

# Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации процессов в газовых средах

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, К.В. Шалунова

(Бийский технологический институт (филиал))

ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»)

Широко используемые технологии не всегда могут удовлетворить растущие запросы промышленности по увеличению скорости, обеспечению экологичности и повышению качества выпускаемой продукции. Поэтому для решения возникающих задач приходится разрабатывать новые технологии, которых ранее не применяли. Примером могут служить технологии, основанные на использовании энергии акустических колебаний ультразвуковой частоты и высокой интенсивности. Одним из наиболее эффективных и перспективных направлений развития ультразвуковых технологий является интенсификация процессов, протекающих в газовых средах.

Среди известных технологий наиболее востребованы коагуляция, сушка, гашение пены.

Коагуляция различных аэрозолей, пыли и дымов для осаждения дисперсных частиц из воздушной среды с целью ее очистки от вредных примесей или получения готового продукта. В этой области отдельно остро стоит проблема осаждения периодически образующихся природных туманов, препятствующих посадке самолетов, движению автотранспорта, судоходству и т.д. Кроме аэрозолей природного происхождения, огромную опасность представляет аэрозольное загрязнение атмосферы в промышленных центрах, техногенные аэрозоли, образующиеся при взрывах, при добыче и переработке материалов, при техногенных катастрофах. Действенных средств и методов борьбы с этими аэрозолями сегодня не существует, что обуславливает актуальность и необходимость решения этой проблемы. При этом известно, что использование ультразвуковых колебаний позволяет, например, увеличить эффективность дымоулови-

тельных установок и довести их эффективность до 93-97% без применения электростатических или рукавных фильтров. Воздействие на туман позволяет в 15 раз сократить время его распада по сравнению со временем его естественного распада).

Сушка термочувствительных, термолабильных, взрывоопасных и легко окисляющихся продуктов. Воздействие ультразвуковых колебаний позволяет повысить качество конечного продукта и увеличить скорость процесса, снизить энергопотребление процесса, обеспечить сушку материалов без повышения температуры. Кроме того, обработка сельскохозяйственного сырья ультразвуковыми (УЗ) колебаниями высокой интенсивности благоприятно сказывается на физико-химических и потребительских свойствах высушиваемого продукта (сохранение вкусовых качеств продукции, увеличение срока хранения и всхожести семян и др.).

Гашение пены, образующейся в различных химико-технологических процессах. Применения ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для пеногашения исключает применение химических реагентов и контакт с разрушаемой пеной, что позволяет обеспечить стерильность конечного продукта. Ультразвуковая технология пригодна для пеногашения не только негорючих, но и легко воспламеняющихся жидкостей.

Перечисленные преимущества ультразвукового воздействия на газовые среды – основная причина все возрастающего интереса и спроса на акустическое оборудование для интенсификации процессов, протекающих в газовых средах.

Однако, несмотря на все преимущества интенсификации процессов в газовых средах с помо-

щью УЗ колебаний, основным фактором, сдерживающим широкое распространение ультразвуковых технологий в этой области, является отсутствие эффективных источников (излучатели и преобразователи) УЗ колебаний, пригодных для промышленного использования.

Используемые на практике в качестве источников УЗ колебаний динамические сирены или газоструйные излучатели гартмановского типа (принцип работы которых заключается в преобразовании энергии струи сжатого газа в энергию звуковых колебаний при ее истечении из сопла) характеризуются следующими существенными недостатками:

- низкая общая эффективность и КПД (не выше 20%);
- быстрое изнашивание механических узлов;
- невозможность работы на высоких частотах (более 20 кГц), что обуславливает необходимость защиты обслуживающего персонала от акустического излучения;
- необходимость использования компрессоров и большой расход сжатого воздуха;
- длительное время выхода на режим излучения, связанное с необходимостью создания потока газа, а в случае использования газогенератора – непродолжительное время работы.

