УДК [621.926.47:620.179.4]:613.26

С.Д. Руднев, Е.Ф. Вайман, А.И. Яремчук

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ И ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СЕЛЕКТИВНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ АДГЕЗИОННЫМ РАЗУПРОЧНЕНИЕМ РАСТИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ

Представлен анализ строения растительной ткани на клеточном уровне и ее морфологические особенности; акцентировано внимание на природе ее прочности, проявляющейся в поверхностном взаимодействии – адгезии и когезии. Проведена классификация растительного сырья по характеру поверхностных взаимодействий между структурами. Сформулированы основные пути снижения адгезионной прочности с целью интенсификации и повышения качества селективной дезинтеграции.

Растительная ткань, селективная дезинтеграция, прочность, адгезия, когезия, биополимеры, адгезионное разупрочнение.

Введение

Растительная ткань является основным источником необходимых для жизнедеятельности веществ. Развитие технологии переработки сырья и создание сбалансированных по составу продуктов потребовало новых подходов и методов дезинтеграции. Одним из них является селективное разрушение сложных по составу веществ – процесс, в результате которого продукты разрушения легко разделяются по компонентному составу [1]. Всякое разрушение связано с преодолением прочности материалов, из которых состоят тела. Научный подход к проблеме селективной дезинтеграции невозможен без полного представления природы прочности растительной ткани.

Объектом исследований избрана растительная ткань с позиций селективной дезинтеграции.

Высшие растения состоят из клеток, которые, несмотря на микроскопически малую величину, имеют очень сложное строение. Высокая степень организации клеток выражается в бесконечном разнообразии процессов, совершающихся в них, результатом чего является огромное количество химических веществ, добываемых из продуктов растительного происхождения. Клетки растений имеют твердые, нерастворимые в воде стенки, которые придают им определенную форму, ограничивают размер клетки, защищают протопласт, противостоят внутриклеточному тургорному давлению, которое составляет 0,5…1,0 МПа, и препятствуют ее разрыву. Клеточные стенки, являясь внутренним скелетом растения, обеспечивают его механическую прочность [2]. Живая клетка состоит из тех же химических элементов, что и неживая природа. Процессы, происходящие в клетке, подчиняются общим законам физики и химии. Согласно первому закону термодинамики энергия для клеточной работы не может создаваться из ничего и исчезать бесследно. Как вся природа, клетка подчиняется и второму закону термодинамики – в ней последовательно возрастает энтропия и происходит «разупрочнение» структуры, но по сравнению с неживыми структурами скорость возрастания энтропии минимальна. Можно сказать, что жизнь – это способность поддерживать упорядоченное состояние в течение длительного времени [2–4].

Живое тело клетки, так называемый протопласт, состоит из клеточной мембраны, цитоплазмы с органоидами и ядра [3]. Пограничный слой цитоплазмы представляет собой тончайшую пленку – плазматическую элементарную мембрану толщиной около 10 нм, которая состоит из трех слоев [5] (рис. 1).

Между двумя наружными мономолекулярными слоями белка находится биомолекулярный слой фосфолипидных молекул. Кроме белков и липидов, в мембранах есть вода, содержание которой может достигать 30 % ее массы, полисахариды, из минеральных веществ – кальций, способствующий взаимодействию друг с другом мембранных компонентов.

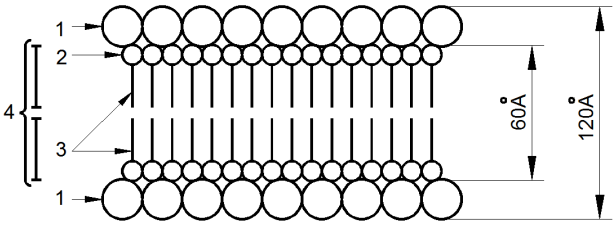

Рис. 1. Схема молекулярной архитектуры плазматической мембраны: 1 – молекулы белка; 2 – гидрофильная часть молекулы; 3 – углеводородные цепи; 4 – двойной ряд фосфолипидных молекул

Липиды представлены главным образом амфипатическими. Такие липиды обладают двойственными свойствами: как гидрофобностью, так и гидрофильностью. Амфипатические липиды схематически напоминают камертон: две ветви, символизирующие радикалы с гидрофобными свойствами, обращены в одну сторону, а третья, с противоположными гидрофильными, – в другую. Гидрофобными радикалами они обращены друг к другу, а гидрофильными группировками – к окружающей водной среде и содержимому клетки.

