

Р. Ринк¹, С. Д. Шестаков²

¹*Oil Tech Production OY, Estonia, 11913, Tallinn, Kressi Tee, 34 A,*

E-mail: info@oiltech-nordic.eu

²*ГООУ ВПО Московский государственный университет технологий и управления,
Россия, 109004, Москва, Земляной вал, 73, E-mail: sdsh@mail.ru*

Кавитационный реактор с симметричной немонолитной колебательной системой акустической ячейки для процессов пищевой сонохимии

Получена 15.03.2012, опубликована 28.03.2012

В статье кратко изложены основные положения концепции пищевой сонохимии, которая принята в настоящее время в России. Показан кавитационный реактор с симметричной немонолитной колебательной системой акустической ячейки, специально разработанный и изготовленный в Эстонии на основе модели многопузырьковой кавитации и теории подобия кавитационных процессов. Приведен анализ его конструкции в сравнении с известными аналогами, подходящими для сонохимических исследований в пищевой промышленности. Показано, что такая конструкция кавитационного реактора обеспечивает повышение его производительности. Кавитационная эрозия поверхности его частей возрастает пропорционально росту производительности. Абсолютная загрязненность обрабатываемой в нем жидкости не увеличивается, так как скорость ее движения через реактор возрастает. При этом бесполезные потери акустической энергии на вибрацию корпуса реактора уменьшаются.

Ключевые слова: пищевая сонохимия, кавитационный реактор

ВВЕДЕНИЕ

В общей сонохимии [1] принято считать истинно сонохимическими только процессы в газовой фазе внутри кавитационных пузырьков, при пульсации которых периодически достигаются температуры плазмохимических реакций, и которые происходят в результате взаимодействия продуктов таких реакций с жидкой фазой. Но одна из сонохимических реакций воды, не сопровождаемая диссоциацией ее молекул (подобные процессы современная общая химия относит к химическими реакциям) – разрушение импульсами давления от пульсации кавитационных пузырьков образованной водородными связями собственной надмолекулярной структуры, по массе участвующего в ней реагента несоизмеримо превосходит реакции пиролиза в парогазовой фазе внутри пузырьков. Эта реакция эквивалентна процессам, происходящим в воде при нагревании ее до температуры около +70°C. Известно, что полярность молекул воды предопределяет наличие структуры, напоминающей структуру льда даже при температурах ее жидкого состояния, что не так давно еще раз

было подтверждено исследованиями, выполненными в Лейденском университете [2]. Аномально большое увеличение вязкости воды при понижении ее температуры, парадоксальное уменьшение плотности при охлаждении ниже $+4^{\circ}\text{C}$, а также высокое по сравнению с неполярными жидкостями поверхностное натяжение связаны с явлением «самогидратации» (рис. 1).

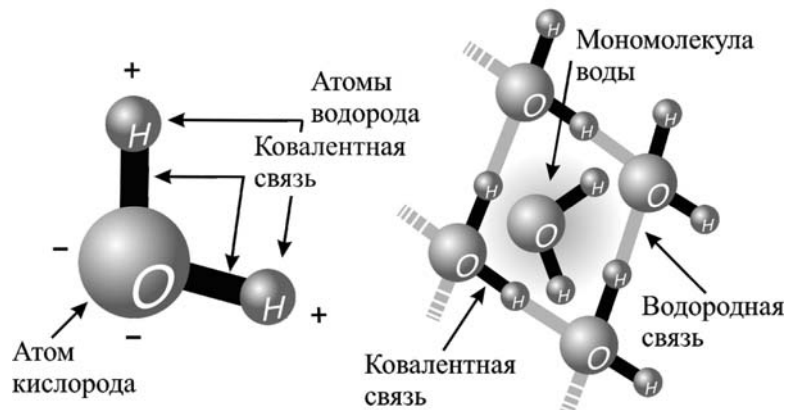


Рис. 1. Строение молекулы воды и ее надмолекулярная структура, образованная водородными связями в результате самогидратации

Надмолекулярная структура воды разрушается при температурах выше, чем, например, температура денатурации белков. В природе при синтезе белка и формировании его гидратных оболочек из отдельных мономолекул воды разрушение ее структуры происходит при прохождении сквозь биологические мембраны под действием обратного осмоса. А искусственно без нагрева это можно сделать только методами химии высоких энергий, в том числе сонохимическими (рис. 2).

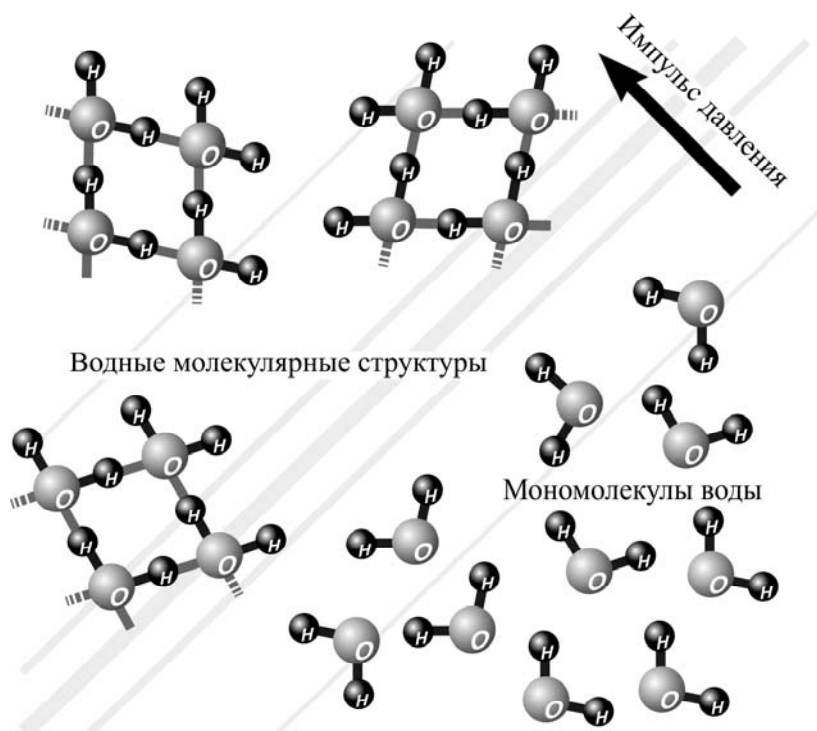


Рис. 2. Схема разрушения кавитацией надмолекулярной структуры воды

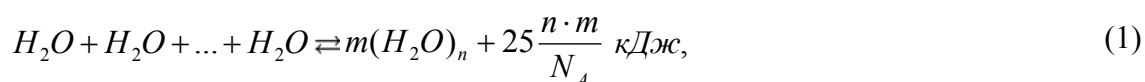
Основы сонохимической теории гидратации биополимеров применительно к протеинам мяса впервые были изложены в 2005 г. в лекции профессора О. Н. Красули, прочитанной в исследовательском институте мясной промышленности (Роскилде, Дания). С тех пор управление процессами гидратации стало одним из главных направлений развития пищевой сонохимии в России [3-6]. Российское предприятие, первым изготовившее оборудование и внедрившее промышленную технологию на предприятиях отрасли стало лауреатом I степени национальной экологической премии в номинации «Экология и здоровье» [7].