Кроме того, существенным недостатком газоструйных излучателей является срыв генерации УЗ колебаний, связанный с тем, что в резонаторе противодавление достигает такой большой величины, при которой сверхзвуковой режим истечения оказывается невозможным и торможение струи происходит без образования скачка уплотнения [1]. Частая, бессистемная повторяемость подобных «срывов»

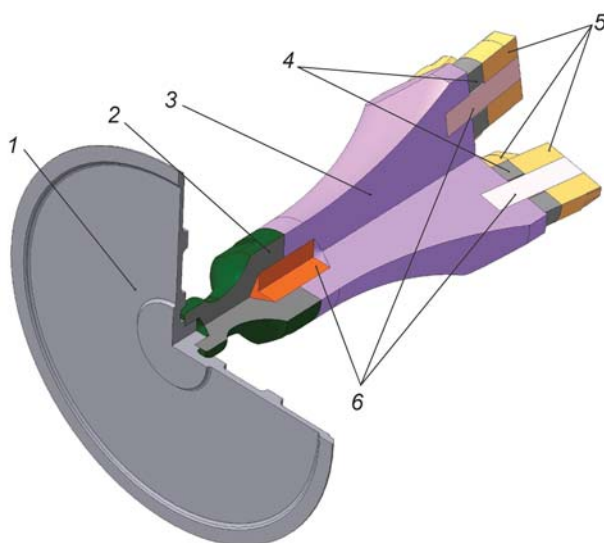


Рис. 1. Схематический вид УЗКС с двухполуволновым преобразователем:  
1 – дисковый излучатель; 2 – концентратор; 3 – преобразователь;  
4 – пьезоэлектрические элементы; 5 – задние отражающие накладки;  
6 – стягивающие шпильки

обуславливает невозможность генерирования стабильных (по фазе и частоте) гармонических УЗ колебаний. Это, в свою очередь, не позволяет осуществлять УЗ воздействие в максимально эффективных режимах (режимы стоячей волны и с резонансным усилением колебаний).

Перечисленные недостатки используемых источников УЗ колебаний препятствуют широкому распространению УЗ воздействия для интенсификации процессов в газовых средах и фактически делают невозможным его практическое применение.

В связи с этим предложено использовать разработанные и созданные в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института совместно с ООО «Центр ультразвуковых технологий» пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы (УЗКС). Новизной технического решения, положенного в основу разрабатываемых пьезоэлектрических УЗКС является использование излучающей поверхности специальной формы, которая обеспечивает преобразование энергии продольных колебаний пьезоэлектрического преобразователя в изгибные колебания титановых пластин или дисков, размеры и форму которых

выбирают из условия обеспечения необходимой частоты и направленности излучения УЗ колебаний [2].

Схематично конструкция УЗКС представлена на рис. 1. Разработанная УЗКС состоит из двухполуволнового преобразователя 3-6, концентратора 2, дискового излучателя 1. Поверхность диска 1 является источником УЗ колебаний. Изгибные колебания диска возбуждаются продольными колебаниями, создаваемыми пьезоэлектрическими элементами 4. Акустическая связь внутри УЗКС обеспечивается за счет того, что пьезоэлектрические элементы зажаты между преобразователем 3 и задней частотно-понижающей накладкой 5 с силой, многократно превышающей величину знакопеременной силы, создаваемой пьезоэлектрическими элементами. Стягивающее усилие обеспечивается задними частотно-понижающими накладками и шпильками 6.

Выбор излучателя дискового типа объясняется преимуществами подобных конструкций (высокий КПД; малые энергетические затраты, возможность формирования УЗ колебаний большой мощности, обеспечение перестройки частоты излучения за счет перехода с одной гармонической составляющей на другую).

При использовании плоского диска различные точки поверхности излучают колебания в противоположенных фазах, что приводит к тому, что на некотором расстоянии от диска происходит практически полная взаимная компенсация излучения. Для того чтобы исключить влияние этого фактора, необходимо искусственно снизить амплитуду колебаний участков диска, излучающих колебания в одной из фаз, например в «отрицательной». Этого можно добиться, увеличив толщину диска в указанных участках. В результате были созданы излучатели дисков ступенчато-переменного сечения. Интенсивность колебаний, создаваемых таким дисковым излучателем диаметром 340 мм на расстоянии 3...4 м, составляет 147...152 дБ [3].