Белки и липиды упорядоченно расположены и соединены друг с другом химическими взаимодействиями. Основными силами,

стабилизирующими мембрану, являются слабые водородные взаимодействия между гидрофильными радикалами белков и амфипатических липидов, а также гидрофобные связи Ван-дер-Ваальса в углеводородных радикалах высокомолекулярных жирных кислот.

Молекулы белков не образуют сплошного слоя, они располагаются в слое липидов, погружаясь в него на разную глубину. Молекулы белка и липидов подвижны, что обеспечивает динамичность плазматической мембраны [5].

Клеточные оболочки состоят преимущественно из целлюлозы или клетчатки – углевода типа полисахарида с эмпирической формулой $C_6H_{10}O_5$. В клеточной стенке линейные, очень длинные (несколько микрометров) молекулы целлюлозы собраны в пучки – мицеллы, которые, в свою очередь, объединяются в фибриллы – тончайшие (1,5…4 нм) волоконца неопределенной длины. Целлюлоза образует многомерный каркас, который погружен в аморфный, сильно обводненный матрикс из нецеллюлозных углеводов: гемицеллюлоз и примеси пектиновых веществ. Каркасные фибриллы целлюлозы, молекулы гемицеллюлоз и протопектина матрикса связаны друг с другом ковалентными сшивками и слабыми взаимодействиями различной природы в единую сложную структуру. В ней молекулы гемицеллюлоз связаны с поверхностью целлюлозных микрофибрилл водородными связями [3]. Микрофибриллы клетчатки эластичны и по прочности на разрыв сходны со сталью. Полисахариды матрикса определяют такие свойства стенки, как высокая проницаемость для воды, растворенных мелких молекул и ионов, сильная набухаемость [4]. На долю матрикса приходится до 60 % сухого вещества оболочек, а на долю скелетного вещества – целлюлозы – всего 30 %, остальные 10 % составляют белки, липиды и другие вещества. Прочность клеточной стенки обусловливает целлюлоза, но в ней присутствуют и белки.

В живых организмах наиболее широко представлены три типа соединений – полимеров, образующих макромолекулы, состоящие из повторяющихся единиц – мономеров. Это белки, углеводы и липиды.

Макромолекулы составляют около 90 % сухого вещества клеток живых организмов. Для макромолекул белков и углеводов общими являются три свойства [2–5]:

– связи между субъединицами или мономерами образуются путем конденсации за счет выделения молекул воды;

– при образовании связей затрачивается энергия;

– связи между субъединицами или мономерами разрываются под действием воды, то есть в результате гидролиза.

Из органических веществ, входящих в состав растений, наиболее важными в биологическом отношении являются белковые (белки). Основная масса белков растений концентрируется в семенах и плодах. В других тканях растений их массовая доля относительно невелика. Так, в вегетативных органах растений – стеблях, листьях, корнях – она колеблется от 0,3 до 3,0 %, зато в зерне злаков белков – от 8 до 15 %, в семенах масличных растений – 18–28 %, а бобовых – от 25 до 50 % (в пересчете на сухое вещество). В растениях белки выполняют разнообразные функции, важнейшей из которых является структурная. Структурные белки входят в состав покровных тканей растений, в том числе семян и плодов. Они составляют структурную основу биомембран клеток.

На поверхности белков расположены различные гидрофильные группы, притягивающие дипольные молекулы воды. Гидрофильность различных групп разная. Пептидная связь $-CO-NH-$ удерживает одну молекулу воды, карбоксильная группа $-COOH-$ четыре молекулы воды, аминная группа $-NH_2-$ одну. Поэтому вокруг белковой молекулы находится так называемая гидратационная оболочка, придающая устойчивость белковым растворам и препятствующая осаждению молекулы белка.

