

Контролируемые функциональные свойства муки

Влияние различных способов помола на структурные изменения крахмала и, как следствие, на технологические свойства теста.

+ Для приготовления хлебобулочных изделий необходимо выбирать муку с требуемыми функциональными свойствами. При этом большое значение имеет содержание белка, активность ферментов, водопоглощающая способность, способность к клейстеризации и повреждение крахмала (далее будем называть это явление модификацией крахмала).

Требования к функциональным свойствам муки существенно различаются в зависимости от того, где мука применяется. Для приготовления хлебобулочных изделий используется мука с низкой степенью модификации крахмала и высоким содержанием белка. Если же мука используется в качестве связующего средства, то она, напротив, должна обладать хорошими свойствами набухания в холодной воде. Поэтому важность тех или иных технологических свойств муки определяется областью ее применения. В зависимости от того, для какой цели используется мука, требования к свойствам варьируются и определяют способ приготовления теста и свойства готовой продукции, например, удельный объем выпечки. В процессе выпекания биополимеры из крахмала – амилоза и амилопектин – связывают воду в тесте. Благодаря этому структура может изменяться, переходя из жидкой пены или эмульсии (структура теста) в плотную пену с открытыми ячейками (структура мякиша). Образование воздушной структуры мякиша в наибольшей степени зависит от гидратационных свойств крахмала; от того, какое количество воды может связать крахмал, и как быстро происходит связывание воды.

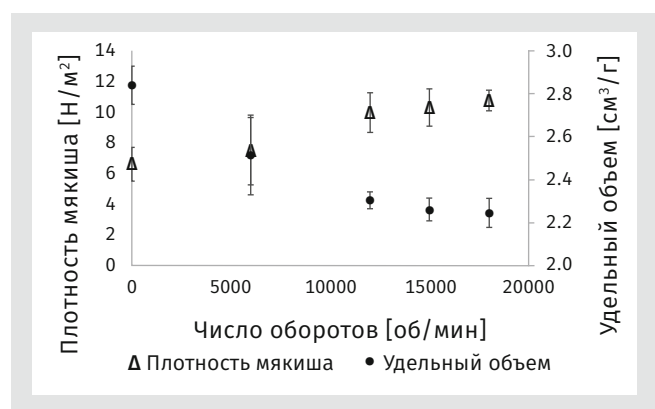
Модификация муки с целью получения определенных свойств

В результате модификации структуры крахмала можно получить муку с новыми свойствами, например, с улучшенной способностью связывать воду и повышенной растворимостью, позволяющей получать определенную структуру в холодной воде. Модификация крахмала может улучшить текстуру выпечки и снизить рекристаллизацию систем на основе крахмала. Сниженная способность крахмала к рекристаллизации замедляет процесс затвердевания мякиша в выпечке при хранении и, таким образом, способствует более длительному сохранению свежести. Существует множество химических и механических способов модификации функциональных свойств муки и, соответственно, возможностей изменять свойства теста и готовых изделий. Однако стоит отметить, что если производитель прибегает к химической модификации крахмала и/или фракций белка, он обязан заявить об этом, в связи с чем возрастает потребность в разработке

Исследовательский проект научно-исследовательского центра пищевой промышленности (сокр. FEI)

Статья основана на результатах, полученных в рамках Программы совместных промышленных исследований (AiF 18679 N). Указанная выше Программа совместных промышленных исследований научно-исследовательского центра пищевой промышленности (Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI)), Годесбергер Аллее 142-148, 53185 Бонн, получила поддержку через Альянс промышленности и науки (AiF) в рамках программы содействия совместным промышленным исследованиям (IGF) Федерального министерства экономики и энергетики Германии по решению немецкого Бундестага.

методов модификации, не подлежащих декларированию. Все чаще применяется механическая модификация крахмала с применением мельниц непосредственно во время помола зерна или в виде дополнительного помола муки после основного. Способ и масштаб структурных изменений при этом зависит от мельницы и параметров помола. То есть, одно и то же зерно, но помолотое разными способами, обладает разной способностью связывать воду и другими функциональными свойствами. Следовательно, можно настроить процесс переработки в соответствии с требованиями к продукции. Тем не менее, до сих пор применение механически модифицированной муки оказывает преимущественно негативное влияние на качество готовых изделий, как показано на рис. 1.



+++ рисунок 1: Твердость мякиша и удельный объем формового белого хлеба при изменении числа оборотов в ультрацентрифуге, предназначенной для дополнительной механической модификации пшеничной муки

Чтобы предотвратить негативные последствия для качества готовой продукции, нужно разобраться во взаимосвязях и задать соответствующие параметры модификации.