В химической литературе гидратацию трактуют как процесс связывания воды химическими веществами. В ней сказано, что и некоторые органические вещества образуют с водой кристаллогидраты постоянного состава, которые ведут себя как индивидуальные химические соединения. Такие формулировки определяют процесс гидратации как химическую реакцию, в результате которой образуется новое вещество. В курсе общей химии в качестве примера такого вещества приводится медный купорос $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, а знаком «·» в его химической формуле обозначается водородная связь. Отделить пять молекул воды, составляющих более трети массы всего этого соединения, от сульфата меди можно только прокаливанием при температурах значительно превышающих температуру парообразования. А из химии биополимеров известно, что, например, белок, имея в составе молекул аминокислот полярные группы, также способен вступать в реакцию гидратации. Считается, что он может связывать в результате нее до 40% воды к своей молекулярной массе [8]. Для этого полярные центры молекул аминокислот, представленные карбоксильными $-\text{COOH}$, гидроксильными $-\text{OH}$ и аминными $-\text{NH}_2$ группами, должны быть свободны от связей друг с другом, образующих пространственную структуру белка. Такое состояние белка появляется в результате, например, механического измельчения биомассы. Согласно учению академика В. И. Вернадского гидратационно-связанная вода – это неотъемлемая часть белка [9]. Она естественным образом увеличивает его массу, поскольку соединяется с ним благодаря действию механизмов аналогичных тем, которые имеют место в процессе его синтеза и почти настолько же прочно, насколько прочны в белке связи, формирующие его структуру. Пищевое сырье в современных условиях в большинстве своем хранится в высушенном или замороженном виде, то есть, утратив природную влагу или теряя химическую связь с ней. Поэтому нахождение возможностей непосредственной гидратации биополимеров решает большую проблему – позволяет уменьшить количество либо вовсе исключить из продуктов питания непищевые вещества, которые традиционно используют для искусственного связывания влаги и увеличения таким путем их массы.

Отделить химически связанную в результате реакции гидратации воду с целью измерить ее количество, не денатурировав при этом белок, можно длительным высушиванием при температурах, которые не приводят к разрушению биополимерной структуры либо вымораживанием. Если в последнем случае контролировать количество так называемой незамерзающей воды посредством, например, ядерного

магнитного резонанса, то измерить его можно очень достоверно и точно. В науке о производстве продуктов питания все же пользуются более доступным и адекватным предмету измерением так называемой активности воды. Конкретные лабораторные методики ее измерения различны, но суть всех их состоит в том, что воду, находящуюся в различных формах связи с биомассой исследуемого образца, приводят в термодинамическое равновесие с ее насыщенным паром при атмосферном давлении. При этом считают, что та вода, объемное содержание которой в образце стало равным содержанию ее в окружающем насыщенном паре – свободная, то есть активная вода, соответственно, остальная является связанной. Показатель активности воды удобен своей инвариантностью по отношению к формам связи воды, которые по классификации академика П. А. Ребиндера, различаются энергией связи [10]. Эта классификация основана на положении, что связь в той или иной форме можно нарушить подводом соответствующего удельного количества энергии, эквивалентом которой является теплота.

Изучение механизмов и закономерностей взаимодействия воды с веществами не образующими истинных водных растворов, является предметом коллоидной химии. Для биологических систем невозможно точно установить по какой-либо одной обобщенной характеристике, какая часть воды связана в них той или иной формой связи. Поэтому специальная подготовка воды для гидратации биомассы всегда желательна. Когда молекулы воды не входят в состав структуры воды, то они легче вступают в реакцию гидратации с молекулами других веществ. Гидратационная способность воды по отношению к другим веществам зависит от соотношения содержания в ней структурированной и свободной фаз. Это соотношение может меняться в сторону увеличения последней при нагревании воды, когда структура разрушается под действием теплового движения отдельных молекул воды, либо при использовании других методов дезинтеграции. Но, за счет чего бы ни были разрушены водородные связи, когда исчезает источник энергии дезинтеграции, они снова начинают восстанавливаться в количестве, соответствующем термодинамическому равновесию, отдавая поглощенную энергию в виде тепла самогидратации:



где: m – число молекулярных водных ассоциатов, вступающих в реакцию; n – число молекул воды, составляющих их устойчивый ассоциат; N_A – число Авогадро.

Поскольку теплота парообразования воды равна 44 кДж/моль, то вода может быть деструктурирована путем нагрева в жидком состоянии. Однако там, где целью является повышение степени гидратации биополимеров, которые сами по себе неустойчивы к термической денатурации, тепловой механизм разрушения водородных связей неприемлем. Недопустимо смешивание нагретой воды с биомассой, пространственные структуры которой сформированы связями того же уровня энергии, что и водородные [10, 11]. Известно много способов направленного разрушения структуры воды без нагревания. К ним можно отнести все способы механического воздействия на воду,

например, обработку в коллоидной мельнице или в специальном дезинтеграторе роторного или дискового типа [12]. Существуют способы, в которых для передачи энергии в воду используется полярность ее молекул. К ним относится пропускание потока воды через сильное магнитное поле или воздействие на нее переменным электромагнитным полем, а также в процессах основанных на явлениях обратного осмоса и кавитации [13-17]. Исследователи, используя обработанную последними способами воду для замеса хлебопекарного теста, установили, что при этом снижается толщина гидратных оболочек белковых молекул при их формировании, способствуя их коагуляции с образованием новой, более эластичной структуры белка клейковины. Это подтверждает гипотезу гидратационной структуризации белка [18] (рис. 3), так как при уменьшении толщины гидратных оболочек биомакромолекул увеличивается плотность заряда на их поверхности, что приводит к более сильной связи между собой оболочек противоположно заряженных активных центров отдельных белковых молекул.

