

КАВИТАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ДИСПЕРГИРОВАНИИ И ГОМОГЕНИЗАЦИИ

*Институт прикладной физики, Академия наук Молдовы,
ул. Академическая 5, г. Кишинев, MD–2028, Республика Молдова, pdumitras@yahoo.com*

Введение

В последние годы наряду с расширением ассортимента и увеличением объемов реализации напитков большое внимание уделяется совершенствованию технологических режимов их производства с целью максимального сохранения биологически активных веществ. В частности, соки, пюре, вина обладают гармоничным вкусом и запахом, содержат растворимые и нерастворимые вещества, которые имеют большую пищевую и физиологическую ценность [1, 2], в связи с чем, к примеру, производство соков с мякотью получило значительное развитие. Особые требования, предъявляемые к качеству соков и вин, состоят, в частности, в сохранении природных свойств свежего винограда, фруктов и овощей (цвета, запаха и вкуса), прозрачности вин и однородной консистенции соков с мякотью, которая не дает расслоения.

При производстве натуральных соков одна из основных задач заключается в том, чтобы стабилизировать мякоть во взвешенном состоянии. С учетом этого основной операцией в производстве соков с мякотью является тонкое диспергирование до размеров частиц не более 50 мкм. При этой операции происходит клеточное измельчение мякоти, которое позволяет избежать расслоения и осаждения компонентов сока. Обычно используются гомогенизаторы высокого давления [3] и, несмотря на то что применяются сотни атмосфер при диспергировании мякоти, не всегда достигаются ожидаемые результаты [4]. Решение проблемы осветления, депротеинизации и стабилизации вин остается приоритетным, во многом зависит от разработки технологии диспергирования бентонита.

Необходимость разработки и производства экологически чистых пищевых продуктов высшего качества на основе использования перспективных технологий обязывает исследователей и практиков разрабатывать и внедрять новые методы тонкого диспергирования и гомогенизации эмульсий и суспензий (в частности, дисперсий соков с мякотью и бентонита для осветления вина), основанные на физико-механических воздействиях на границе фаз жидкость-жидкость или жидкость-твердое тело [4, 5]. Кавитационные эффекты существенно интенсифицируют процессы смешивания, обеспечивая получение стабильных эмульсий и суспензий с тонкой и гомогенной дисперсностью [6, 7]. Существенная интенсификация процессов диспергирования и гомогенизации смесей основывается на кавитационных эффектах (гидродинамических и акустических микротечениях, звуковом давлении, капиллярном эффекте), благодаря которым жидкие и твердые частицы разрушаются, становятся более мелкими и равномерно распределяются в смеси. За счет этих эффектов ограниченный слой на границе раздела жидкость-жидкость и жидкость-твердое тело модифицируется, становится более тонким, и тем самым увеличивается доступность материалов к внутренней области пористого тела, интенсифицируются процессы диффузии и диспергирования.

1. Материалы, методы анализа и оборудование

При разработке технологии тонкого диспергирования использовали бентонит с размерами частиц (200–250) мкм и мякоть натурального яблочного сока с частицами (350–400) мкм. Экспериментально исследовано диспергирование бентонита в дистиллированной воде и мякоти натурального сока под воздействием (здесь и ниже) трехчастотной кавитации в зависимости от продолжительности обработки и статического давления в контуре рециркуляции суспензии. Размеры частиц суспензии и степень диспергирования определяли электронной микроскопией до и после кавитационной обработки. С учетом того, что развитие кавитационного поля существенно зависит от вязкости суспензии и бентонит имеет способность набухать, было установлено процентное соотношение между твердой и жидкой фазами, которое составляет 5%.

В соответствии с теоретическим и экспериментальным изучением роли давления в контуре рециркуляции и температуры в кавитационных зонах были установлены оптимальные величины –

8 атм. и 70 °С. Для обоснования технологических режимов диспергирования были определены оптимальные характеристики суспензии из бентонита и мякоти сока: размер частиц дисперсии d (мкм) в зависимости от давления P (атм.) в кавитационных зонах и продолжительность обработки τ (мин) при воздействии кавитации; зависимость процентной доли частиц бентонита размерами (0,5–2) мкм и мякоти – (10–40) мкм, преобладающих в суспензии, от длительности кавитационной обработки.