Стенки соседних клеток скреплены межклеточным веществом – срединной пластинкой. Последняя – единый слой, общий для двух соседних клеток. Срединная пластинка состоит из протопектина, она менее обводнена, в ней могут присутствовать молекулы лигнина (в тканях, клетки которых одревесневаются) [5]. Межклеточные пространства заполнены органическим веществом, которое скрепляет клетки между собой. Его состав зависит от природы растительной ткани, ее нахождения в тех или иных морфологических структурах растения, но всегда в межклетниках находятся либо белки, либо пектины как связующие вещества растительной ткани. Между периферийными белками мембран клеток и веществами межклетников существуют устойчивые межмолекулярные связи, в которых непосредственно участвуют молекулы воды. Глобулы белка удерживают воду пептидными связями (одну молекулу), аминными группами (одну молекулу), карбоксильными группами (четыре молекулы). Другой полюс диполя воды удерживается соседней макромолекулой. Таким образом, межмолекулярная связь в межклеточных областях является преимущественно водородной. Энергия водородной связи составляет значение порядка 40 кДж/моль. Обезвоживание приводит к слипанию глобул белка, т.е. установлению поперечных связей между макромолекулами без участия молекул воды. Пектины обладают структурой с ограниченной гибкостью, стабилизируемой водородными и гидрофобными связями [4]. Растворимый пектин находится в межклеточных слоях ткани зрелых плодов. Молекулы пектина в воде легко ассоциируются друг с другом либо с крупными молекулами сопутствующих веществ. Так же как и в случае с белком, пектин устанавливает с соседними молекулами водородные связи. Таким образом, поверхностные белки клеточных мембран могут взаимодействовать с соседними как

непосредственно, так и с участием молекул воды и веществом межклетников, содержащим белки либо пектины.

Один из типов межклеточного взаимодействия – это простые контакты, которые занимают наиболее обширные участки соприкасающихся клеток. Расстояние между билипидными мембранами соседних клеток составляет 15–20 нм, а связь между клетками осуществляется за счет взаимодействия макромолекул соприкасающихся гликокаликсов (клеточных оболочек). Посредством простых контактов осуществляется слабая механическая связь – адгезия, не препятствующая транспорту веществ в межклеточных пространствах. Разновидностью простого контакта является контакт «типа замка», когда плазмолеммы соседних клеток вместе с участком цитоплазмы как бы втягиваются друг в друга (интердигитация), чем достигается большая поверхность соприкосновения и более прочная механическая связь.

Объекты переработки растительного происхождения чаще всего в нативном состоянии представляют собой коагуляционные дисперсные системы, влага в которых находится во всех формах связи с макромолекулами биополимеров. Но эти формы бывают ограничены химической и физико-химической связями, например для злаковых. Механическое обезвоживание либо сушка создают условия для перехода структур из коагуляционных, когда поверхностное взаимодействие микроструктур, в частности – растительных клеток, осуществляется адгезионно (дисперсная фаза – дисперсионная среда), в конденсационно-кристаллизационные [6]. Прочность обезвоженного растительного сырья определяется когезионным поверхностным взаимодействием его макроструктур и «кирпичиков» (опять же – частично обезвоженных растительных клеток).

Литературный анализ морфологии и состава растительного сырья позволил выявить наличие или отсутствие внутренней структурной связи между морфологическими структурами. Классификация растительного сырья представлена на рис. 2. В основу градации растительных объектов положены два признака: анатомически-морфологический (правая часть схемы) и характер связности морфологических структур (левая часть схемы). Окончания СП, СБ и НС связывают две части схемы воедино.