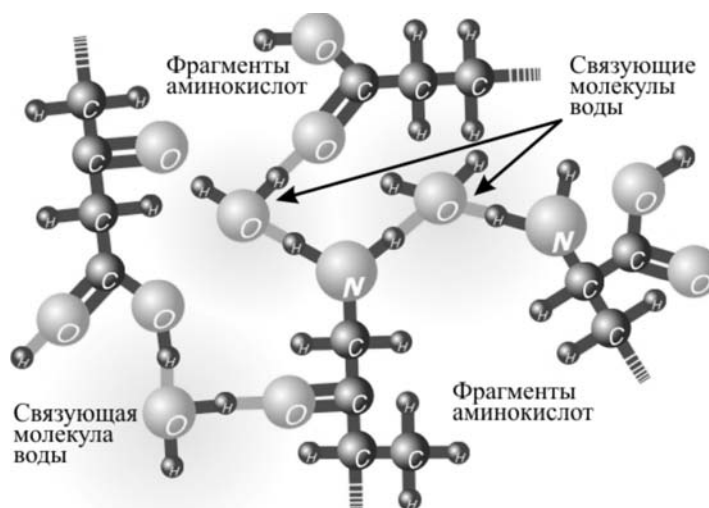


Рис. 3. Гидратационная структуризация белка

Известно, что при низкой активности ионов водорода анионные группы составляющих молекулы белка аминокислот дегидратируются сильнее, чем катионные при высокой. Поэтому общее содержание связанной белком воды с увеличением значения водородного показателя тоже увеличивается. В пищевой и фармацевтической промышленности для этого иногда применяют электрохимическую обработку слабоминерализованной воды в мембранном электролизере, используя для гидратации щелочную фракцию диализа [15]. Перечисленные примеры являются способами повышения растворяющей способности воды за счет изменения ее энергетического состояния путем надтепловой трансформации в ней энергии различной природы, временно выводящей ее из состояния термодинамического равновесия. При сонохимическом воздействии кинетика процессов, сопровождающих трансформацию энергии совершенно иная, а преимущество состоит в том, что исходный химический состав воды не имеет значения. Наоборот, вода может содержать растворенные в любом количестве или взвешенные вещества при этом они не будут потеряны в процессе дезинтеграции, как в случае мембранной очистки и не образуют

нежелательных химических соединений, как при электролизе. Последнее особенно важно, поскольку для получения лекарственных препаратов биологически активных веществ и пищевых продуктов полноценного качества их минеральный состав и содержание полезных микроэлементов лучше всего регулируется посредством предварительного растворения во входящей в их состав воде. Кроме того, известно, что ультразвуковая кавитация в воде, водном растворе, суспензии или эмульсии ускоряет и делает эффективнее все происходящие там процессы, в том числе и растворение, при котором ионы растворенных веществ, на которые они диссоциируют, приобретают плотные гидратные оболочки, снижающие возможность вступать в нежелательные химические реакции [16-21].

ОБОРУДОВАНИЕ СОНОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ И РАСТВОРОВ ДЛЯ ГИДРАТАЦИИ ПРОТЕИНОВ

Аппараты «Сиринкс»

В России и Европе запатентована гидратация протеинов мясного фарша сонохимически обработанной водой при амплитуде звукового давления в 2 – 23 раза превышающей гидростатическое давление в ней. Это же известно из технической и патентной литературы, посвященной предназначенным для этого аппаратам типа «Сиринкс» [22-26] (рис. 4).



Рис. 4. Российские аппараты типа «Сиринкс» для обработки используемых в пищевом производстве воды и водных растворов. В стойке слева находятся три кавитационных реактора по 2 кВт, производительностью по 0,3 м³/ч, а в стойке справа один реактор 4 кВт, производительностью 0,6 м³/ч вместе с источником питания германской фирмы *Hielscher systems GmbH*

Такая сонохимическая обработка направлена на увеличение содержания синтезируемой в результате кавитационного процесса перекиси водорода, которая, разлагаясь в биомассе с выделением энергии, ускоряет ее «созревание» и снижает в ней активность бактерий. Но, как известно, синтезу H_2O_2 в сонохимии предшествует диссоциация воды на являющиеся сильными катализаторами гидролиза жиров ионы водорода и гидроксилы [27-29], остаточное содержание которых всегда будет присутствовать в обработанной воде. Поэтому из-за существования жирового компонента в биомассе при смешивании ее с рассолом будет происходить гидролиз жиров. А поскольку распад перекиси водорода имеет окислительный характер, то выделяемый кислород может окислять жиры и образующиеся в результате их гидролиза свободные жирные кислоты [30]. Это вместе с усилением гидратации белковой составляющей пищевого сырья может привести к ускоренной порче его жировой составляющей, ухудшению вкусовых качеств и снижению сохраняемости получаемого продукта.

Новые кавитационные реакторы для пищевой сонохимии

Исходя из этого, одной из первоочередных задач разработки реакторов для пищевой сонохимии стало исключение или сокращение, там, где это требуется, образования перекисных соединений за счет выбора интенсивности сонохимического воздействия. В связи с этим в Московском государственном университете технологий и управления им. К. Г. Разумовского был экспериментально определен безопасный в этом отношении порог интенсивности ультразвука. Было установлено, что кавитация в воде при амплитудах звукового давления не выше двух значений гидростатического давления в ней [31] не приводит к образованию перекисных соединений в таких количествах, которые могут быть определены официальными методами замера перманганатной окисляемости воды. Значение кавитационного порога по величине приблизительно равно разности гидростатического давления и давления паров воды при температуре процесса, которая не выше комнатной. Рассеиваемая на кавитации часть энергии плоской ультразвуковой волны ограничена максимальным значением, которое соответствует приблизительно трехкратному превышению амплитудой звукового давления кавитационного порога в воде, а при неограниченном росте интенсивности ультразвука растет только кинетическая составляющая энергии кавитации, которая не влияет на сонохимический синтез перекиси водорода [21]. Энергия термической диссоциации воды, происходящей при кавитации в ее газовой фазе, заполняющей кавитационные пузырьки, превышает энергию водородных связей молекул воды между собой в жидкой фазе более чем на порядок. Поэтому повышение растворяющей способности воды, не сопровождающееся диссоциацией ее молекул на ионы, физически возможно и должно лежать в области порождающего кавитацию звукового давления с амплитудой 1...2 значения гидростатического давления в ней или растворе на ее основе. Электроакустический излучатель используемого реактора при номинальной потребляемой электрической мощности обеспечивает, с учетом отражения акустической

волны от рефлектора, абсолютную величину амплитуды звукового давления в насыщенном растворе натрия хлорида (при атмосферном давлении) равную 198 $\kappa\text{Па}$. То есть, амплитуда звукового давления превышает гидростатическое давление в реакторе, через который рассол свободно подается перистальтическим насосом. Госстандартом России типовариантный ряд таких реакторов мощностью от 0,4 до 4,0 $\kappa\text{Вт}$ по ТУ 5130-002-26784341-2008 «Реакторы кавитационные типа РКУ для обработки жидких пищевых сред» [32] разрешен к производству для использования в составе технологических аппаратов пищевой промышленности (рис. 5) на что был выдан сертификат соответствия РОСС RU.TM05.B01457.