Экспериментальные исследования и испытания в производственных условиях показали, что трехчастотная кавитационная установка (рис. 1) должна состоять из следующих компонентов с характеристиками: центробежный насос 1 типа НЦ-Г 1,6/100 КТЗ (давление 10 атм., дебит 3 м³/ч, мощность мотора 2,5 кВт); гидродинамический аппарат 2 (дебит до 5 м³/ч, частота гидродинамической кавитации 450–650 Гц, диспергирование частиц до размеров $d = 40$ –50 мкм за 30 мин, ширина зазора конической секции аппарата 3,5 мм; импульсный ротор 3 (дебит 3 м³/ч, частота гидродинамической кавитации 2–3,5 кГц, диспергирование частиц до размеров $d = 10$ –15 мкм за 30 мин, размеры отверстий статора и ротора (3,5 x 10,5) мм); гидроакустический излучатель 4 (дебит 0,5–1,5 м³/ч, частота гидроакустической кавитации 10–12 кГц, диспергирование частиц до размеров $d = 0,4$ –10 мкм, ширина кольцевой части сечения излучателя на выходе (0,9–1,2) мм).

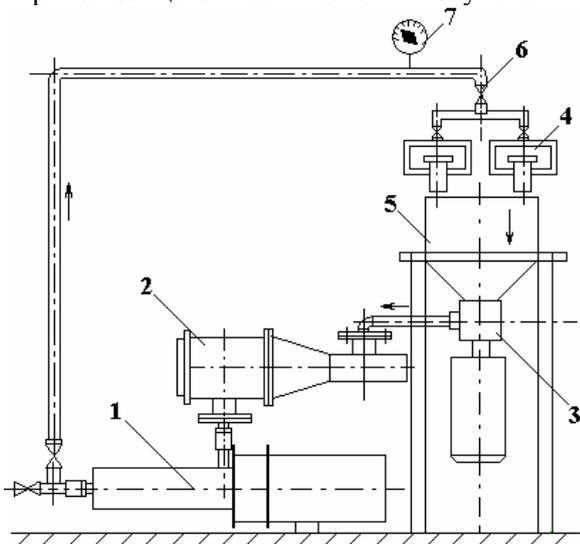


Рис. 1. Кавитационная трехчастотная установка: 1 – насос рециркуляции; 2 – гидродинамический аппарат, 3 – пульсационно-импульсный аппарат, 4 – гидроакустический излучатель, 5 – резервуар для смешивания, 6 – кран, 7 – манометр



Рис. 2. Кавитационная трехчастотная установка в линии для приготовления вина

Суспензия вода–бентонит при комнатной температуре, а сок с мякотью при температуре 60–70 °С загружаются в резервуар 5. Давление рециркуляции смеси обеспечивается насосом 1 и краном 6, контролируется манометром 7.

При реализации процессов тонкого диспергирования и гомогенизации широко используются кавитационные методы. Диспергирование и гомогенизация эффективны и оптимальны, если правильно определены статическое давление в замкнутой технологической системе рециркуляции при кавитационной обработке, продолжительность гомогенизации, соотношение жидкой и твердой фаз (концентрация). Согласно [10] и полученным результатам, действие ультразвуковой кавитации на тонкое диспергирование бентонита [9] обеспечивается при статическом давлении в зоне кавитационной обработки $P_0 = 4 \div 8$ атм.

2. Разработка технологии диспергирования и гомогенизации бентонита

Для разработки и испытания технологии тонкого диспергирования и гомогенизации бентонита до субмикронных размеров кавитационная установка была смонтирована в цехе для приготовления вина (рис. 2).

Исследования, проведенные под воздействием разных видов кавитации [8, 9], позволили сформулировать основные требования для разработки кавитационной технологии тонкого диспергирования бентонита в непрерывном потоке. Режимы диспергирования бентонита, используемого для

осветления вина под воздействием различных видов кавитации, можно определить по номограмме, представленной на рис. 3.

