

# ВЛИЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА МОДИФИКАЦИЮ КРАХМАЛА И КАЧЕСТВО ГРАНУЛ

**М. ЛИНДЕНБЕК**, д-р наук, фирма «Амандус Каль», Германия

Наряду с выбором сырья существенное влияние на качество гранул комбикорма оказывает технологическая обработка. Она начинается с измельчения продукта, продолжается при его кондиционировании (с добавлением пара и при необходимости — под давлением, с учетом фактора времени) вплоть до гранулирования и последующего охлаждения. Все параметры здесь взаимосвязаны и напрямую влияют на качество гранул. Наибольшее влияние оказывает рецептура (химический состав и свойства сырьевых компонентов, их соотношение) — около 40%. Далее с равной долей идут гранулометрический состав продукта и кондиционирование паром — по 20%. От спецификации матрицы зависит 15%, от охлаждения и сушки — 5%.

Рассмотрим подробнее эти факторы.

**Сырье/Крахмал.** Модификация крахмала представляет одну из возможностей повышения качества комбикорма. Содержание крахмала, как и белка, жира и клетчатки, является значимым фактором, влияющим на питательность комбикорма. Повысить его кормовую ценность возможно путем улучшения переваримости крахмала (из-за высокого содержания амилопектина практически не растворим в холодной воде). Это достигается не только при использовании компонентов с высокой степенью расщепления крахмала, но и при различной технологической обработке сырья и продукции.

**Гранулометрический состав.** Для развития системы пищеварения, роста и продуктивности животных большое значение имеет корм, содержащий грубые частицы. Чтобы избежать потери питательной ценности, важно производить более твердые гранулы или структурированный комбикорм с минимальной долей тонкой фракции. В кормовых смесях предпочтение отдается гомогенному гранулометрическому составу оптимальной структуры, что позволяет решить проблему расслоения (рис. 1). Измельчение зерновых компонентов сказывается на модификации содержащегося в них крахмала, способствует большей его доступности для расщепления ферментами.

Изменение структуры зерна за счет механической и гидротермической обработки заметно на молекулярном уровне — размер крахмальных зерен увеличивается, амилопектин и амилоза расщепляются. При этом вода и пар лучше удерживаются на поверхности крахмальных зерен и проникают внутрь, а также эффективнее воздействует на них температура. Процесс желатинизации тем самым ускоряется, влага равномерно омывает поверхность сырого крахмала, что ведет к сокращению времени гидратации. Клейстеризация повышает скорость, с которой амилаза может раз-



*Рис. 1. Гомогенная структура зерен пшеницы и кукурузы при тонком размоле на вальцовой дробилке (размер частиц 0,75 мм)*

рывать соединения молекул крахмала и превращать их в более простые и растворимые углеводы, включая глюкозу.

При испытаниях на опытной установке KANL степень измельчения (d50) до частиц размером 2,0 мм по сравнению с 0,75 мм для пшеницы и кукурузы с последующим кондиционированием продемонстрировала лучшие результаты (рис. 2). Регрессионные анализы (SPSS) 98 проб частичных испытаний, в которых проверялась степень измельчения и ее влияние на модификацию крахмала, показали повышение расщепляемости крахмала на 2,9% при увеличенном на 1 мм размере частиц (Stiller, 2016). На рисунке 3 — принцип измельчения на вальцах, обеспечивающих однородный гранулометрический состав продукта, и двухступенчатая вальцовая дробилка KANL. На рисунках 4 и 6 приведены диаграммы, показывающие, как изменяется гранулометрический состав в зависимости от типа измельчения — в вальцовой или в молотковой дробилке.