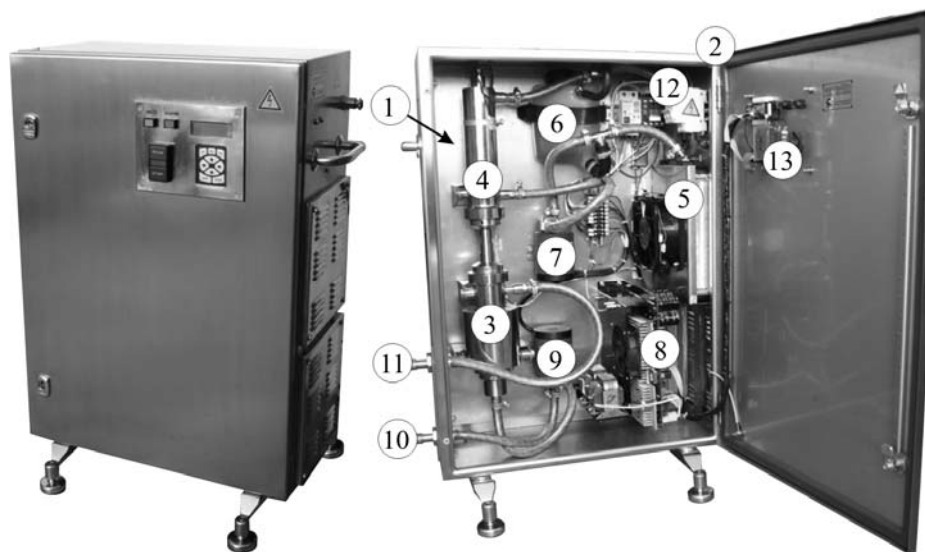


Рис. 5. Установка сонохимической обработки растворов посолочных веществ, используемых в изделиях из рубленого мяса, с реактором по ТУ 5130-002-26784341-08: 1 – несущая платформа; 2 – кожух; 3 – кавитационный реактор; 4 – преобразователь магнитострикционный; 5 – радиатор; 6, 7 – элементы системы охлаждения; 8 – генератор ультразвуковой; 9 – насос; 10, 11 – заборный и расходный штуцеры.

После обработки в таком реакторе водных растворов гуминовых кислот, их перманганатная окисляемость не изменяется. То есть, эти легко окисляемые органические кислоты не трансформируются в перекисные соединения путем присоединения кислорода, как это происходит с водой при синтезе H_2O_2 [33]. Отсюда следует, что и перекись водорода также не синтезируется или синтезируется в пренебрежимо малых для стандартного метода анализа количествах. Растворяющая же способность обработанной в том же режиме воды в отношении натрия хлорида увеличилась в 1,7 раза (рис. 6).

Таблица 1. Результаты обработки растворов гуминовых кислот

Показатель	До обработки	После обработки	Метод испытаний
pH, <i>единиц</i>	7,2	7,3	ИСО 10523
Окисляемость перманганатная, <i>мг/л O₂</i>	5,2	5,2	ИСО 8467
Танины, лигнины, <i>мг/л</i>	0,4	0,4	МИ 8193

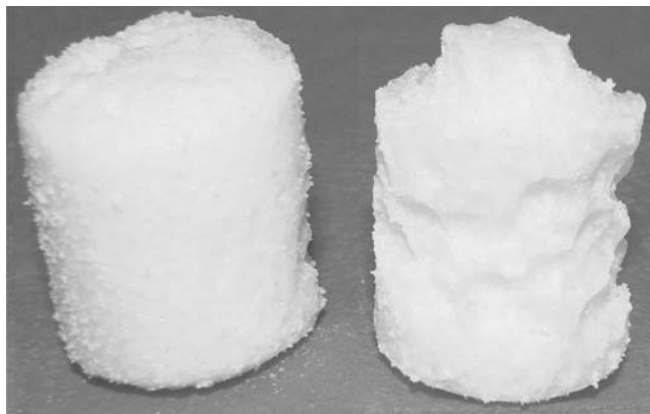


Рис. 6. Образцы таблетированного $NaCl$ после равного по времени пребывания в обычной (слева) и сонохимически обработанной воде (справа) при одинаковой температуре

Кроме того, выяснилось, что сохраняются и бактериостатические свойства обработанной воды, которые исследовались по известной методике [34].

Таблица 2. Жизнеспособность микроорганизмов в сонохимически обработанной воде и ее абсолютная вязкость по сравнению с обычной водой (контроль)

Время после 5 мин обработки	Абсолютная вязкость, $cП$	Жизнеспособность микроорганизмов по тесту из [34]
Два часа	$0,971 \pm 0,008$	0,630
Одни сутки	$0,987 \pm 0,004$	0,849
Контроль	$1,019 \pm 0,007$	1,760

Однако, как отмечают исследователи в этой области знаний, эксперименты в ней, отличаются низкой повторяемостью результатов, а физические модели аппаратов, на которых они производились, трудно поддаются «масштабированию» [35] особенно при попытках увеличения производительности. Поэтому проблема создания надежных промышленных аналогов пока остается подлежащей решению.

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ НОВЕЙШЕГО ПРОМЫШЛЕННОГО РЕАКТОРА

Назначение и возможные варианты конструкции

Реактор предназначается для физико-химической обработки акустической кавитацией истинных и коллоидных растворов, а также дисперсных систем (эмульсий и суспензий) путем инициирования в них сонохимических реакций и кавитационной эрозии их фаз. Кроме таких растворов, эмульсий и суспензий в нем могут обрабатываться химически чистая вода и другие химически чистые растворители. В нем должно осуществляться воздействие на состояние жидкостей, интенсификация идущих в них химических реакций и инициирование новых путем изменения диполь-дипольных и ион-дипольных взаимодействий в их средах и фазах, а также повышение дисперсности многофазных систем, бактериолиз и бактериостаз. В кавитационном реакторе механизм передачи энергии в жидкость носит «надтепловой» характер, инициируя в ней процессы, свойственные химии высоких энергий, когда жидкая среда выводится на определенное время из состояния термодинамического равновесия. Это позволяет на это время возврата к равновесному состоянию аккумулировать, например, в воде или водных

растворах определенное количество энергии и в последствии отдавать ее в виде тепла, выделяющегося при гидратации растворенных компонентов и диспергированных фаз либо самой себя восстановлением надмолекулярной структуры. Процесс носит название релаксации неравновесного состояния. Такой реактор также может быть использован в фармацевтике, пищевой и химической промышленности, в производстве топлив и строительных материалов [36].

Реактор может быть выполнен в двух вариантах:

1. Симметричного относительно центра масс реактора, состоящего из несущего корпуса рабочей камеры, с каждой стороны которого расположены излучатели плоско-упругих волн, представляющие собой соединенные с согласующими понижающими акустическими трансформаторами из титанового сплава электроакустические конвертеры MPI 5050F-20L, питающиеся каждый от своего источника (ультразвукового генератора) электрической мощностью до 1000 Вт. То есть, их колебания при работе независимы друг от друга.

2. Симметричного относительно центра масс реактора, состоящего из несущего корпуса рабочей камеры, с каждой стороны которого расположены те же излучатели плоско-упругих волн, но питающиеся от общего источника (ультразвукового генератора) электрической мощностью до 2000 Вт. То есть их колебания при работе когерентны.