Основные проблемы управления

Несмотря на множество исследований в этой области, до настоящего времени неясно, какие механические нагрузки влияют на те или иные структуры крахмала и белка, и какое воздействие на функциональные свойства муки оказывает модификация. Это связано с тем, что механические нагрузки на крахмал влекут за собой не только модификацию структуры крахмала (например, поверхности гранул крахмала, кристаллических областей, молекулярной структуры), но и в большинстве случаев множество других разнообразных структурных изменений. Именно поэтому было разработано большое количество методов анализа с целью определения результатов модификации крахмала. Большинство из них не основано на точно определенных структурных параметрах, что затрудняет сравнимость методов. Так как методы анализа не позволяют предсказать последствия модификации крахмала для технологических свойств, невозможно задать «идеальный показатель» механической модификации крахмала, который бы обеспечивал оптимальные хлебопекарные свойства.

Понимание процессов модификации белков и крахмала позволило бы целенаправленно задавать функциональные свойства пшеничной муки, вследствие чего могла бы значительно возрасти экономическая значимость муки, модифицированной механическим способом.

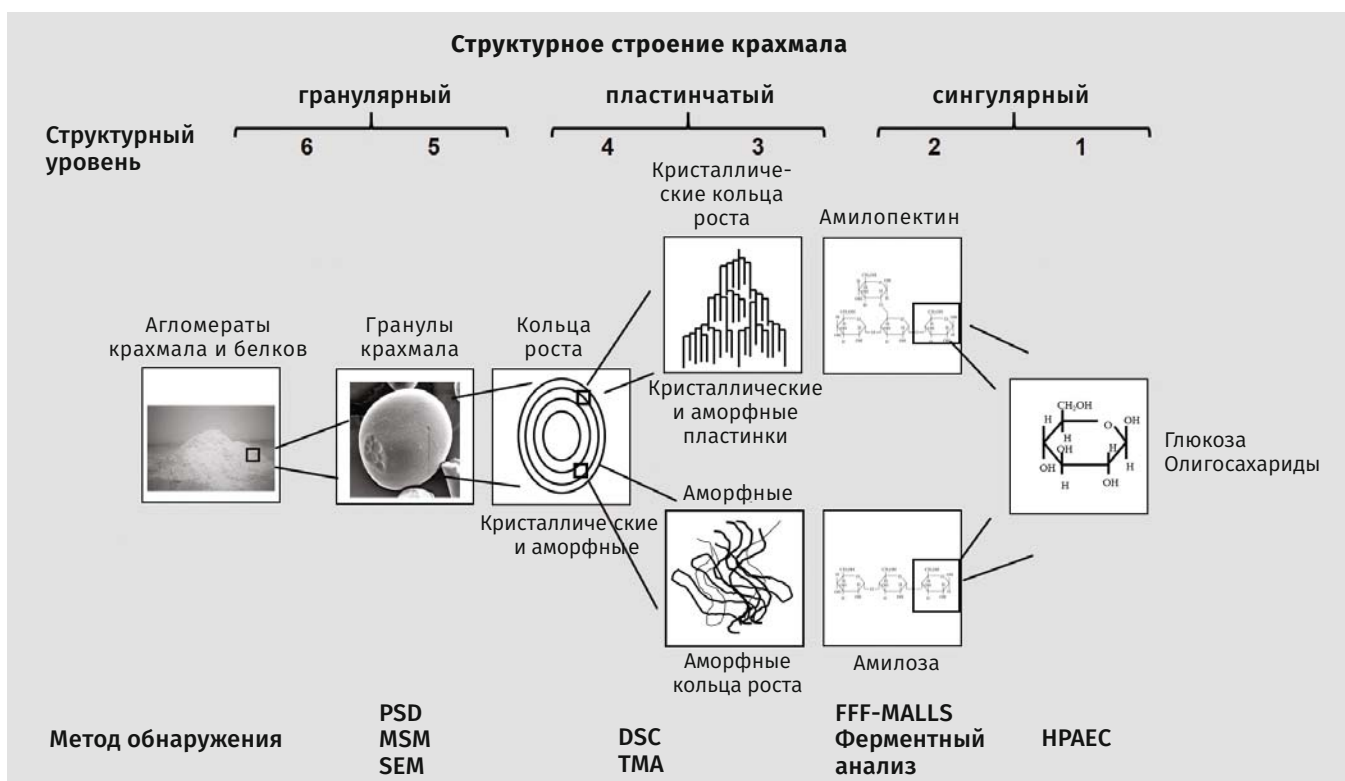
Мельницы – инструменты для механической модификации муки