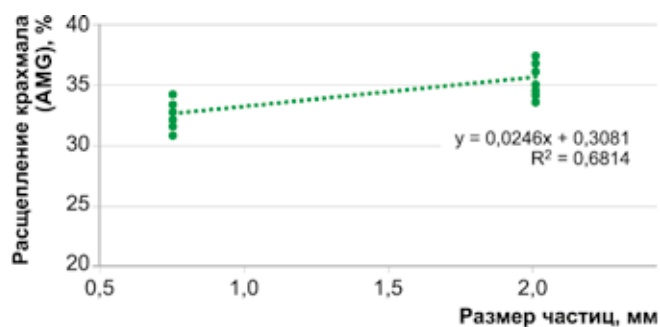


Рис. 2. Влияние размера частиц ( $d_{50}$ ) на модификацию крахмала кукурузы при температуре  $70^{\circ}\text{C}$  и влажности около  $18\%$

**Кондиционирование**, воздействие тепла и влаги на продукт достигается путем добавки воды и насыщенного пара. Под действием влаги и температуры сырой крахмал клейстеризуется, что обеспечивает оптимальное состояние интрапартикулярной структуры матрицы крахмала и, соответственно, высокую степень его расщепления (модификации). При этом повышается эффективность работы машин на следующих этапах обработки. В испытаниях по кондиционированию на опытной установке КАНЛ регрессионные анализы показали (рис. 5), что при увеличении влажности на  $1\%$  повышается модификация крахмала на  $2,8\%$  (Stiller, 2016).

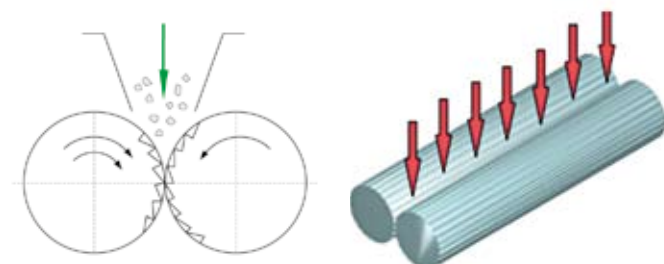
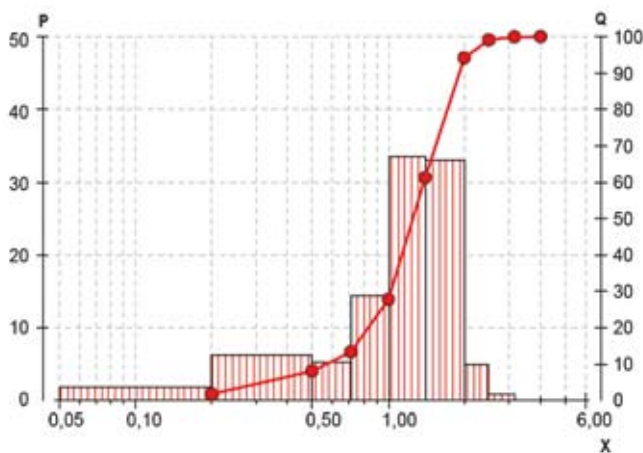


Рис. 3. Принцип измельчения на вальцах дробилки для гомогенного гранулометрического состава и двухступенчатая вальцовая дробилка

Неравномерное гидротермическое воздействие, обусловленное негетогенной структурой после измельчения (рис. 6), ухудшает питательные свойства продукта, что отрицательно сказывается на здоровье и продуктивности животных. Так, при более высокой температуре и отсутствии равномерного увлажнения усиливается реакция Майярда, что ведет к потерям аминокислот в присутствии редуцирующих сахаров. Отрицательное воздействие оказывают также поверхностно-активные вещества, как это описано у Hasenhuettl и Hartel (2008). При желатинизации они образуют с молекулами крахмала комплексы из эмульгаторов, поверхность становится липофильной, что делает проникновение влаги в крахмальное зерно невозможным, ухудшая тем самым модификацию крахмала. Такое ухудшение не компенсируется и при более длительной выдержке. Это показывают приведенные на рисунке 7 результаты обработки кукурузы при различном времени пребывания в кондиционере (Stiller, 2016). В соответствии с результатами исследований Goh (2016) делает вывод, что максимальное необходимое время кондиционирования составляет