Проект, технические расчеты и моделирование

Разработанный реактор (рис. 7) состоит из корпуса 1, акустических трансформаторов 2, герметично с помощью эластичных прокладок закрепленных в нем посредством фланцев 3 в узлах колебательных смещений. Фланцы стянуты между собой стяжками 4, образуя с корпусом и трансформаторами герметичный рабочий объем для пропускания через реактор обрабатываемой жидкости. Источники колебаний – электроакустические преобразователи 5 соединены с трансформаторами посредством шпилек.

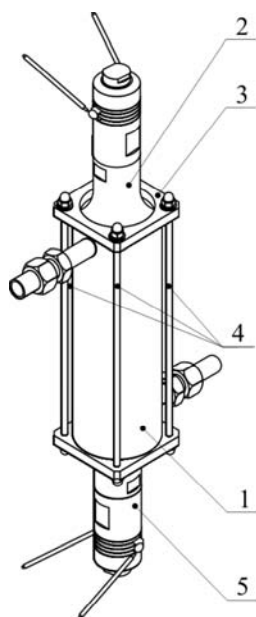


Рис. 7. Кавитационный реактор компании *Oil Tech Production OY*: слева – конструкция реактора; справа – фото опытного образца



Обрабатываемая жидкость пропускается через рабочий объем посредством напорного и сливного патрубков, вваренных в корпус. Патрубки вварены в корпус так, чтобы при работе между обращенной внутрь рабочего объема плоской поверхностью трансформатора (излучающей поверхностью) и водой не могла образоваться воздушная прослойка. Патрубки соединяются с магистралью обрабатываемой жидкости посредством фитингов из нержавеющей стали. Напорным является нижний патрубок, а сливным – верхний. Реактор собирается в кожухе, внутри которого размещены кулеры для воздушного охлаждения преобразователей 5, выделяющих при работе в тепло около 100 Вт энергии каждый.

Реактор является реактором плоской волны и рассчитан при гидростатическом давлении в жидкости равном атмосферному. Таким образом, средняя объемная плотность эрозионной мощности кавитации в его рабочем объеме описывается пропорцией и вычислена «методом цилиндрических оболочек»:

$$M \sim \frac{8}{D^2 H} \int_0^H \int_0^{0,5D} x (\Delta p_{x,y})^2 dx dy, \quad (2)$$

абсолютная производительность по воде:

$$Q = Q_{et} \frac{MV}{M_{et} V_{et}}, \quad (3)$$

а эрозия контактирующих с водой внутренних поверхностей – пропорционально интегральному значению объемной плотности эрозионной мощности E на них:

$$E = 2\pi \int_0^R x (\Delta p_{x,0}^2 + \Delta p_{x,H}^2) dx + \pi D \int_0^H \Delta p_{0,5D,y}^2 dy, \quad (4)$$

где: Q_{et} – паспортная производительность эталонного реактора по воде, равная 0,6 м³/ч [26]; V – объем рабочей камеры реактора; $\Delta p_{x,y}$ – относительное мгновенное значение возмущения давления от кавитации в любой точке воды на диаметральной плоскости объема реактора, вычисляемое как в [37]; D – внутренний диаметр корпуса реактора; H – расстояние между излучающими поверхностями акустических трансформаторов или излучающей и отражающей поверхностью; x – координата по D ; y – координата по H .

Зависимость модуля результирующей амплитуды звукового давления в реакторе в линейном приближении выражена через число пучностей волны n , в которых образуется кавитация, коэффициент рассеяния энергии колебаний на кавитации η [38], коэффициент отражения волны θ [39] и амплитуду звукового давления на поверхности при излучении в полупространство жидкости A_0 [40]:

$$A = A_0 \sqrt{\frac{\left| b^{\frac{2\phi}{\pi}} \sin 2\pi f t + \theta b^{4n-2\frac{\phi}{\pi}} \sin 2\pi f t \right| \left| b^{\frac{2\phi}{\pi}} \sin 2\pi f t + b^{2n-2\frac{\phi}{\pi}} \sin 2\pi f t \right| + \left| b^{\frac{2\phi}{\pi}} \sin 2\pi f t + b^{2n-2\frac{\phi}{\pi}} \sin 2\pi f t \right| \left| b^{\frac{2\phi}{\pi}} \sin 2\pi f t - b^{2n-2\frac{\phi}{\pi}} \sin 2\pi f t \right|}{2}} \quad (5)$$

где $b = 1 - \eta^{0,5}$, при одном источнике колебаний (эталон), двух одинаковых источниках когерентных колебаний (вариант 1) и двух одинаковых источниках некогерентных колебаний (вариант 2), соответственно. Координаты границ занимаемых кавитационными областями объемов $v_i = h_i \cdot S$, где S – площадь фронта волны, на луче волны в угловых единицах фазы ϕ определены как положительные корни трансцендентного уравнения $A(\phi) = 1 \text{ атм}$, а их высоты на луче результирующей волны – как разность четных и нечетных его корней. В линейные единицы они переведены путем деления на волновое число $2\pi/\lambda$. Графически функции звукового давления в полученной суперпозиции волн в воде внутри реакторов показаны на рис 8.

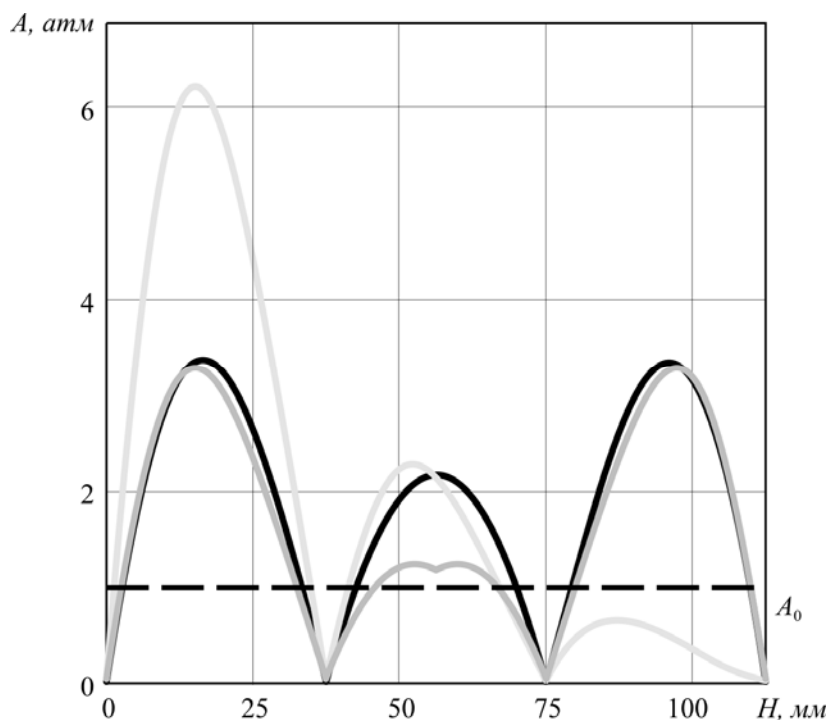


Рис. 8. Звуковое давление на луче результирующей волны в воде внутри рабочего объема реактора: — в эталоне; — в варианте 1; — в варианте 2

Полученные в результате математического моделирования и расчета значения приведены в таблице 3 и изображены на рис. 9, где тоновыми рисунками показаны распределения объемной плотности эрозионной мощности кавитации в диаметральной плоскости вариантов реактора и эталона, в качестве которого выбран реактор аппарата, показанного на рис. 4 справа [26].