В настоящее время на основе разработанной конструкции ультразвуковой колебательной системы были созданы ультразвуковые аппараты следующего назначения:

Ультразвуковые аппараты для коагуляции различных аэрозолей. В состав аппаратов входит пьезоэлектрическая УЗКС в металлическом корпусе с принудительным воздушным охлаждением с дисковым излучателем и генератор электрических колебаний ультразвуковой частоты с регулируемой выходной мощностью. Аппарат, показанный на рис. 2, предназначен для воздействия на газовые среды высокоинтенсивными акустическими колебаниями (более 150 дБ) [4]. Аппарат предназначен для



Рис. 2. Ультразвуковое оборудование для осаждения аэрозолей:  
1 – ультразвуковой генератор;  
2 – ультразвуковая колебательная система

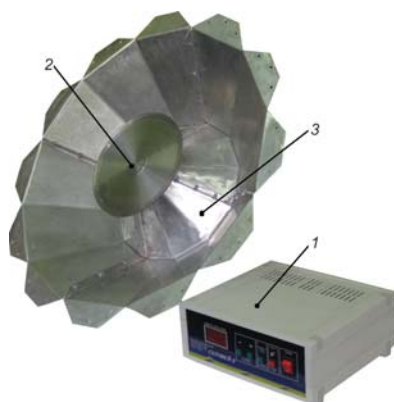


Рис. 3. Ультразвуковой аппарат для коагуляции аэрозолей  
1 – ультразвуковой генератор;  
2 – ультразвуковая колебательная система; 3 – отражатель

осаждения аэрозолей техногенного происхождения в замкнутых пространствах (например, в системах вентиляции зданий).

**Технические характеристики ультразвукового оборудования для осаждения аэрозолей**

Частота излучения, кГц	27	
Диаметр излучателя, м	0,25	
Интенсивность колебаний, дБ	Не менее 140	
Потребляемая мощность, Вт	Не более 350	
Масса колебательной системы с излучателем, кг	Не более 6	
Масса электронного блока, кг	Не более 3	

На рис. 3 представлена фотография ультразвукового аппарата, предназначенного для осаждения аэрозолей на открытых пространствах. В частности, разработанный аппарат можно использовать для разрушения туманов на взлетных полосах аэродромов и автомагистралях. Для использования энергии тыльной стороны дискового излучателя и увеличения суммарной площади излучения, аппарат снабжен отражателем, выполненным в виде двух пересекающихся конусов.

**Технические характеристики ультразвукового аппарата «Соловей»**

Частота излучения, кГц	24	
Диаметр излучателя, м	0,36	
Интенсивность колебаний, дБ	Не менее 150	
Потребляемая мощность, Вт	Не более 600	
Масса колебательной системы с излучателем, кг	Не более 8	
Масса электронного блока, кг	Не более 3	

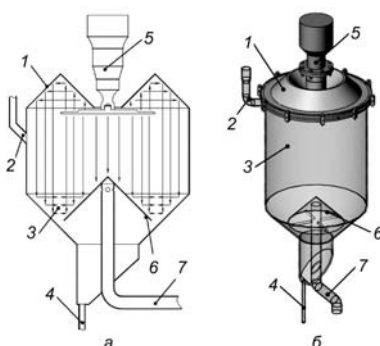


Рис. 4. Конструкция циклона с ультразвуковым излучателем:  
а – структурная схема циклона с УЗ излучателем; б – 3D-модель циклона с УЗ излучателем; 1 – верхний отражатель; 2 – входной патрубок; 3 – корпус циклона; 4 – отвод к бункеру; 5 – УЗ колебательная система; 6 – нижний отражатель; 7 – выходной патрубок

Создание таких аппаратов позволило разработать высокоэффективные камеры с резонансным усилением. Так в ООО «Центр ультразвуковых технологий» для повышения эффективности существующих систем пылеулавливания (например, традиционных циклонов) были разработаны устройства, уже содержащие источник ультразвуковых колебаний одного из описанных выше типов (рис. 4).