Гранулометрический класс, мм	P, %	Q, %	Параметры	
			Q, %	X, мм
< 0,200	1,7	1,7		
0,200–0,500	6,3	8,0		
0,500–0,710	5,3	13,3		
0,710–1,000	14,4	27,8		
1,000–1,400	33,5	61,2		
1,400–2,000	33,0	94,2		
2,000–2,500	5,0	99,1		
2,500–3,150	0,8	99,9		
3,150–4,000	0,1	100,0		
> 4,000	0,0	100,0		



X – размер частиц после измельчения, мм  
P – количество частиц определенного размера, %  
Q – общее количество частиц, %

Рис. 4. Гранулометрический состав при измельчении кукурузы в вальцовой дробилке ( $d_{50}$ ) до частиц размером  $1,3\text{ мм}$  для достижения гомогенной структуры

60–70 с; исходная влажность должна быть 18%. И здесь начинается конфликт между параметрами, необходимыми для оптимальной производительности пресс-гранулятора,

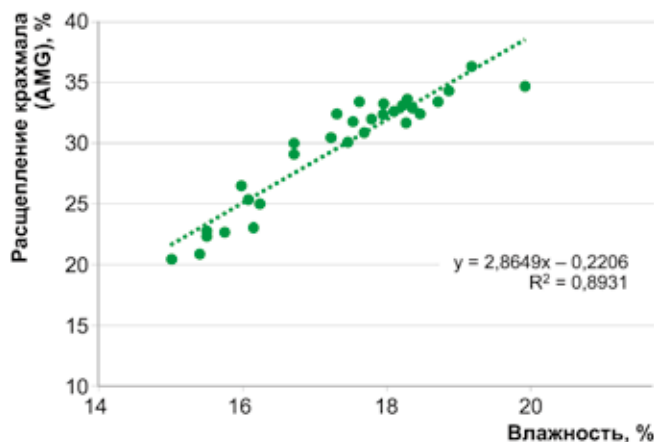
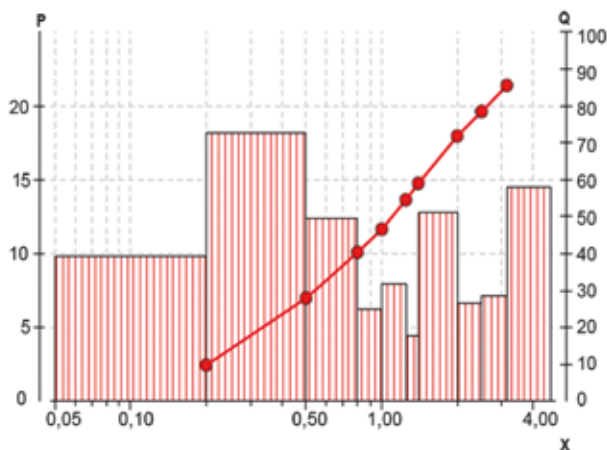


Рис. 5. Идеальное влияние влажности на модификацию крахмала при одинаковой температуре и одинаковых размерах частиц

Гранулометрический класс, мм	P, %	Q, %
< 0,200	9,8	9,8
0,200–0,500	18,2	28,0
0,500–0,800	12,4	40,4
0,800–1,000	6,2	46,6
1,000–1,250	7,9	54,5
1,250–1,400	4,5	59,0
1,400–2,000	12,8	71,8
2,000–2,500	6,6	78,4
2,500–3,150	7,1	85,5
> 3,150	14,5	100,0

Параметры	
Q, %	X, мм
10,0	0,203
50,0	1,107
90,0	3,637



X – размер частиц после измельчения, мм  
P – количество частиц определенного размера, %  
Q – общее количество частиц, %

Рис. 6. Негомогенный гранулометрический состав при измельчении кукурузы в молотковой дробилке

и оптимальной обработкой продукта (влажность в диапазоне от 14% до 17%). В то время как для экспандера эта максимальная влажность не представляет проблемы, то для пресс-гранулятора — представляет: он становится не работоспособным. Питательная ценность сырьевых компонентов лимитируется незначительной влажностью, а также снижается из-за плохого качества гранул, получаемых при гранулировании и последующем охлаждении/сушке.