Таблица 3. Результаты компьютерных экспериментов

ОБЪЕКТ	Потребляемая электрическая мощность, Вт	Рабочий объем, л	Относительная эрозия поверхностей	Производительность по воде, м ³ /ч
Эталон	4000	0,684	1	0,60
1	2×1000	0,566	1,4	0,66
2	2000	0,566	1,8	0,86

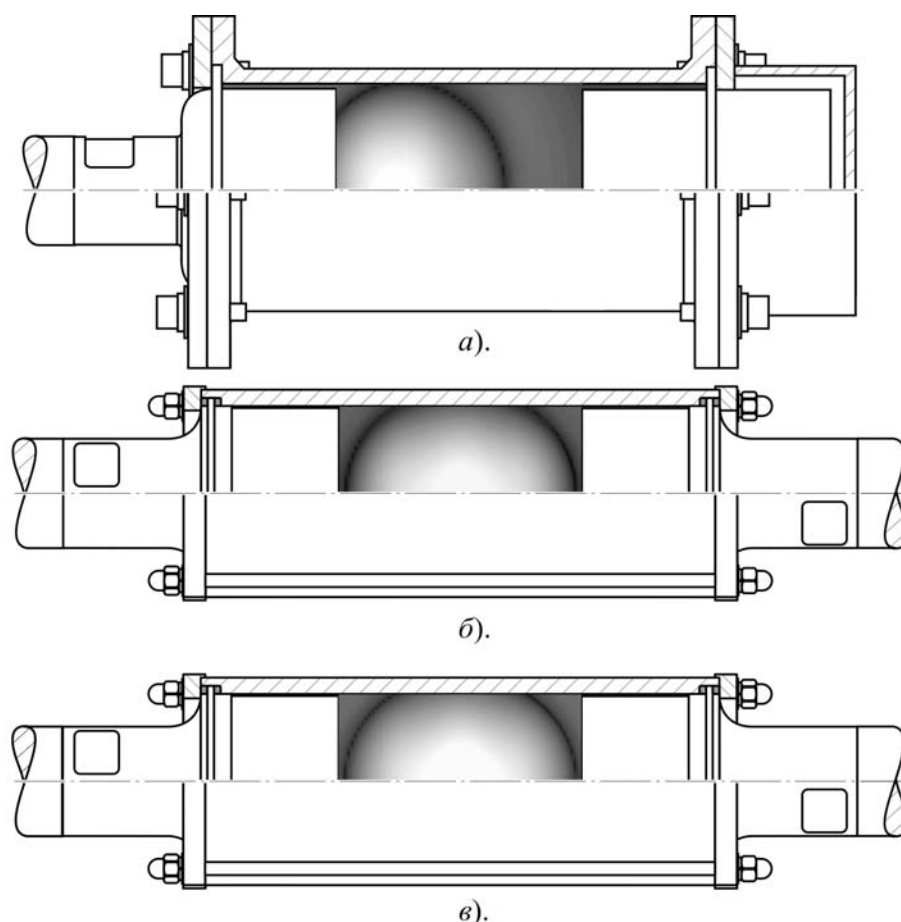


Рис. 9. Чертежи общего вида вариантов реактора и эталона с картинками распределения объемной плотности эрозионной мощности кавитации в их диаметральных сечениях: *а* – эталон; *б* – вариант 1; *в* – вариант 2

Анализ известных аналогов реактора на пригодность к пищевой сонохимии

Ниже приведено описание известных из патентной и технической литературы аналогов разработанного реактора, которые могут быть применены по тому же назначению. Типичным примером известной классической конструкции реактора является, например, устройство, запатентованное в США почти полвека назад и названное «вибрационным устройством» [41]. Оно оснащено отражающей стенкой, смонтированной так, что ее обращенная в обрабатываемую жидкость поверхность находится в одной плоскости с поверхностью излучателя ультразвука, окружая ее. То есть поверхность фронта ультразвуковой волны, содержащего поверхность ее излучателя, совпадает с обращенной в жидкость поверхностью этой стенки. Вторая отражающая стенка, находящаяся напротив первой и излучателя волны по направлению ее распространения, является частью корпуса устройства. Энергия кавитации является причиной эрозионных разрушений твердых материалов [42], из которых изготовлены элементы конструкции кавитационного реактора. Продукты эрозии, попадая в обрабатываемую жидкость, могут необратимо изменить ее химические свойства, что категорически не допускается при обработке лекарственного и пищевого сырья, а также самих медицинских препаратов и продуктов питания. Поскольку

противолежащая излучателю отражающая стенка описанного реактора является частью жесткого корпуса, она не может полностью отразить упругую волну и ее колебания частично передаются корпусу, что ведет к потерям энергии и кавитационной эрозии, которая возникает вблизи нее.

Существует реактор с отражающей стенкой, между которой и корпусом размещена эластичная прослойка, поглощающая проникающую в нее часть ультразвуковой волны и рассеивающая ее на внутреннем трении [43]. Таким образом, жесткая механическая связь отражающей стенки и корпуса отсутствует, что позволяет рассеять часть энергии ультразвуковой волны в прослойке, снизив диссипацию энергии части упругой волны на кавитации вблизи нее. Но стенки камеры могут подвергаться воздействию образующейся в объеме жидкости кавитации.