Путем сравнения мельниц нужно исследовать последствия влияния различных механических нагрузок на структуру муки и ее функциональные свойства. Были выбраны три мельницы, различающиеся по принципу помола: (а) ультрацентрифуга, известная разновидность мельниц ударного действия, (b) криомельница, разновидность шаровых мельниц, в которой модификация протекает в криогенных условиях (-196 °C), (c) обычная мельница, относящаяся к барабанным мельницам. С помощью последней достигается высокая степень модификации крахмала, однако при помоле происходит сильный нагрев, что может повлиять на функциональные свойства белков.

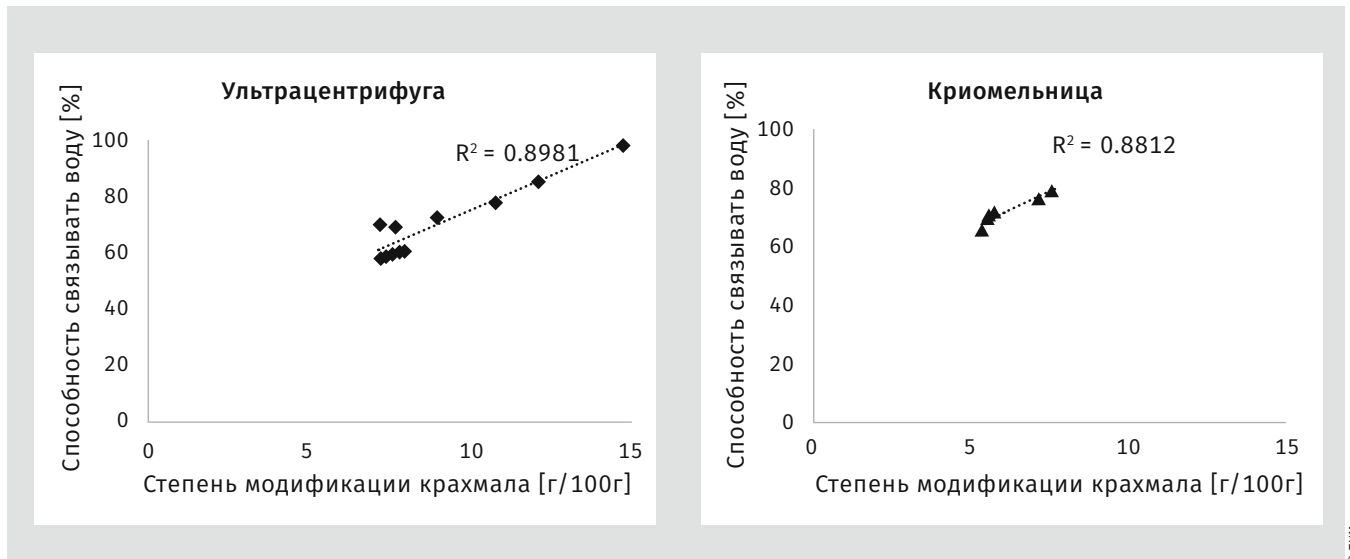
Модификация крахмала от сингулярного до гранулярного уровня

Воздействие механических нагрузок на крахмал может повлечь изменение на всех структурных уровнях (см. рис. 2). Чтобы описать эти изменения в качественном и количественном аспектах, были применены различные методы обнаружения.

На сингулярном уровне модификация пшеничной муки с помощью ультрацентрифуги ведет к увеличению содержания дисахарида мальтозы в модифицированной муке. Образование сахаридов в этом случае можно объяснить механическим расщеплением цепочек крахмала, или повышенной доступностью крахмала для ферментативного расщепления под действием эндогенной β-амилазы. Вследствие повышения температуры в процессе помола



+++ рисунок 2: Структурное строение крахмала



+++ рисунок 3: Зависимость способности связывать воду от степени модификации крахмала, обусловленной ферментами, после модификации в ультрацентрифуге и криомельнице

ферментативные реакции могут протекать в муке даже в сухой среде. Во время ферментации теста образованная мальтоза служит субстратом для размножения дрожжей. Помол в криомельнице, напротив, не вызывал существенного роста мальтозы в муке. Следовательно, измерение содержания мальтозы необходимо для того, чтобы определить содержание ферментируемых сахаров и проанализировать структурные изменения на молекулярных уровнях крахмала. Однако для составления качественного описания ключевых структурных изменений крахмала, происходящих при помолу, и прогнозирования функциональных свойств муки гораздо большее значение имеет определение степени модификации крахмала (другими словами, степени повреждения крахмала).