Для эффективного изменения структуры сырого крахмала в кондиционере (рис. 8) должно иметься достаточное количество влаги из конденсируемого пара. При необходимости количество влаги можно повысить путем прямого добавления воды. Желатинизация и декстринизация — это, как правило, результат воздействия целой комбинации: влаги, тепла, механической энергии и давления. Конфигурация процесса ввода пара и жидкости, регулировки давления, возможности регулировки частоты вращения вала, количества лопастей и угла их установки оптимизирована для кондиционеров. В паровом кондиционере, работающем при атмосферном давлении, происходит желатинизация, в то время как в экспандере за счет обработки под давлением достигается желаемая декстринизация крахмала. Необходимо учитывать, что температура клейстеризации варьируется в зависимости от типа крахмала в различных

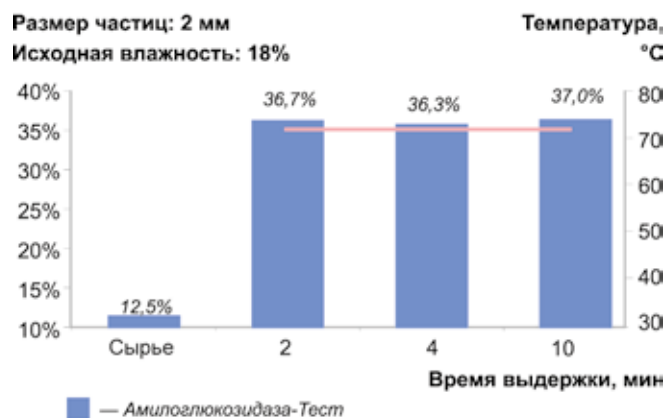


Рис. 7. Влияние времени обработки на модификацию крахмала кукурузы



Рис. 8. Конструкция кондиционера

культурах. Простая модификация крахмала делится на четыре фазы, как это представлено на рисунке 9.

**Фаза I:** У гидрофобных стенок клетки продукта холодная вода взаимодействует с поверхностью частиц сырого крахмала. Амилоза и амилопектин неспособны набухать в холодной воде (см. соответствующий рисунок).

**Фаза II:** За счет добавления теплой воды/влаги амилоза и амилопектин приобретают способность пропускать воду, то есть становятся гидрофильными. Вода задерживается на поверхности частиц крахмала, и начинается его набухание.

**Фаза III:** Под действием тепла крахмал способен связать большое количество воды. Благодаря разрыву связей зерен крахмала процесс впитывания воды и набухания идет интенсивнее. При более длительном воздействии температуры зерна крахмала переходят в раствор и клейстеризуются.

**Фаза IV:** Сдвиг и трение усиливают действие температуры, при этом соединяющие мостки молекул воды растворяются, зерна крахмала продолжают набухать и образуют клейстер. Возникает положительное соотношение между возрастающей температурой и поглощением воды крахмалом. Амилоза в этом процессе проявляет сильно выраженную способность к набуханию. Сырой крахмал зерновых может достигать десятикратного увеличения собственного веса за счет абсорбции воды.

## ЭКСПАНДЕР

Наиболее интенсивным видом обработки является экспандирование, или так называемое кондиционирование под давлением. Это оптимальный способ кондиционирования для комбикормов и отдельных компонентов. Экспандер состоит из толстостенного корпуса смесительной трубы (рис. 10) и вала с односторонней подшипниковой опорой (снабжен дозирующими, смешивающими и замешивающими рабочими элементами). Гидравлически регулируемый конус образует с выходным отверстием трубы кольцевой зазор. Максимальное давление составляет около 40 бар, рабочая температура на головке экспандера, как правило, — от 90 до 140°C, что зависит от удельной энергии и цели применения продукта. На выходе из экспандера давление резко падает до атмосферного. Материал экспандируется (расширяется), и часть добав-

