in vivo* на свиньях показали, что экструзия повышает иlleальную переваримость кукурузного крахмала на 0,15–0,98 ед.

Kemper и соавт. отметили, что кривая абсолютного высвобождения крахмала с течением времени в большей степени соответствует появлению порталной глюкозы *in vivo*. Повышенное пиковое содержание глюкозы, наблюдаемое при потреблении быстроусвояемого крахмала, совпало с повышением уровня инсулина в воротной вене. В целом экструзия улучшила скорость переваривания и усвоемость крахмала, что согласуется с ранее предложенной микроструктурой и результатами ИК-Фурье-анализа.

Li и Hu утверждают, что в механизме переваривания быстро перевариваемого и медленно перевариваемого крахмала существуют параллельные и последовательные паттерны, которые начинаются не одновременно. На ранней стадии переваривания фермент направную взаимодействует с внешним слоем крахмальных зерен, что приводит к возникновению быстрой химической реакции, в то время как между ферментом и внутренней областью происходит лишь частичный контакт, что в последующем замедляет скорость переваривания. Результаты нашего исследования показали значительное увеличение содержания RDS

в экструдированных образцах, в то время как содержание SDS и RS значительно снизилось. Это согласуется с данными, полученными Lai и соавт. Экструзия вызывает разлом крахмальных гранул, что делает их более доступными для фермента и активизирует гидролиз, обнажая внутренние области, которые более подвержены ферментативному воздействию. В итоге медленно перевариваемый и резистентный крахмал превращается в быстро перевариваемый, что ускоряет высвобождение глюкозы. Как показали исследования, быстрое переваривание RDS в тонком отделе кишечника вызывает резкое повышение концентрации инсулина и уровня глюкозы в крови после приема пищи. Медленно перевариваемый крахмал постепенно и тщательно расщепляется в тонком отделе кишечника. В отличие от него резистентный крахмал остается непереваренным в верхних отделах ЖКТ, а ферментируется микробиотой в толстой кишке, в результате чего образуются короткоцепочечные жирные кислоты, положительно влияющие на здоровье кишечника. Потребление рационов с высоким содержанием RS снижает скорость всасывания глюкозы, уменьшает выброс инсулина и увеличивает выработку короткоцепочечных жирных кислот. Однако такие рационы могут способствовать снижению переваримости крахмала и эффективности корма.

Широкое распространение получило применение кинетической модели для точного моделирования измерений ферментативного распада крахмала с течением времени.  $C_0$  — это переваримость крахмала в тонком отделе кишечника в момент времени 0 мин и конечная переваримость крахмала в желудке. Установлено, что этот показатель в экструдированных образцах был значительно выше, чем в исходных. Это свидетельствует о том, что использование экструдированных зерновых ускоряет их переваривание в момент нахождения в желудке. Скорость высвобождения глюкозы определяется значением  $k$ : чем оно выше, тем быстрее при переваривании достигается потенциальная максимальная усвояемость. В исследовании значения  $k$  для экструдированных зерновых культур были выше, чем для незэкструдированных. Это говорит о том, что процесс экструзии значительно повышает скорость переваривания крахмала. Аналогичные результаты были получены AlRabadi с соавт.: значение  $k$  для крахмала из сорго после экструзии было выше по сравнению с необработанным крахмалом. Исследования показали, что увеличение скорости переваривания крахмала может уменьшить количество непереваренного корма в конце тонкого кишечника или проксимальной половине толстой кишки, тем самым влияя на потребление корма за счет обхода механизма, известного как подвздошный тормоз.

Хотя кинетика ферментативного гидролиза свидетельствует о том, что злаки после экструзии обладают большей переваримостью по сравнению с исходной формой, исследование Chavez-Salazar и соавт. продемонстрировало, что повышенная скорость ферментативного гидролиза при-