С целью определения степени модификации наряду с амперометрическим методом с помощью анализатора количества поврежденного крахмала SDmatic часто применяется ферментативный метод обнаружения, в котором используется набор ферментов «*starch damage*» от Megazyme, предназначенный для определения повреждения крахмала. Метод основан на повышенной доступности модифицированной муки, или крахмала, для расщепления амилазами. Чем выше при этом степень расщепления крахмала за определенный отрезок

времени, тем выше степень модификации крахмала. Так как во время брожения нативные и экзогенные ферменты дрожжей расщепляют крахмал на сахараиды, а продукты расщепления, в свою очередь, поставляют дрожжам субстрат для образования CO₂, степень модификации крахмала является важным качественным признаком муки. Кроме того, как для модификации муки в ультрацентрифуге и криомельнице (рис. 3), так и для шаровой мельницы (не представлена на изображениях), выявляется явная корреляция между степенью модификации крахмала и способностью связывать воду.

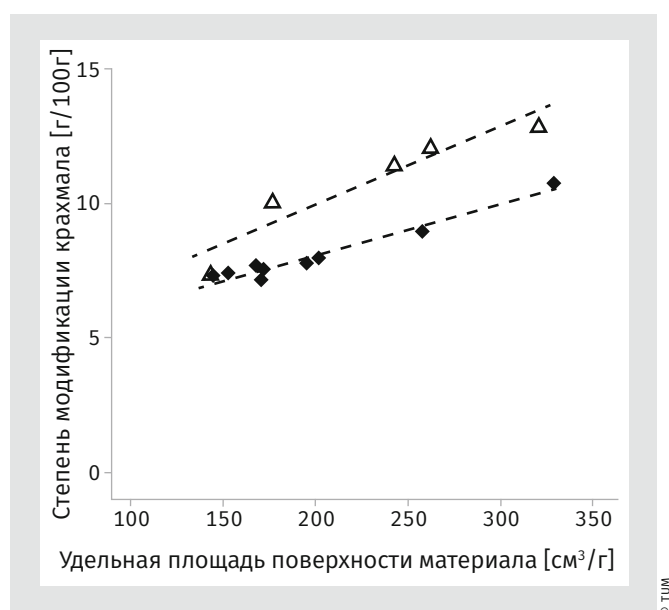
Такая взаимосвязь ожидаема, так как оба метода, способность связывать воду и степень ферментативной модификации крахмала, основаны на доступности образцов для воды, или водной суспензии ферментов.

С помощью методов микроскопического исследования, например, электронной растровой микроскопии (REM) можно выявить различия в способах помола (рис. 4). Отчетливо видны гранулы крахмала, встроенные в структуру белка. Из-за окружающей белковой оболочки проникновение воды и ферментов к тесно окруженным гранулам крахмала затруднено, то есть она препятствует гидратации и гидролизу. Следствием является низкая способность к связыванию воды.



+++ рисунок 4: Снимки контрольных и модифицированных образцов муки, сделанные растровым электронным микроскопом

Дополнительный помол в ультрацентрифуге повлек высвобождение отдельных гранул крахмала из агломератов, причем при более высоком количестве оборотов высвобождалось большее количество гранул, и способность связывать воду повышалась. В отличие от ультрацентрифуги дополнительная модификация в криомельнице привела к более высокой степени фрагментации агломератов, вследствие чего были получены значительно более мелкие частицы муки. Кроме того, криогенная модификация повлекла удаление белковой оболочки вокруг гранул. В результате модификации с применением шаровой мельницы в процессе помола выделялось значительное количество тепла. Интенсивное механическое воздействие вызывало фрагментацию агломератов, что, в свою очередь, приводило к образованию комков. Последнее явление даже привело к увеличению размера частиц. Вновь образовавшиеся агломераты, в отличие от исходных, были менее плотно спрессованы, чем нативные агломераты муки. Вода и ферменты проникали в них легче, чем в исходной муке, вследствие чего способность к связыванию воды в муке, модифицированной в шаровой мельнице, также возрастала. Этот эффект был подтвержден при отслеживании распределения размера частиц (рис. 5). Измельчение частиц муки путем дополнительной модификации в мельницах влечет увеличение удельной площади поверхности материала. При этом очевидно, что при одинаковой удельной площади поверхности материала, например, приблизительно $175 \text{ см}^3/\text{г}$, мука, модифицированная в шаровой мельнице, отличается большей степенью модификации крахмала, чем мука, модифицированная в мельнице ударного действия.