Есть конструкция кавитационного реактора [44], размер корпуса которого в плоскости любого фронта упругой волны строго определен [21]. Стенки корпуса расположены в нем в местах, где плотность потенциальной энергии кавитации теоретически равна нулю. Эрозия стенок корпуса в таком реакторе должна быть исключена. В реакторе [45] осуществлено выравнивание по величине амплитуд колебаний жидкостей у отражающей стенки и самой этой стенки путем подбора акустического сопротивления поглощающего материала прослойки между ней и корпусом. Но выравнивание амплитуд колебаний излучателя, отражающей стенки и жидкости вблизи них здесь достигнуто за счет организации режима, подобного по энергетике режиму бегущей волны, когда вся падающая на стенку волна проходит сквозь нее, не отражаясь назад, внутрь реактора, а стенка названа отражающей лишь условно. Энергия, переданная волной через нее в прослойку, рассеивается на внутреннем трении в материале, из которого она изготовлена. Таким образом, исключение эрозии материала реактора достигается здесь за счет потери части энергии волны излучаемой в жидкость ее источником. А рассеянная в прослойке энергия превращается в тепло, которое постепенно нагревает жидкость и, снижая в ней порог кавитации, уменьшает интенсивность последней [42]. Это частично устранено в акустической ячейке реактора [46], где противолежащая излучателю стенка представляет собой твердотельный механический элемент с нулевой реактивной составляющей акустического импеданса и высокой механической добротностью. Это позволяет избежать теплового рассеяния, так как мощность, эквивалентная рассеиваемой на внутреннем трении, с ее помощью трансформируется в реактивную мощность, которая может быть компенсирована на электрической стороне входящего в состав источника ультразвука электроакустического преобразователя, который акустически связан с жидкостью и реактивным звукопоглотителем в единую колебательную систему. Но все же часть этой системы обращает часть мощности колебаний в реактивную мощность, то есть выводит ее из кавитационного процесса в другой ее части – в жидкости.

Такой недостаток отсутствует в реакторе, где все части колебательной системы акустической ячейки твердотельные [47, Fig. 2]. В его конструкции поверхность

обращенной к излучателю отражающей стенки и сама излучающая поверхность принадлежат общему твердотельному резонатору с частотой резонанса равной частоте колебаний излучающей поверхности и размещены вблизи пучностей колебательных смещений, находящейся между ними жидкости на частоте резонанса ее колебаний. Расстояние между плоскостями резонатора, с которых в жидкость распространяются колебания, равно длине их волны в жидкости. А расстояние между находящимися вблизи них пучностями колебательных смещений твердотельного резонатора указано равным половине длины волны в металле. То есть, эти плоскости совершают в жидкости колебания в противоположных направлениях. Используя метод сложения встречных волн, в которых возможна кавитация, изложенный в [40], можно вычислить, что в этом случае средняя по высоте реактора амплитуда звукового давления в жидкости в нем составит 87% от средней амплитуды звукового давления в каждой из волн от таких поверхностей, если бы они излучались в бесконечное полупространство. Значит, мощность кавитации не является максимально возможной, которую можно было бы получить от имеющихся источников колебаний.

Выводы из анализа в отношении требующейся конструкции

Было установлено, что в воде плоско-упругая волна отдаст способную породить кавитацию энергию на расстоянии не более трех полуволн [48]. Учитывая, что на длине половины волны колебаний в металле укладывается три полуволны колебаний той же частоты в жидкости, становится ясно, что не имеет смысла делать высоту рабочего объема акустической ячейки реактора с колеблющимися в противоположных направлениях излучающими поверхностями больше 1,5 длин волны упругих колебаний жидкости. Тогда высота рабочего объема должна быть точно равна половине длины волны колебаний металла на той же частоте. Такие условия проще выполнить, когда колебательная система акустической ячейки является симметричной относительно центра масс, то есть, источники колебаний (преобразователи) расположены по обе стороны объема обрабатываемой жидкости в реакторе. Известно [49], что геометрически симметричная относительно своего центра масс система упругих колебаний лучше удерживает резонанс. Образования кавитационной эрозии излучающих поверхностей при этом практически не будет. Пользуясь математической моделью кавитации и принципом подобия кавитационных процессов [37] можно сравнить такой реактор с эталоном, конструкция которого показана на рис. 9а, путем постановки вычислительного эксперимента, результаты которого приведены в таблице 3. Из нее видно, что у вариантов реактора при меньшей, чем у эталона мощности источников колебаний и меньшем объеме камеры производительность обработки воды больше, причем даже при некогерентном излучении упругих волн источниками. Поскольку получаемые в результате сонохимической обработки свойства воды и растворов на ее основе – результат вывода их из термодинамического равновесия, а неравновесное состояние быстро релаксирует, то спроектированный реактор лучше всего использовать в рециркуляционной схеме непрерывающейся

обработки (рис. 10). Пряток ее такой: установить трехходовой кран в положение циклической перекачки жидкости через реактор и включить насос и ультразвуковой генератор. Отбираемая порция обработанной жидкости из резервуара может сливаться в приготовленную емкость, путем соответствующего переключения трехходового крана, не прерывая работы ректора.

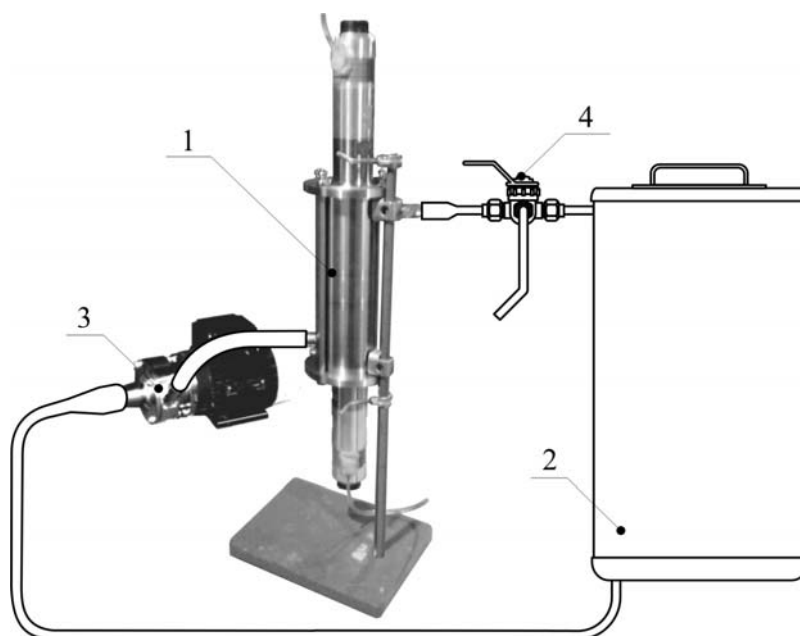


Рис. 10. Примерная рециркуляционная схема использования любого из вариантов реактора: 1 – реактор; 2 – резервуар для обрабатываемой жидкости; 3 – насос; 4 – трехходовой кран