Усовершенствование циклона за счет введения в конструкцию источника УЗ колебаний и обеспечения резонансного режима позволило повысить эффективность процесса улавливания аэрозолей благодаря дополнительному эффекту УЗ коагуляции. На основе экспериментальных исследований было установлено, что введение в конструкцию циклона источника УЗ колебаний обеспечивает повышение эффективности традиционного циклона до 98% и возможность улавливания частиц микронного размера (0,01...1 мкм).

Существенным преимуществом разработанных устройств ультразвуковой коагуляции в газоочистных системах является возможность работы в агрессивных средах (газы), при высоких давлениях и температуре [5]. В этом случае единственное требование, предъявляемое к системе газоочистки, относится к материалу из которо-

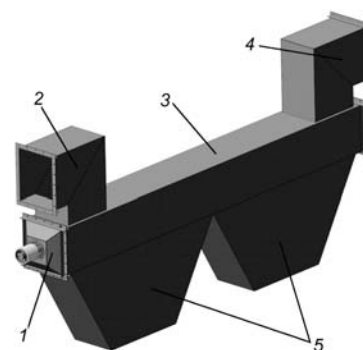


Рис. 5. Модель дымохода с установленными УЗ аппаратами для коагуляции аэрозолей на Бийской ТЭЦ:  
1 – ультразвуковая колебательная система; 2 – вход дымохода; 3 – дымоход (камера коагуляции); 4 – выход дымохода; 5 – бункер

го изготовлен технологический (рабочий) объем. Материал должен обладать химической стойкостью к воздействию агрессивных газов и высоким коэффициентом отражения УЗ волн.

В настоящее время ультразвуковое оборудование, разработанное в Бийском технологическом институте совместно с ООО «Центр ультразвуковых технологий», успешно применяется на практике пылеулавливания. Два ультразвуковых аппарата для коагуляции аэрозолей установлены в дымоходе (сечение 530×400 мм) Бийской ТЭЦ (рис. 5). Установка ультразвукового оборудования в дымоходе ТЭЦ позволила обеспечить степень очистки отходящего газа до 97%.

Три ультразвуковых аппарата для коагуляции аэрозолей были

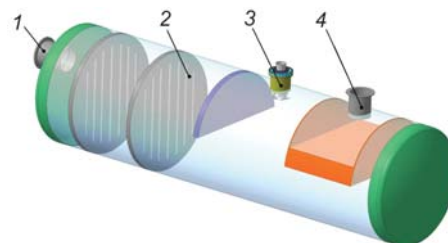


Рис. 6. 3D-модель сепаратора  
1 – выходной патрубок; 2 – насадки; 3 – ультразвуковой излучатель; 4 – входной патрубок



Рис. 7. Ультразвуковое оборудование для сушки различных материалов: 1 – ультразвуковая колебательная система; 2 – ультразвуковой генератор

специально разработаны и установлены в сепаратор по заказу ООО «Сибирский научно-исследовательский проектный институт рационального природопользования» для коагуляции жидкостных включений в попутном газе. На рис. 6 показана 3D-модель сепаратора с установленным ультразвуковым оборудованием. В результате установки ультразвукового оборудования удалось уменьшить вынос жидкости (до 98%) из сепаратора за счет ее коагуляции и последующего улавливания укрупненных капель имеющимися в сепараторе насадками.

Таким образом, установлено, что применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности (ультразвуковая коагуляция) является перспективным способом повышения эффективности систем газоочистки. Введение источников ультразвуковых колебаний в системы газоочистки позволяет повысить степень очистки запыленного газа до 98%.

Кроме приведенных примеров практического применения непосредственную заинтересованность в использовании разрабатываемых излучателей для пылегазоочистки высказывают ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», ОАО «Сибэнергош», ООО «Экопромика», ОАО «Липецкий Гипромез», ОАО «Уралэлектромедь».