Оптимальные технологические режимы выбраны на основе полученных результатов [9]: давление рециркуляции суспензии бентонита $P_0 = (7-8)$ атм.; продолжительность рециркуляции и кавитационной обработки суспензии $\tau = (30-40)$ мин; температура суспензии $(30-40)^\circ\text{C}$; соотношение твердой и жидкой фаз 1 : 20.

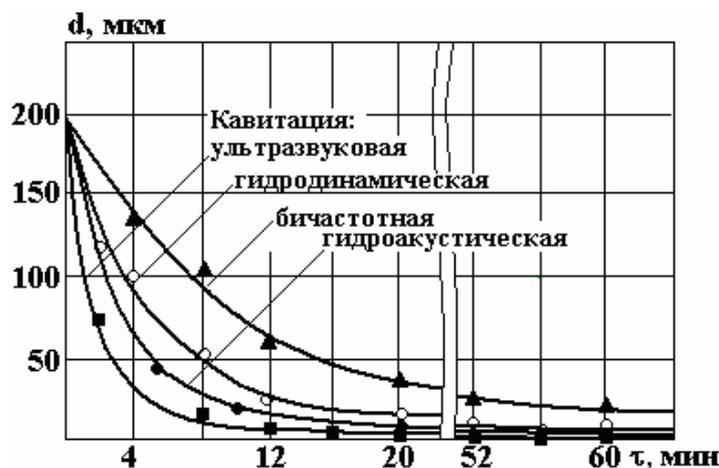


Рис. 3. Кавитационное диспергирование бентонита ($P_0 = 8$ атм.). Ультразвуковая кавитация: амплитуда $A=20$ мкм; частота $f=18$ кГц; гидродинамическая: $f = 450$ Гц; бичастотная (ультразвуковая: $A = 20$ мкм, $f_1=18$ кГц; гидродинамическая: $f_2 = 450$ Гц); трехчастотная кавитация (гидроакустическая: $f_1 = 12$ кГц, гидродинамическая: $f_2=450$ Гц; гидродинамическая: $f_3=3,5$ кГц)

Для получения суспензии бентонита вода наливается в резервуар для перемешивания 5, включаются насос для рециркуляции 1 и пульсационно-импульсный ротор 3 и в воду добавляется порошок бентонита в пропорции 1:5. Длительность обработки зависит от размера частиц бентонита. В течение диспергирования и гомогенизации через определенные интервалы времени (10 мин) берутся пробы, пока частицы не достигают размеров менее 2,0 мкм. Затем суспензия выгружается для использования и начинается приготовление новой партии (когда последующая партия не готовится, установка промывается водой). Полученные при кавитационном тонком диспергировании суспензии бентонита были испытаны для осветления, депротеинизации и стабилизации вина.

В соответствии с теорией осветления и стабилизации тонко диспергированный бентонит образует в объеме вина коллоидные или взвешенные частицы, имеющие большую поверхность адсорбции (поверхностную энергию) и несут положительный или отрицательный электрический заряд. Благодаря силам взаимодействия между зарядами частицы бентонита адсорбируют примеси и осаждают частицы различных коллоидов вина с противоположным электрическим зарядом. Вследствие адсорбции и осаждения частицы образуют большие агрегаты, которые осаждаются в массе вина, при этом происходит осветление, и содержание различных экстрактивных нестабильных веществ уменьшается.

В отличие от осветляющих белковых веществ, действующих в ассоциации с танином, минеральные вещества (бентонит) образуют коллоидные или взвешенные частицы (каолин), которые благодаря наличию отрицательных электрических зарядов осаждают противоположно заряженные частицы.