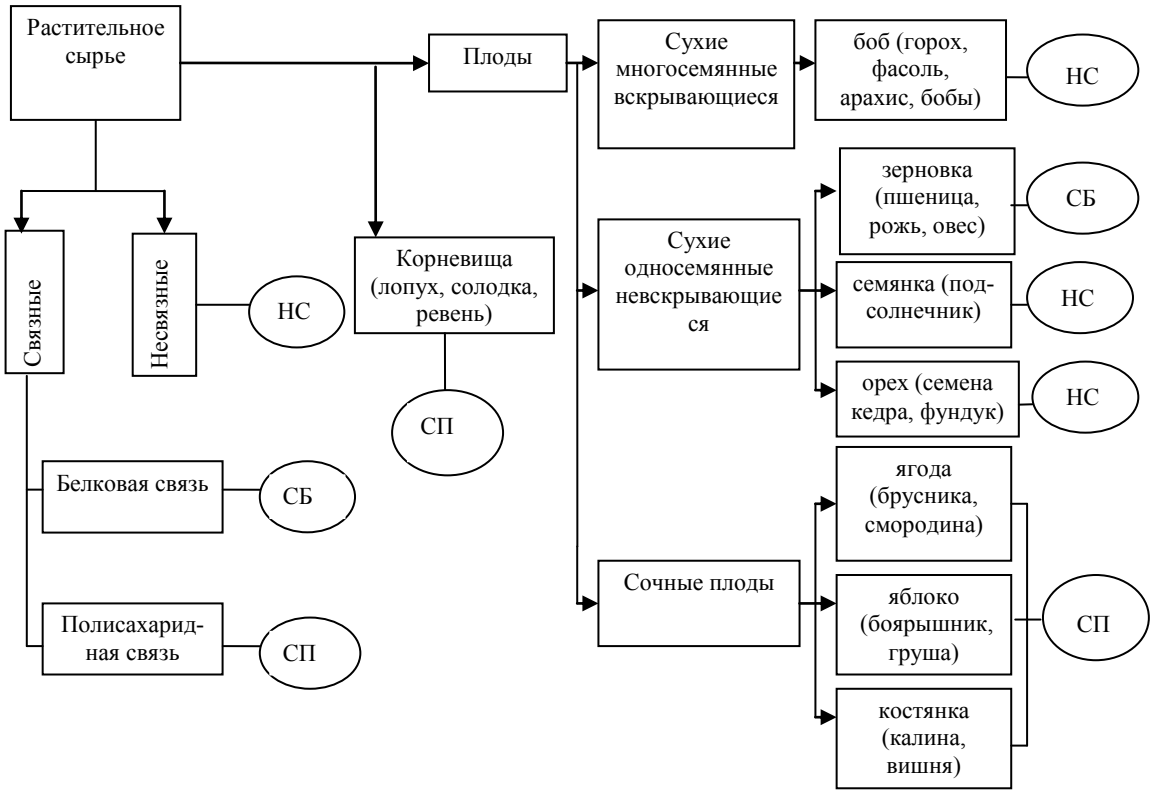

Рис. 2. Классификация растительного сырья по характеру поверхностных взаимодействий между структурами: НС – несвязные структуры; СБ – структуры, связанные белками; СП – структуры, связанные полисахаридами (в первую очередь – пектином)

Для экспериментального подтверждения адгезионной природы прочности приведем результаты некоторых исследований деформационного поведения растительной ткани, в частности – образцов из корня лопуха (рис. 3–6) и мускатного ореха (рис. 7).

Исходная (нативная) влажность образцов корня лопуха составила 62 %. Понижение влажности до 56 % привело к снижению прочности до

минимальной при сжатии и сдвиге вдоль волокон и повышению прочности до максимальной при сжатии вдоль оси корня при скорости нагружения 100 мм/мин. Очевидно, что такое деформационное поведение растительной ткани связано с исчезновением тургора, внутреннего давления в клетках, что приводит к снижению упругости ткани, а следовательно – понижению внутренней энергии вещества. Увеличение прочности при такой влажности на повышенной скорости деформирования, видимо, связано с исчезновением релаксационных процессов, когда напряжения не успевают более равномерно распространиться в объеме образца.

Влажность материала, близкую к 44 %, можно назвать первой критической точкой. При этой влажности происходит резкое изменение скорости сушки, практически заканчивается уменьшение размеров образцов (усушка), а на кривых прочности наблюдается ее увеличение вплоть до экстремумов. Несомненно, что при этой влажности заканчивается удаление физически связанной влаги преимущественно из межклеточных пространств растительной ткани.

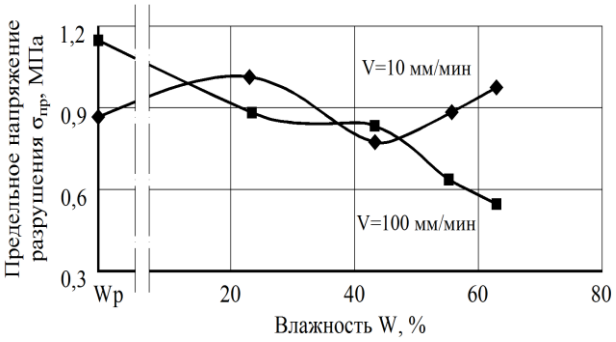

Рис. 3. Зависимость предельных напряжений разрушения $\sigma_{пр}$ от влажности W, %, образцов корня лопуха при сжатии поперек оси