Ультразвуковые аппараты для сушки различных материалов. Еще одним перспективным направлением применения ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации процессов



Рис. 8. Внешний вид ультразвуковой сушильной установки:

1 – ультразвуковая колебательная система в корпусе; 2 – рабочий объем сушильной камеры; 3 – верхняя крышка-отражатель; 4 – воздухозаборник и нагревательное устройство; 5 – нижний отражатель; 6 – электронный генератор для питания УЗКС; 7 – система управления сушильной камерой

газовых средах является сушка различным материалов. На рис. 7 приведена фотография ультразвукового аппарата предназначенного для интенсификации процесса сушки. В комплектацию аппарата входит многопакетная пьезоэлектрическая УЗКС и электронный генератор, предназначенный для ее питания.

Отличительной особенностью УЗ аппарата, представленного на рис. 7, является способность генерировать УЗ колебания интенсивностью 130...150 дБ, поскольку только при этих значениях интенсивности УЗ сушка становится наиболее эффективной.

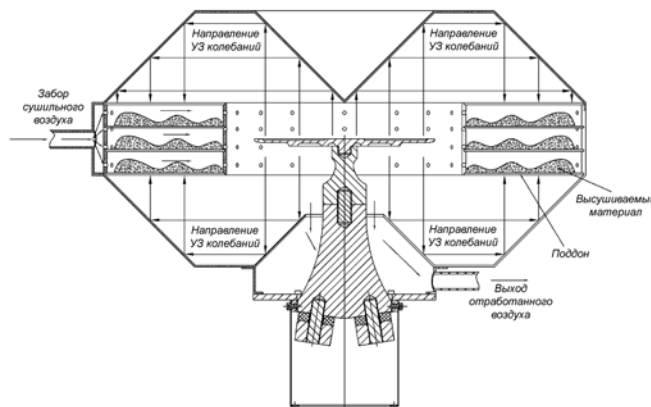


Рис. 9. Направление распространения ультразвуковых колебаний и воздушных потоков в объеме сушильной камеры

#### Основные технические характеристики УЗ аппарата для сушки материалов

Мощность, ВА	600
Питание от сети переменного тока напряжением, В	220 ± 22
Интенсивность колебаний (1 м), дБ	Не менее 150
Время непрерывной работы, ч	8
Габаритные размеры, мм:	
электронный генератор	270×400×110
колебательная система	Ш320×380
Диаметр излучателя, мм	320

Кроме создания ультразвуковых излучателей для сушки материалов, в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института проводятся работы, направленные на проектирование и создание конструкций малогабаритных УЗ сушильных камер специальной формы, обеспечивающих усиление УЗ колебаний. На рис. 8 показана фотография разработанной малогабаритной сушильной установки.

Форма сушильной камеры обеспечивает равномерное распределение УЗ колебаний, излучаемых обеими сторонами диска, по всей поверхности высушиваемого материала. Направления распространения УЗ колебаний и воздушных потоков в объеме сушильной камеры показаны на рис. 9. УЗ волны за счет двукратного отражения от стенок верхнего и нижнего отражателей камеры, представляющих двойной (внутренний и внешний) усеченный конус с наклоном образующей 45°, равномерно распределяются по кольцеобразному контейнеру с высушиваемым материалом [6].



Рис. 10. УЗ генератор с дисковым излучателем для работы в газовых средах:

1 – УЗ колебательная система;  
2 – УЗ генератор

Особенность разработанных УЗ сушилок заключается в том, что рабочий объем является резонансным и согласованным с УЗ излучателями, что позволяет без дополнительных энергозатрат повысить уровень звукового давления и соответственно повысить эффективность УЗ сушики. Достоинствами сушильной камеры являются простота конструкции, использование излучения обеих сторон диска, равномерность воздействия УЗ колебаний на высушиваемый материал и компактность сушилки.

Проведенные исследования разработанного УЗ оборудования позволили установить, что применение УЗ колебаний позволяет значительно интенсифицировать процесс сушки и снизить температуру сушильного агента. Последнее особенно важно для химических производств, где нагрев высушиваемого продукта недопустим.

В настоящее время малогабаритные УЗ сушилки, разработанные в Бийском технологическом институте, используют в фирмах PHARMATECH A.S. (Норвегия) для интенсификации процесса сушки желатиновых капсул, и в фирме Dooson co., Ltd (Южная Корея) для интенсификации процесса сушки женьшеня.