3. Условия, необходимые для осветления вина тонко диспергированной суспензией бентонита

Для осветления и стабилизации вина необходимо соблюдать выбор степени дисперсности бентонита и технологию его применения. Вина, предназначенные для обработки бентонитом, предварительно должны быть очищены от осадка дрожжей. Для осаждения частиц бентонита вино должно быть стабильным с биологической точки зрения и не содержать примесей двуокиси углерода. При обработке бентонитом исключаются резкие перемены температуры, которые могут вызвать перемешивания в массе вина, выделение двуокиси углерода и возникновение потоков. Недостаточную или слишком высокую кислотность вина предварительно следует нормализовать, добавив лимонную кислоту, или купажировать с более или менее кислыми винами соответственно. Степень дисперсности

и дозу суспензии бентонита необходимо определить для каждого вида вина на основе предварительных испытаний. Суспензия бентонита должна соответствовать плотности и вязкости вина, чтобы диспергированные частицы легко осаждались; содержать частицы, заряд которых противоположен заряду веществ, вызывающих мутность вина. При добавлении суспензии в вино нужно обеспечить быструю гомогенизацию общей массы вина. Температура помещения должна поддерживаться в интервале 8–15°C, чтобы образование осадка вина и его выпадение проходили нормально.

Обработка бентонитом при испытаниях в производственных условиях проводилась при температуре резервуаров с вином. При этом резервуары для обработки вина бентонитом должны быть чистыми, чтобы обеспечить выпадение наиболее плотного осадка, для чего после обработки нужно выждать определенное время, которое зависит от высоты и формы резервуара, вида мутности вина и степени ее дисперсности.

4. Трехчастотная кавитационная технология получения сока с мякотью

На основе исследований процесса диспергирования [8] при производстве соков с мякотью рекомендуется использовать трехчастотные кавитационные установки, которые обеспечивают тонкое диспергирование (10–50) мкм, когда мякоть во взвешенном состоянии становится гомогенной и стабильной. Кроме того, значительно уменьшается потребление энергии и металла, необходимого для изготовления оборудования.

Предварительно были определены технологические режимы производства сока под действием трехчастотной кавитации и показано, что модификация промышленной линии не требуется. Установка вмонтирована в реактор для гомогенизации сока с мякотью и не должна оказывать негативного влияния на технологические параметры процесса и техническое обслуживание линии.

При испытаниях установки и ее блоков в резервуар 5 (см. рис. 1) наливали 500 л сока с мякотью, пропускали пар для его нагрева и включали насос для рециркуляции. Оценивалось влияние температуры и давления на длину кавитационной зоны на выходе из акустического блока (рис. 4). Установлено, что температура в интервале 60–70°C не влияет на кавитационную зону, а повышение давления ведет к увеличению ее длины.

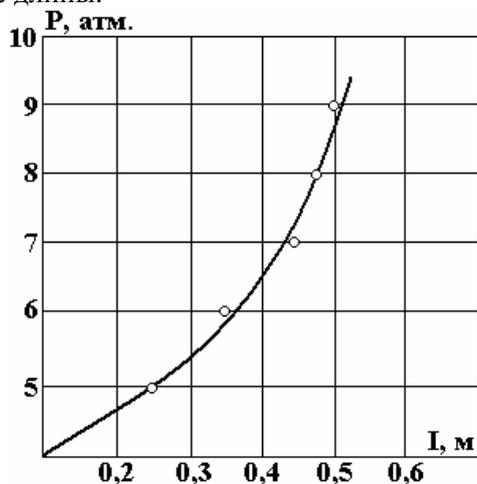


Рис. 4. Зависимость длины кавитационной зоны от давления в акустическом блоке

Для производства сока с мякотью использовали сырье из свежих яблок; их мойка осуществлялась последовательно на двух машинах: с барабаном (марка А9/КМ2) и унифицированной (марка Т1-КУМ-5). Затем оценивалось качество сырья на ленточном транспортере, оно измельчалось в дробилке Д1 с последующим подогревом в шнековом нагревателе до 90–95 °С, чтобы инактивировать ферменты-оксиданты и облегчить последующее измельчение.