+++ рисунок 5: Зависимость удельной площади поверхности модифицированной муки и степени модификации крахмала в ультрацентрифуге (+) и шаровой мельнице (Δ)

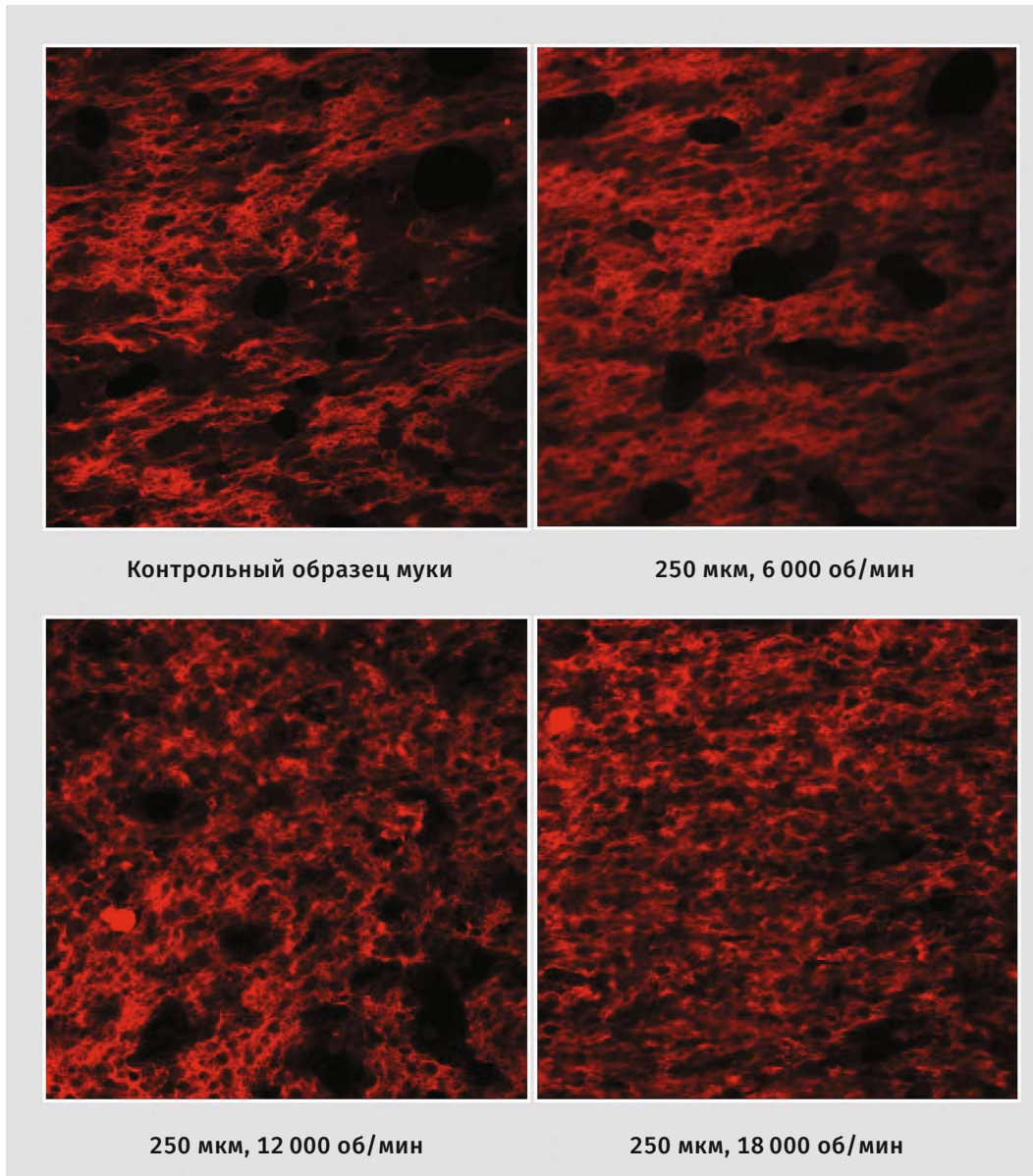
За счет высвобождения гранул крахмала и фрагментации агломератов при приготовлении теста площадь поверхности гранул крахмала, вступающих в контакт с водой из

теста, увеличивается. Это ведет к более интенсивному поглощению воды при приготовлении теста из модифицированной муки. Поэтому в модифицированную муку необходимо добавлять больше воды, так как в противном случае количество воды, доступной для образования глютеиновой сетки, недостаточно, вследствие чего при замесе теста получается очень плотным и малоэластичным.