Ультразвуковые аппараты для гашения пены, образующейся в различных технологических процессах.

В состав УЗ оборудования входит УЗ колебательная система с излучателем дискового типа и электронный генератор, предназначенный для питания дискового излучателя [7]. Особенностью разработанного аппарата, представленного на рис. 10, является нали-

чие фокальной точки на оси, перпендикулярной плоскости диска и проходящей через его центр. Сила звука в этой точке достигает 160 дБ и выше, а вокруг этой точки уровень звукового давления достигает значений 140...150 дБ, что и требуется для эффективного воздействия на структуру пены, обеспечивающего ее разрушение.

Разработанное оборудование можно применять для интенсификации процесса осаждения пен в различных технологических процессах.

#### Основные технические характеристики ультразвукового аппарата «Афродита»

Мощность, ВА	200
Питание от сети переменного тока напряжением, В	220 ± 22
Интенсивность колебаний (1 м), дБ	Не менее 160
Время непрерывной работы, ч	8
Габаритные размеры, мм:	
электронный генератор	270×270×110
колебательная система	Ш210×150
Диаметр излучателя, мм	210

Разработанное оборудование было использовано при проведении экспериментов, связанных с разрушением пивной пены, что является актуальным при фасовке продукта в пластиковую или алюминиевую тару. Скорость разрушения пены в ходе экспериментов составила 20 см<sup>3</sup>/с. Были выявлены следующие особенности:

- для обработки больших объемов пены необходимо перемещать дисковый излучатель вдоль плоскости пены, а также вертикально по мере ее разрушения, что связано с наличием фокальной точки, где скорость разрушения пены максимальна;
- скорость разрушения пены с течением времени замедляется, что связано с насыщением верхних слоев жидкостью, образующейся в процессе разрушения пены.
- при воздействии на тонкие слои пены (менее 0,5 см), процесс пеногашения останавливается, поскольку акустический пучок проникает вглубь жидкой фазы, и из-за зарождения кавитации, вновь происходит формирования пены.

В ходе проведенных исследований было установлено, что применение УЗ колебаний высокой интенсивности является перспективным способом гашения пены

при реализации различных химико-технологических процессов. Введение источника ультразвуковых колебаний позволяет ускорить процесс пеногашения до 20 см<sup>3</sup>/с.

Таким образом, разработанные УЗ аппараты и опыт успешного применения их на практике подтверждают высокую эффективность использования УЗ колебаний для интенсификации процессов в газовых средах, что позволяет применять УЗ оборудование для решения различных задач (осаждение дисперсных частиц, сушка материалов, разрушение пены) в химико-технологических процессах.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

#### Список литературы

1. *Физические основы ультразвуковой технологии*/под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1969.
2. . Gonzalez a, J. Rodriguez a, I. Garmendia b, J.A. Gallego-Juarez. Application of high intensity air-borne ultrasound for debubbling liquid coating layers. //Ultrasonics, Elsevier USA, 2006, 44
3. Khmelev V.N. Research of Ultrasonic Drying Process in Dryers of Ventilation Type/V.N. Khmelev, I.I. Savin, D.S. Abramenko, S.N. Tsyganok, R.V. Barsukov, D.V. Genne, A.N. Lebedev//International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2007.
4. Хмелев В.Н. Акустической коагуляции аэрозолей/В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, Д.С. Абраменко//Ползуновский вестник. Барнаул: 2008.
5. Хмелев В.Н. Ультразвуковая коагуляционная камера для работы в агрессивных средах/В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова//Современные проблемы радиоэлектроники. Сб. науч. тр./науч.ред.: А.И. Громыко, А.В. Сарафанов. Красноярск: ИПК СФУ, 2009.
6. Хмелев В.Н. Малогабаритная ультразвуковая сушилка с пьезоэлектрическим излучателем и резонансным технологическим объемом/В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.Н. Лебедев//Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. тр./науч.ред.: А.И. Громыко, А.В. Сарафанов. Красноярск: ИПК СФУ, 2009.
7. Аппарат ультразвуковой технологической «Афродита». <http://uson.ic.ru/devices/afrodita.shtml>.