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный на основе модели многопузырьковой кавитации и теории подобия кавитационных процессов кавитационный реактор с симметричной немонолитной колебательной системой акустической ячейки соответствует всем требованиям пищевой сонохимии [6]. При этом его конструкция обеспечивает повышенную по сравнению с известными аналогами производительность сонохимической обработки, что позволяет надеяться на решение с помощью использованных методов проектирования присущей сонохимии проблемы масштабирования аппаратов при создании их промышленных моделей. Важно то, что эрозионные разрушения элементов конструкции реактора поддаются учету при проектировании и могут быть минимизированы. Абсолютная загрязненность обрабатываемой жидкости не увеличивается, еще и потому, что скорость ее движения через реактор возрастает вместе с его производительностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маргулис М. А. Основы звукохимии. Химические реакции в акустических полях. М: Высшая школа, 1984.
2. Jinesh K. B., Frenken J. W. M. Experimental evidence for ice formation at room temperature // *Physical Review Letters*, 101, 2008, 036101.
3. Шестаков С. Д. Акустическая задача инерциального термоядерного синтеза в кавернах, Деп. в ВИНТИ, 2007, №532-B2007.
4. Ashokkumar M., Krasulya O., Shestakov S. and Rink R. A New Look at Cavitation and the Applications of Its Liquid-Phase Effects in the Processing of Food and Fuel// *Applied Physics Research*, V.4, 1, pp. 19-29, February 2012.
5. Тихомирова Н. А. и др. Исследования России и Австралии в области сонохимических технологий продуктов питания становятся совместными // Материали за VII международна научна практична конференция «Найновите постижения на европейската наука – 2011», Т.35, Химия и химически технологии, София, «Бял ГРАБ-БГ» ООД, 2011, с. 64-77.
6. Шестаков С. Д., Красуля О. Н. Исследования и опыт применения сонохимических технологий в пищевой промышленности // *Электронный журнал «Техническая акустика»*, <http://www.ejta.org>, 2010, 10.
7. http://www.premium.ecoworld.ru/laur_2005.html
8. Water relations of foods / Edited by R.B. Duckworth.-London: Academic Press, 1975 (Вода в пищевых продуктах / Под ред. Р. Б. Дакуорта. М: Пищевая промышленность, 1980).
9. Владимир Вернадский: Жизнеописание. Избранные труды. Воспоминания современников. Суждения потомков. М: Современник, 1993.
10. Ребиндер П. А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Ч.2. М: Наука, 1979.
11. Deng Y. et al. Relationship between Thermal denaturation of porcine muscular proteins and water-holding capacity // *J. Food Sci*, 5, 67, 2002, pp. 1642-1647.
12. Михалкина Г. С., Петрова С. П., Харитонов В. Д. и др. Роторно-импульсные аппараты для производства эмульсионных продуктов // *Пищевая промышленность*, 4, 2000, с. 62-63.
13. Зайцев И. Д., Креч Э. И. Применение и познание временно активированной воды // *Химическая промышленность*, 4, 1989, с. 44-47.
14. Егоров Г. А. Активация воды – важный фактор эффективности помола // *Хлебопродукты*, 5, 2002, с. 22-23.
15. Борисенко А. А. Термогравиметрический анализ форм связи влаги в соленой говядине // *Мясная индустрия*, 7, 2001, с. 45-46.
16. Корчагин В. И. и др. Применение в хлебопечении временно активированной воды / *Хлебопечение России*, 5, 2000, с. 16-18.
17. Волохова Т. П., Панфилов В. А. Метод интенсивного кондиционирования // *Хлебопродукты*, 7, 2001, с. 34-35.
18. Шестаков С. Д. Энергетическое состояние воды и ее связываемость биополимерами пищевого сырья: Новые возможности // *Хранение и переработка сельхозсырья*, 4, 2003, с. 35-37.
19. Рогов И. А., Горбатов А. В. Физические методы обработки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1974.
20. Акопян В. Б. Ультразвук в производстве пищевых продуктов // *Пищевая промышленность*, 3, 2003, с. 51-55.
21. Шестаков С. Д. Основы технологии кавитационной дезинтеграции. М: ЕВА-пресс, 2001.

22. Шестаков С. Д., Панфилов В. А. Оптимизация режимов «созревания» реологически нестационарных пищевых сред с помощью программируемого вискозиметра // Хранение и переработка сельхозсырья, 7, 2006, с. 35-39.
23. Патент РФ 2245624, 2005.
24. Patent EP 1609368, 2007.
25. Патент РФ 2323578, 2008.
26. СИТБ. 443146.002 ТУ Аппараты «Сиринкс» для кавитационной дезинтеграции пищевых сред и воды. Технические условия.
27. Эльпинер И. Е. Биофизика ультразвука. М.: ИФ-МЛ, 1973.
28. Эльпинер И. Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие. М.: ИФ-МЛ, 1963.
29. Мэзон У. П. Физическая акустика. М: Мир, 1966.
30. Shestakov S. D., Polandova R. D., Volokhova T. P. Technologies of Cavitation Decomposition in Bread Production // 2-nd International Wheat Quality Conference. Manhattan, Kansas, 2001, pp. 229-231.
31. Патент РФ 2402909, 2010.
32. ТУ 5130-002-26784341-2008. Реакторы кавитационные типа РКУ для обработки жидких пищевых сред. Технические условия.
33. Шамб У., Сеттерфильд Ч., Вентворс Р. Перекись водорода. М.: ИИЛ, 1958.
34. Стехин А. А., Яковлева Г. В. Структурированная вода. Нелинейные эффекты. М: Издательство ЛКИ, 2008.
35. Mawson R., Knoerzer K. A brief history of the application of ultrasonics in food processing // 19th ICA Congress, Madrid, 2007.
36. Шестаков С. Д., Красуля О. Н., Ринк Р., Красуля Б. А., Бабак В. А. Усиление гидратации полярных компонентов растворов и дисперсных систем различного назначения с помощью ультразвуковой сонохимии // Материали за VII международна научна практична конференция «Achievement of High School – 2011», Том 28, Химия и химически технологии, 2011, София, «Бял ГРАБ-БГ» ООД, с. 23-33.
37. Shestakov S., Babak V. Mathematical Model of the Spatial Distributing of Density of Erosive Power of Multibubble Cavitation // Applied Physics Research, V.4, No. 1, February 2012, pp. 64-77.
38. Физика и техника мощного ультразвука. Мощные ультразвуковые поля // под ред. Л. Д. Розенберга. М: Наука, 1968.
39. Горелик Г. С. Колебания и волны. М: Ф-МЛ, 1959.
40. Шестаков С. Д., Бефус А. П. Формулирование критерия подобия сонохимических реакторов при обработке сред, не обеспечивающих акустического резонанса, Деп. в ВИНТИ РАН, №840-B2008, 2008.
41. Patent US 3519251, 1970.
42. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф., Кавитация. М.: Мир, 1974, 348 с.
43. Patent US 4618263, 1986.
44. RU 2209112, 2002.
45. Шестаков С. Д. К теории кавитационного реактора 2 // Труды XIII сессии Росс. акуст. об-ва, Т.1. М.: ГЕОС, 2003, с. 252-255.
46. RU 2392047, 2010.
47. EP 1810747, 2007.
48. Шестаков С. Д. Управление гидратацией биополимеров пищевых сред // в кн. Теоретические основы пищевых технологий / под ред. акад. В.А. Панфилова. М: КолосС, 2009.
49. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М: ИИЛ, 1956.