Сырье для пюре из фруктов измельчалось на машине с диаметром отверстий – сит – 0,4 мм при 600 об/мин. Готовился сахарный сироп с кипячением (5 мин) и фильтрованием через капроновую ткань. Полученное пюре и сироп смешивались в резервуаре, и в полученный нектар добавляли лимонную кислоту для регулирования рН. Стабильность во взвешенном состоянии зависит от размеров частиц, плотности и вязкости жидкой фазы, соотношения твердой и жидкой фаз. Чтобы частицы мякоти оставались во взвешенном состоянии, их размеры не должны превышать 50 мкм, а жидкая фаза должна иметь достаточно высокую вязкость [2, 5]. Эти условия обеспечивают гомогенизацию соков до дисперсий (10-30 мкм) и получение продукта высокого качества.

Вязкость можно увеличить за счет гидролиза нерастворимого протопектина с получением растворимого в воде пектина посредством термической обработки. Увеличение содержания пектиновых веществ значительно повышает вязкость сока и соответственно стабильность мякоти при хранении. Термическая обработка также инактивирует ферменты-оксиданты, которые ухудшают цвет сока. Поэтому кавитационную гомогенизацию сока рационально проводить непосредственно после смешения компонентов нектара.

При разработке кавитационной технологии использовали нектар из яблок. После измельчения нектар гомогенизировали на кавитационной установке (рис. 1), нагревали до $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ и разливали (фасовали) в стеклянную тару по методике горячей разливки. Для инактивации ферментов сока и обеспечения полного превращения протопектина в водорастворимый пектин гомогенизация проводилась при температуре $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$, что обеспечивает увеличение вязкости сока. Физико-химический состав нектара приведен в таблице.

Физико-химические параметры нектара из яблок, подвергнутого кавитационной обработке ($\tau = 1$ мин; $t = 70^\circ\text{C}$)

№ п/п	Параметры	Содержание	
		Контрольный образец	Обработанный образец
1	Массовая доля растворимых сухих веществ, %	12,6	13,3
2	Массовая доля титруемых кислот (в расчете на яблочную кислоту), %	0,28	0,31
3	pH	3,3	3,27
4	Массовая доля мякоти, %	12,9	10,2
5	Массовая доля, %:		
	пектиновых веществ	0,16	0,22
	водорастворимого пектина	0,1	0,13
	протопектина	0,06	0,09
6	Вязкость, сП	6,8	12,2

После кавитационной обработки качество нектара существенно улучшается. За счет уменьшения размеров частиц мякоти до $(10-50)$ мкм увеличивается стабильность. В состоянии тонкой дисперсии снижается массовая доля мякоти; за счет перехода нерастворимого протопектина в водорастворимый пектин увеличивается вязкость сока от 6,8 до 12,2 сП. Остальные показатели сока (массовая доля сухих растворимых веществ и титруемых кислот) остаются практически без изменений.

Таким образом, использование трехчастотной кавитационной обработки в качестве гомогенизатора обеспечивает получение однородного, стабильного продукта, который практически не расслаивается при хранении; частицы мякоти имеют мелкодисперсную структуру, обуславливающую высокие вкусовые качества. Стадии технологического процесса получения нектара из яблок в линии для производства соков с использованием трехчастотного кавитационного гомогенизатора показаны на схеме, приведенной на рис. 5.