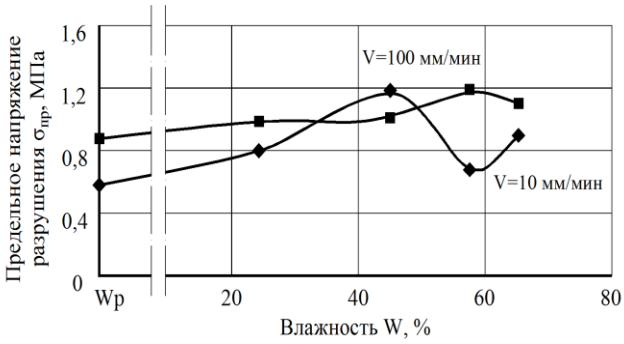

Рис. 4. Зависимость предельных напряжений разрушения $\sigma_{пр}$ от влажности W, %, образцов корня лопуха при сжатии вдоль оси

При квазистатическом сжатии вдоль оси, а также при сдвиге как вдоль, так и поперек волокон прочность образцов достигает максимума. Удаление влаги приводит к формированию более прочного адгезионного взаимодействия между клеточными структурами растительной ткани. Несмотря на отсутствие активной воды, внутренняя энергия вещества повышается. Вода, связанная физико-химически с макромолекулами растительной ткани, усиливает не только межклеточную, но и межструктурную прочность образцов.

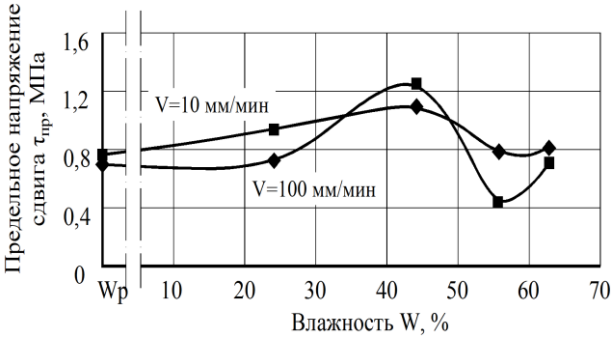

Рис. 5. Зависимость предельных напряжений сдвига $\tau_{пр}$ от влажности W, %, образцов корня лопуха при сдвиге вдоль оси

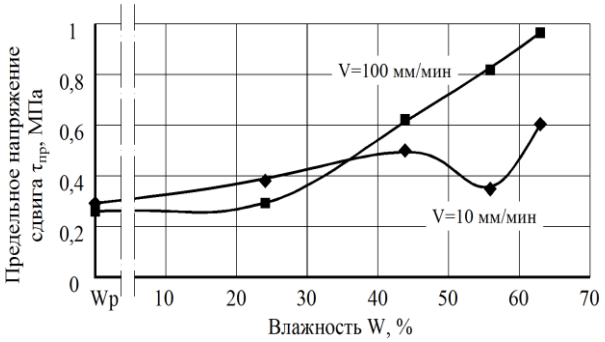

Рис. 6. Зависимость предельных напряжений сдвига $\tau_{пр}$ от влажности W, %, образцов корня лопуха при сдвиге поперек оси

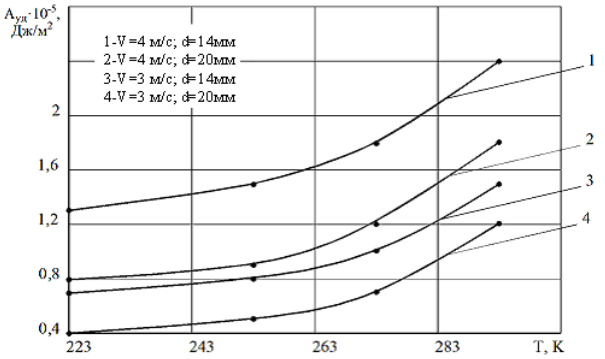

Рис. 7. Зависимость удельной работы разрушения $A_{уд}$ мускатного ореха от температуры при испытаниях на маятниковом копре с различными скоростями нагружения

Для мускатного ореха определяли энергию разрушения при низких температурах. В мускатном орехе при замораживании липиды переходят в твердообразное состояние и плоды, приобретая высокую упругость, разрушаются как хрупкие тела. Исследования проводились при различных температурах образцов. Для определения температуры две равные по величине частицы исследуемого материала замораживались в жидком азоте. Разрушаемый образец устанавливался под падающий груз, эталонный образец – рядом. В