Помимо реологических исследований для изучения изменений в процессе образования клейковины также можно использовать конфокальный лазерный сканирующий микроскоп (CLSM). При этом отдельные фракции муки, например, фракции белка, выборочно подкрашиваются флуоресцентными красителями (рис. 6). Исходная пшеничная мука при приготовлении теста образует трехмерную сетку с заданными технологическими свойствами (газоудерживающая способность, эластичность и т.д.). При увеличении числа оборотов ультрацентрифуги площадь поверхности белков, как и длина белковых нитей, уменьшается. Структура сетки утрачивается. При 18 000 об/мин белки в модифицированной муке (справа, внизу) при приготовлении теста образуют всего лишь гранулярную структуру со слабой газоудерживающей способностью. Причина таких изменений заключается в способности модифицированного крахмала связывать большее количество воды. При неизменном выходе теста модифицированная мука связывает большее количество воды, из-за чего остается меньше свободной воды для образования глютеиновой сетки. К тому же, ослабление сетки клейковины можно объяснить модификацией самого глютеина, что предстоит выяснить в дальнейших исследованиях. В следующих опытах нужно будет исследовать, можно ли добиться такой же структуры сетки, как в немодифицированной муке, путем корректировки количества воды.

Резюме и выводы

Приготовление пшеничного теста и, в конечном итоге, органолептические свойства хлебобулочных изделий неизменно зависят от степени и способа модификации крахмала. При увеличении механических нагрузок в мельнице ударного действия степень модификации крахмала увеличивалась почти на 104 %, а способность связывать воду – почти на 69 %. Высокая гидрофильность («любовь к воде») модифицированного крахмала уменьшает количество доступной воды, необходимой для образования структур белковых сеток. Чтобы тесто не получилось очень плотным и неэластичным, при приготовлении теста необходимо обязательно увеличивать количество воды. Однако объем воды не должен превышать рекомендованных значений, определенных с помощью стандартных анализаторов, так как определенная водопоглощающая способность (например, в лаборатории Doughlab) может повлечь передозировку воды. Кроме того, для модификации муки должны применяться способы, влияющие не только на свойства



Контрольный образец муки

250 мкм, 6 000 об/мин

250 мкм, 12 000 об/мин

250 мкм, 18 000 об/мин

© TUM

+++ рисунок 6:

Снимки, сделанные конфокальным сканирующим микроскопом. Мука, модифицированная в ультрацентриуге, с подкрашенной белковой сеткой

поверхности частиц муки, и, следовательно, водопоглощающую способность, или распределение воды. Основное внимание необходимо уделить механико-термическим способам, которые улучшают способность к клейстеризации, а не только изменяют гранулярную структуру крахмала или частиц муки.

Также удалось доказать, что стандартные методы измерения при проведении анализа механически модифицированной муки подходят для исследований лишь частично. Мука, модифицированная в шаровой мельнице, имела частицы большего размера, что позволяет предположить низкую степень модификации. Очевидно, что вновь образовавшиеся агломераты имеют пористую структуру, что обусловлено воздействием тепла при помолке. Поэтому способность связывать воду может увеличиваться, даже если размер частиц «механически» модифицированной муки не изменяется. При сравнении результатов модификации в трех разновидностях мельниц было отмечено, что модифицированная в криомельнице мука имела частицы наименьшего размера. Вследствие охрупчивания при низких температурах

частицы муки легко распадались под действием даже небольшой нагрузки.

В целом это говорит о том, что помимо управления механическим воздействием в процессе помола необходимо обязательно анализировать или контролировать температуру. Это позволит не только управлять степенью модификации крахмала путем изменения размера частиц, но и прогнозировать функциональные свойства. +++

Авторы

Сабина Якоби, д-р техн. наук Марио Йекле*, проф., д-р техн. наук Томас Бекер
Технический университет Мюнхена (TUM)
Кафедра технологий производства пива и напитков
Рабочая группа «Технологии переработки зерновых культур и технологическое оборудование»
85354 Фрайзинг, Германия
E-mail: mjekle@tum.de

* Контактное лицо