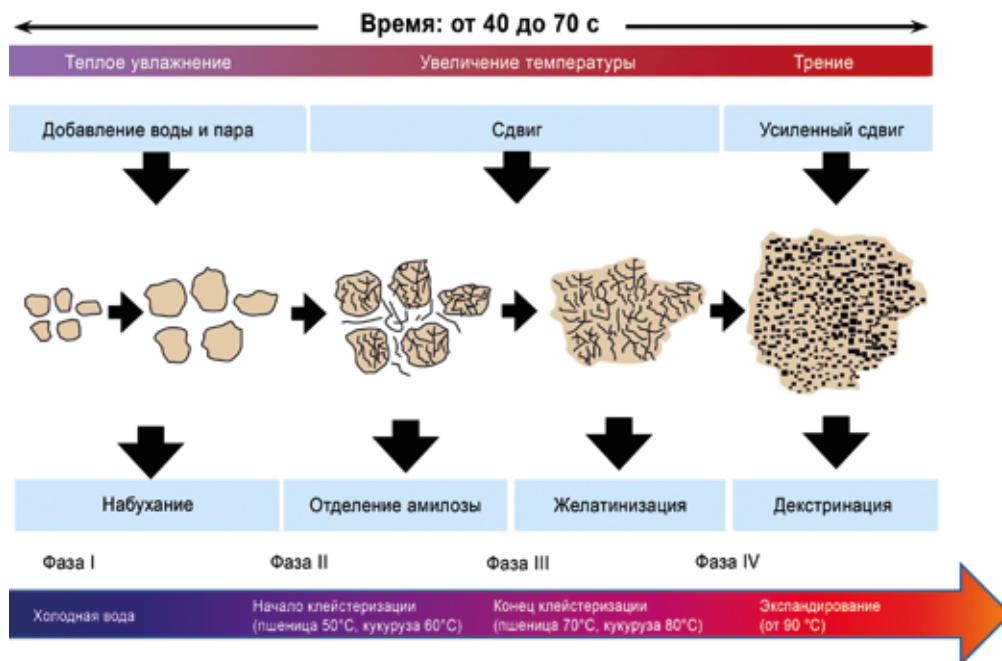


Рис. 9. Процесс модификации крахмала (по данным Goh, 2016)



Рис. 10. Конструкция и функция экспандера

ленной воды испаряется (достигается Flash-Effekt/экспансия). При этом структура составляющих растительных компонентов сильно преобразуется (разрушаются), возникает агломерация питательных веществ. Процесс модификации крахмала осуществляется в течение нескольких секунд (рис. 11).

Дополнительная сушка экспандата не требуется, хотя в предварительном кондиционере и экспандере можно проводить обработку материала с повышенной влажностью. За счет регулировки зазора конуса экспандерной головки во время работы можно плавно, без задержки регулировать давление, интенсивность усилий замеса, нагрев продукта и внесение энергии. Благодаря этому можно оперативно реагировать на колебания сырья и изменение рецептур. Применение экспандера позволяет стабилизировать работу пресс-гранулятора и увеличить его производительность. В этом случае гранулятор, по сути, лишь придает форму продукту, поскольку экспандер уже активировал способность продукта к связыванию. Соответственно,

менее важным становится выбор матрицы для обеспечения качества гранул. Гибкость процесса гранулирования возрастает, поскольку существенно сокращается продолжительность прессования благодаря предварительному уплотнению материала в экспандере. На одной матрице (без замены) можно выпускать больше кормов. Твердость гранул регулируется изменением вносимой механической энергии. Эффективно могут обрабатываться кормовые смеси, комбикорм с меньшей степенью измельчения. Тем самым учитываются необходимые преимущества структуры корма для правильного питания животных. Улучшение индекса твердости гранул (PDI = Pellet-Härte-Index) было подтверждено на практике. По данным Muramatsu и др. (2013), это улучшение PDI за счет процесса экспансии составляло 26–31% при увеличении добавки влаги на 2,1% и насыпного веса с 817 до 901 г/кг.

К другим преимуществам обработки в экспандере, помимо улучшения качества гранул, относятся: возможность использования тяжело поддающихся обработке компонентов, ввод большего количества жидкости, инактивация вредных веществ, гибель сальмонелл, улучшение переваримости корма. Снижение производственных затрат обусловлено экономичностью способа. При гранулировании сразу после экспандирования существенно снижается удельный расход электроэнергии, а в сумме экспандер и пресс-гранулятор расходуют ее чуть больше, чем только при гранулировании.