отверстии эталонного образца устанавливалась термопара. Температура образцов постепенно увеличивалась, и при достижении величины, при которой осуществляется испытание, груз сбрасывался на образец. Исследования целых плодов мускатного ореха проводились динамическим срезом на маятниковом копре. Для обеспечения чистого сдвигового характера нагрузки орех устанавливался в трубку, вторая фиксировалась в установочных плитах копра. В рабочей части (бойке) маятника закреплялась пластина с цилиндрической проточкой диаметром 14 и 17 мм по размерам испытываемых образцов. Варьировались не только их размеры, но и скорость удара и температура. Наблюдалось снижение удельной энергии разрушения при уменьшении температуры образцов. Увеличение скорости удара также приводило к понижению энергии разрушения. Этот факт объясняется тем, что при увеличении скорости нагружения напряжения в образце не успевают релаксировать, снижается доля пластических деформаций, разрушение становится более хрупким. Это отчетливо наблюдалось по характеру скола образцов. При высоких скоростях поверхность раскола была близка к плоскости.

Из анализа строения и состава растительной ткани, а также проведенной классификации и результатов экспериментальных испытаний следует, что необходимыми для расчетов оборудования параметрами сырья при механической переработке (селективной дезинтеграции – дроблении и измельчении) являются поверхностная энергия и адгезионная прочность веществ, соединяющих растительные структуры (белки или пектины), с учетом их влагосодержания. Следовательно, задача определения внутренней прочности в дисперсных системах растительного происхождения, а также прочности их взаимодействия с поверхностями рабочих органов машин и аппаратов сводится к нахождению удельной поверхностной энергии дисперсных систем, содержащих биополимеры и влагу в различной концентрации.

Исходя из вышеизложенного интенсификация и повышение качества дезинтеграционных процессов растительной ткани возможны при направленном адгезионном разупрочнении между морфологическими структурами, ослаблении межклеточных взаимодействий в растительных объектах переработки. На основе проведенного анализа можно сформулировать следующие пути.

1. Биохимический: пектиновые вещества межклетных пластинок нередко претерпевают химические изменения и под действием энзимов разрушаются, после чего клетки разъединяются. Такое разрушение межклеточного вещества и разъединение тканей на отдельные клетки носит название мацерации [7]. Этот путь представляется наиболее проблемным, так как требует точной технологической настройки и подбора взаимодействующих веществ, происходит необратимое изменение основных биополимеров растительной ткани.

2. Снижение прочности адгезионного взаимодействия растительных структур насыщением водой (размачивание): влага повышает подвижность связей, снижает энергию поверхностных взаимодействий, замещая более прочные связи межмолекулярными водородными [8, 9]. При таком понижении адгезионной прочности целесообразно получать пюреобразные стерилизованные продукты с заданной концентрацией сухих веществ, минуя стадию высушивания с целью консервации, или же низкотемпературного хранения. Для таких материалов, как семена злаковых, насыщение влагой (отволаживание) приводит к формированию сложного напряженного состояния в поверхностях адгезионного взаимодействия морфологических структур, что является основой их селективной дезинтеграции.

3. Тепловое разупрочнение межструктурных поверхностных взаимодействий. Тепловая энергия вызывает деструкцию биополимеров, молекулы воды высвобождаются из поперечных мостиков макромолекул. Наиболее перспективным методом теплового разупрочнения, по мнению авторов, является воздействие на растительную ткань полями СВЧ, непосредственно повышающее кинетическую энергию молекул воды, что приводит к их высвобождению и «разжижению» растительной ткани.

4. Адгезионное разупрочнение путем изменения агрегатного состояния воды в объектах переработки: замораживание до температур ниже криоскопических (вплоть до криогидратных), при этом молекулы воды выходят из связного с биополимерами состояния и образуют кристаллы льда; взрывное парообразование (в частности, экструзионные технологии), когда межструктурная влага при резком сбросе внешнего давления испаряется и разрывает связи в объектах дезинтеграции изнутри, резко расширяясь. При таких способах обработки в определенных технологических режимах могут разрушаться все клеточные мембраны, что повышает доступность внутриклеточных веществ.