водит к ускорению метаболизма и повышению постпрандиального гликемического ответа. Поэтому для оценки прогнозируемого гликемического индекса злаков после экструзии мы использовали уравнение, разработанное Giuberti и соавт. Goñi и соавт. отмечают: продукт со значением pGI выше 70 определяется как продукт с высоким гликемическим индексом, со значением от 55 до 69 — со средним, а ниже 55 — с низким. После экструзии зерновые, которые ранее классифицировались как продукты со средним гликемическим индексом, были переведены в категорию продуктов с высоким гликемическим индексом. После экструзии на долю быстро перевариваемого в тонком кишечнике крахмала приходится значительная часть крахмала, содержащегося в зерне (89,17–89,91%). Высвобождающаяся глюкоза используется для обеспечения энергией верхних отделов тонкого кишечника, а оставшаяся часть всасывается в кровь, вследствие чего быстро увеличивается гликемический ответ. Очевидно, что резистентный крахмал сокращает количество глюкозы, всасываемой в тонком кишечнике, и при этом, соответственно, наблюдается низкий гликемический индекс, в результате изменяется энергетический метаболизм хозяина с глюкозы на короткоцепочечные жирные кислоты (КЦЖК). Кроме того, продуктивность и здоровье животных, по-видимому, сильно коррелируют с показателями pGI кормов. Например, Melenou и соавт. обнаружили, что зерновые культуры с высоким pGI улучшают инсулиновый ответ, это приводит к быстрому очищению крови от глюкозы и возвращению состояния голода, а следовательно, к увеличению потребления корма. Кроме того, было отмечено, что рацион с низким pGI может способствовать снижению среднесуточных приростов и живой массы у растущих свиней, уменьшению энергии, сохранности белка, по сравнению с рационом с высоким pGI. Из-за ограниченной способности поросят переваривать сырой крахмал необходимо в их кормлении использовать легкоусвояемые корма на зерновой основе.

Рисунок 4 иллюстрирует тепловую карту и коэффициенты корреляции Пирсона для различных фракций крахмала в зерне, pGI и физико-химических характеристик. Значительная отрицательная корреляция наблюдалась между степенью желатинизации (DG) и  $R_{(1047/1022)}$ , что говорит об отрицательном влиянии степени желатинизации на короткозамкнутые упорядоченные структуры крахмала (кристаллиты). Это согласуется с данными предыдущих исследований: экструзия с более высоким коэффициентом трения разрушала структуру крахмала, что приводило к появлению аморфных участков и увеличению весового распределения молекул по размерам. Также выявлена

положительная корреляция между DG и pGI, что свидетельствует о заметном влиянии желатинизированного компонента злаков на уровень глюкозы в крови. Обратная зависимость pGI от  $R_{(1047/1022)}$  указывает на то, что кристаллическая структура крахмала значительно затрудняет его переваривание. Отрицательные корреляции были обнаружены между показателем pGI и коэффициентом k, медленно перевариваемым и резистентным крахмалом, а значимые положительные корреляции — с быстро перевариваемым. Этот результат согласуется с тем, что пищеварительные фракции RSD увеличивают скорость ферментативного гидролиза. Вероятно, это коррелирует с результатом расчета pGI, который неизбежно связан с измерением фракций крахмала. Из-за устойчивости к действию ферментов в ряде исследований также была выявлена отрицательная корреляция между содержанием амилозы и переваримостью крахмала. Однако зависимость переваримости крахмала от содержания амилозы в данном эксперименте относительно мала по сравнению со значениями DG, RSD и коэффициентом k. Вероятно, это связано с разрушением кристаллической структуры крахмала.

Для обеспечения точности результатов эксперимента неэкструдированные и экструдированные кукуруза, пшеница и дробленый рис были закуплены на крупных предприятиях Китая. То есть поставщики были одними и теми же, что обеспечивает большую репрезентативность образцов. Используя для экструзии один и тот же источник, можно минимизировать влияние на результаты эксперимента таких факторов, как сорт и происхождение злаков. Однако на результаты могут оказывать также влияние сроки их хранения, что требует дальнейшего изучения.

## ВЫВОДЫ

Экструзия нарушает целостность частиц зерна, в результате чего они принимают форму крупных хлопьев с шероховатой поверхностью и рыхлой текстурой, при этом увеличивается желатинизация крахмала и уменьшается структура с малой степенью упорядоченности [ $R_{(1047/1022)}$ ], что способствует лучшему перевариванию за счет увеличения доли быстро перевариваемого крахмала. После экструзии крахмал всех трех видов зерна максимально усваивался почти через 15 мин после переваривания в тонком отделе кишечника, в то время как неэкструдированным зерновым культурам для этого требуется не менее 120 мин. Эти результаты дают ценные сведения для оптимизации технологии экструзии зерна и научного обоснования применения экструдированных зерновых в кормлении животных и птицы. ■

Перевод: Елена Четверова, компания ALB Group