**Итак.** Термический и гидротермический способы дают в комбинации с механической нагрузкой на продукт, измельчением, смешиванием, кондиционированием и гранулированием различные результаты относительно модификации крахмала и качества гранул. Вид зерна, его состояние и происхождение оказывают влияние на результат, что должно учитываться в технологических шагах. Существенное увеличение модификации крахмала за счет гидротермической обработки необходимо анализировать с точки зрения кормовой ценности при каждом способе обработки, начиная от помола и до получения готового продукта, а также при сопоставлении связанных с этим затрат. Время и температура кондиционирования должны контролироваться для бережной обработки продукта. При этом эффективное решение — обработка в экспандере, благодаря которой можно сократить время кондиционирования. В экспандере происходит кратковременное, в течение одной-двух секунд, повышение температуры до 90°C (время пребывания около пяти секунд складывается из затрат времени на регулировку давления и температуры экспандирования). Благодаря комбинированию физических параметров — давления, температуры и влажности — питательные вещества лучше сохраняются, повышается их переваримость и усвояемость. При этом эффективно сокращается число патогенных бактерий, тем самым улучшается здоровье животных. Увеличивается производительность пресса и повышается качество гранул.

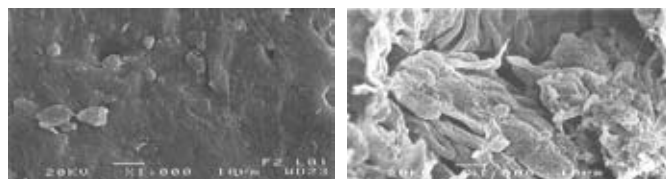


Рис. 11. Поверхность частиц крахмала в необработанном виде (слева) и после Flash-Effekt /экспансии (справа)

Существенным фактором, наряду с температурой, является влага. С точки зрения физики она выполняет функцию растворителя в комбикормах и других биологических материалах. Влага обеспечивает набухание и клейстеризацию зерен крахмала. А чтобы добиться эффективной варки сырого крахмала и его гидролиза, необходимо подобрать подходящие параметры пара и влаги в зависимости от самых различных типов крахмала.

Модификация крахмала способствует улучшению его усвоения, что особенно важно для молодняка животных, например для поросят, у которых собственная система ферментов еще недостаточно выражена. Для животных с короткой системой пищеварения, таких как кошки, собаки, а также рыбы, крахмал при его модификации может служить источником энергии. Поскольку КРС и лошади физиологически не все виды крахмала могут оптимально перерабатывать, то и здесь модификация крахмала имеет свои преимущества. У свиней и птицы более эффективно усваивается крахмал и другие питательные вещества корма, что способствует сокращению их потерь с экскрементами. Благодаря этому лучше используется организмом обменная энергия при одновременном ускорении процессов пищеварения. Это создает предпосылки для оптимизации рецептур. Гидротермическая модификация крахмала в современном питании животных незаменима. Технические и экономические инвестиции оправдывают себя при целенаправленном применении, зависящем от вида продукта.

#### Литература

1. Goh (2016): Role of proper steam conditioning — feed pelleting efficiency & feeding value. Asian Feed Magazine, Edition January/ March
2. Hasenhuettl и Hartel (2008): Food emulsifiers and their applications. Springer Verlag
3. Muramatsu et al. (2013): Impact of Particle Size, Thermal Processing, Fat Inclusion and Moisture Addition on Pellet Quality and protein Solubility of Broiler Feeds. Journal of Agricultural Science and Technology A 3, 1017–1028
4. Stiller (2016): Abhängigkeit des Stärkeaufschlusses von Verweilzeit, Temperatur und Feuchte sowie Partikelgröße des Getreides. Bachelorarbeit an der Lebenswissenschaftlichen Fakultät, Humboldt-Universität zu Berlin и der Fachgruppe Futtermittel и Futtermittelzusatzstoffe, Abteilung Sicherheit in der Nahrungskette, Bundesinstitut für Risikobewertung, Berlin. ■