5. Обезвоживание растительной ткани до такой степени, когда адгезионное взаимодействие практически исчезает и замещается более слабым когезионным либо механическим сцеплением между структурами; в таком состоянии обеспечивается высокое качество селективной дезинтеграции, когда образование новой поверхности в объектах разрушения проходит по границам взаимодействий различных морфологических структур.

6. Вибрационное разупрочнение адгезионного взаимодействия [10]. При этом необходимо стремиться создать максимально высокую частоту колебаний рабочего органа при малой амплитуде, позволяющих направленно снижать именно адгезионную прочность между морфологическими структурами, и растительная ткань разрушается селективно и с минимальными затратами энергии.

Вывод

Целенаправленное применение методов адгезионного разупрочнения растительной ткани позволит создавать энергосберегающие высокоэффективные технологии, модернизировать существующее оборудование, оптимизировать технологические процессы, получать полуфабрикаты и продукты с новыми потребительскими свойствами.

Список литературы

1. Руднев, С.Д. О селективности разрушения материалов / С.Д. Руднев, Д.В. Клеников // Научное обозрение. – 2006. – № 1. – С. 70–73.
2. Андреева, И.И. Ботаника / И.И. Андреева, Л.С. Родман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1999. – 488 с.
3. Донченко, Л.В. Технология пектина и пектинопродуктов: учеб. пособие / Л.В. Донченко. – М.: ДеЛи, 2000. – 256 с.
4. Абрамова, Л.И. Анатомия, морфология и систематика растений / Л.И. Абрамова, Н.А. Березина. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 131 с.
5. Семенов, И.Л. Физиолого-биохимические исследования поверхности растительных клеток / И.Л. Семенов, Э.И. Выскребенцева // Новые направления в физиологии растений. – М.: Наука, 1985. – 288 с.
6. Попов, А.М. Физико-химические основы технологий полидисперсных гранулированных продуктов питания / А.М. Попов. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2002. – 324 с.
7. Биохимия растительного сырья / В.Г. Щербаков, В.Г. Лобанов, Т.Н. Прудников и др.; под ред. В.Г. Щербакова. – М.: КолосС, 1999. – 376 с.
8. Руднев, С.Д. Термодинамический подход к определению прочности взаимодействия биологических дисперсных структур / С.Д. Руднев, О.С. Карнадуд // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2009. – № 4. – С. 12–15.
9. Руднев, С.Д. Поверхностные свойства межклеточного вещества растительного сырья / С.Д. Руднев, А.М. Попов, Е.А. Шелеметева // Известия вузов. Пищевая технология. – 2009. – № 4. – С. 17–19.
10. Руднев, С.Д. Моделирование процесса селективного разрушения двукомпонентных тел в конусном виброизмельчителе / С.Д. Руднев, Д.В. Клеников // Вестник молодых ученых. – 2004. – № 8. – Серия: Технические науки. – 2004. – № 2. – С. 33–38.

ГОУ ВПО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

МУЗ «Клинический консультативно-диагностический центр»,
650066, Россия, г. Кемерово, пр. Октябрьский, 53/1.
Тел.: (3842) 35-33-67
Факс: (3842) 35-32-24
e-mail: kemdc@mail.ru

ГОУ ВПО «Кемеровский государственный
сельскохозяйственный институт»,
650056, Россия, г. Кемерово, ул. Марковцева, 5.
Тел./факс: (3842) 73-52-23
e-mail: ksai@ksai.ru

SUMMARY

S.D. Rudnev, E.F. Vaiman, A.I. Yaremchuk

Intensification and quality improvement of selective disintegration with adhesive softening of plant tissue

The analysis of plant tissue structure on cellular level and its morphological characteristics is presented. The nature of plant tissue strength revealing itself in surface interactions, adhesion and cohesion, has been highlighted. Classification of plant raw material according to the character of surface interactions between structures has been carried out. General ways of adhesion strength reduction for intensification and improving selective disintegration quality have been developed.

Plant tissue, selective disintegration, strength, adhesion, cohesion, biopolymers, adhesive weakening.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

Kemerovo Klinical Diagnostik Center
Oktjabrsky prospekt, Kemerovo, 650066, Russia

Phone/Fax: +7(3842) 35-32-24
e-mail: kemdc@mail.ru

Kemerovo State Agricultural Institute
5, st. Markovtseva, Kemerovo
Phone/Fax: (3842) 73-52-23
e-mail: ksai@ksai.ru