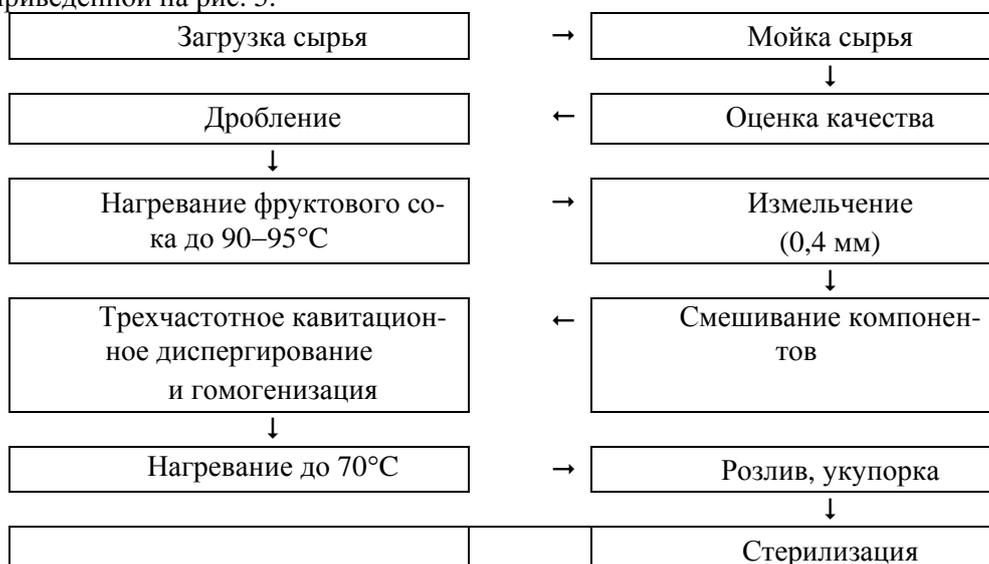


Рис. 5. Кавитационный технологический процесс получения сока с мякотью из яблок

Выводы

Полученные результаты составляют основу технологий и установок трехчастотной кавитации для производства тонкодисперсных суспензий и эмульсий с субмикронными размерами частиц. Разработана и испытана в промышленных линиях кавитационная установка для производства мелкодисперсной суспензии из бентонита и натурального сока с мякотью.

Обоснованы кавитационные трехчастотные технологии получения тонких суспензий из бентонита и сока с мякотью из яблок.

Разработанная технология способствует стабилизации мякоти во взвешенном состоянии за счет увеличения содержания гомогенных частиц с размерами не более 50 мкм (в интервале 10–30 мкм до уровня 60–90% визуального поля), а также увеличения содержания пектиновых веществ и вязкости нектара.

Кавитационная трехчастотная технология обеспечивает диспергирование бентонита до размеров частиц (0,1–2,0) мкм, уменьшение его расхода при обработке виноматериалов до 10 раз; увеличение производительности осветления (до 5–8 раз) и улучшение качества осветления вин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство натуральных плодовых соков с мякотью с применением непрерывно действующих фильтрующих центрифуг // Пищевая промышленность. Сер. 4. Консервная, овощесушильная и пищевая концентратная промышленность. Вып. 8. 1991.
2. Валуйко Г.Г., Зинченко В.И., Мехузла Н.А. Стабилизация виноградных вин. Таврида. Симферополь, 1999.
3. Ситников Е.О., Качанов В.А. Оборудование консервных заводов // Пищевая промышленность. М., 1991.
4. Menoret V. Evolution de la technologie des jus de fruits // *Industr. alim. agr.*, **87**(5), 511, 1970.
5. Самсонова А.Н., Ушева В.Б. Фруктовые и овощные соки. ВО Агропромиздат. М., 1990. С. 287.
6. Шобингер Г. Плодово-ягодные и овощные соки // Легкая и пищевая промышленность. М., 1982.
7. Коновалов А.И., Смоленцев А.В., Сосжина Н.А., Миронов В.Ф. и др. Тез. докл. II Межрегион. науч.-практ. конф. «Пищевая промышленность-2000». Казань, 1998. С. 177.
8. Dumitras P., Bologa M., Cuciuc T. Tehnologii cavitaționale de preparare a sucurilor naturale, Proc. 32nd Annual Congress ARA, USA, Boston, Polytechn. Int. Press, 2008, pp. 177–180.
9. Думитраш П., Болога М. Диспергирование и гомогенизация дисперсных систем в акустическом поле // Электронная обработка материалов. 2007. № 2. С. 71–74.
10. Агранат Б.А. Ультразвуковая технология. М.: Металлургия, 1992.

Поступила 17.02.09

Summary

The results of tests carried out in industrial conditions are presented. They allowed to elaborate technologies of dispergation and homogenization for fabricating emulsions and suspensions under the action of ultrasonic, hydrodynamic and bifrequency cavitation. Dispergation regimes were found for materials with various physico-chemical properties, including viscous media (natural juices with pulpe) and materials with lamella structure (bentonite). Cavitation effects intensify dispergation processes of materials to submicronic dimensions of particles; this considerably increases the sedimentation period of suspensions.