

УДК 519.6

В.С. Аникин, В.В. Аникин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КАВИТАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Разработана модель потока вихревой трубы, содержащая тангенциальный вход продукта, отличающаяся тем, что образующие вихревой трубы получаются из решения вариационной задачи максимальной интегральной энергии деформационно-сдвигового взаимодействия потока с поверхностью вихревой трубы с расположенными на корпусе и стержне элементами - завихрителями потока, причём выходной поток вихревой трубы поступает в выходную акустическую камеру, выполненную в виде концентратора акустической энергии.

Введение. Известны способы изменения физико-химических свойств потоков продуктов путем передачи жидкости энергии колебательных процессов различных гидродинамических ультразвуковых излучателей с пластинчатыми, стержневыми, мембранными резонансными колебательными устройствами, в вихревых, струйных и роторно-пульсационных кавитационных аппаратах (в дальнейшем кавитаторах), в которых гидродинамическая кавитация ведет к генерации акустических, в т. ч. и ультразвуковых колебаний [1]. В этих устройствах используется возбуждение кавитационного процесса - образование и всхлопывание пузырьков жидкости, приводящее к ультразвуковым колебаниям. Известен способ интенсификации химических реакций [3], в котором звуковую энергию - источник ионизации молекул продукта, вводят в жидкую среду в области контакта реагентов в реакционной камере, а звуковые преобразователи заданных частот и энергий расположены в потоке реагентов. К недостаткам этих способов относится необходимость звуковых преобразователей с определенными частотными и мощностными характеристиками, а также сложность технической реализации «озвучивания», особенно промышленных объемов продукта.

Достижение *высокой плотности облучения продукта* при заданной производительности актуально для многих задач. Например, известно, что временная, с последующим восстановлением первоначального состояния, деструкция молекул углеводородов гомологического ряда состава C_nH_{2n+2} на более легкие молекулы наблюдается при плотности облучения до 10 Вт/см^2 , и безвозвратная деструкция при плотности более 10 Вт/см^2 , поэтому изменение физико-химических свойств с помощью известных кавитаторов малоэффективно для решения промышленных за-

дач, так как в них наблюдается невысокая плотность облучения (в среднем, меньше 5 Вт/см^2). Ультразвук влияет на изменение вязкости продукта, разрывает непрерывную цепочку, разрушая связи между отдельными частями молекул. Невозможность достижения высокой плотности облучения в заданных частотных диапазонах при *заданной производительности устройства* приводит к ограничению возможности использования способа ультразвукового воздействия для эффективных тепломассоэнергообменных процессов.

Постановка задачи. Задачей настоящей работы является создание такого способа акустического воздействия на поток многофазного продукта (например, нефти – смеси углеводородов), при котором осуществляется временное, или безвозвратное изменение молекулярного состава продуктов (деструкция продуктов) на более легкие молекулы за счет создания вихревого потока с *максимальной энергией* акустического резонансного возбуждения потока продуктов в заданном частотном диапазоне, что позволяет:

– создать достаточные для деструкции длительность и мощность резонансного возбуждения продукта за счет оптимального деформационно-сдвигового взаимодействия потока с поверхностью вихревых труб и, как следствие, возбуждением вынужденных виброакустических колебаний;

– создать турбулентные вихри и кавитационный процесс в вихревом потоке приводящий к акустической деструкции дисперсно-агрегатного состояния продукта и преобразованию химических связей;

– использовать тепломассоэнергообменный процесс вихревого потока для проведения преобразований продукта.

Под воздействием ультразвука большой интенсивности «озвучивания» нарушаются связи в молекулах обрабатываемых продуктов, вследствие чего происходят изменения физико-химического состава (изменение молекулярного веса, температуры кристаллизации и др.). Деструкция продукта происходит как в рабочих цилиндрах, так и в специальной камере озвучивания, в которую попадает продукт после рабочих цилиндров. Возбуждение кавитационных процессов осуществляется за счет конструкции рабочего цилиндра с завихрителями потока. Неустойчивые турбулентные течения центров вихрей взаимодействуют с расположенными в центрах рабочих цилиндров специальных центральных стержней с дополнительными завихрителями потоков, благодаря чему стержни вместе с корпусом находятся в резонансных колебаниях собственных частот. Положение центральных стержней настраивается из условия максимальной мощности виброакустических колебаний устройства.

Предлагаемые конструкции вихревых труб. Поставленная задача решается с помощью тепломассоэнергообменного процесса методом акустического резонансного возбуждения одного или нескольких вихревых потоков, создаваемых в вихревых трубах переменного сечения, рисунки 1, 2. Основным фактором достижения максимальной мощности виброакустических колебаний в устройстве является достижение максимальных линейных скоростей вихревых потоков и создания в нем зон неустойчивой турбулентности. Для этого поперечное сечение вихревых труб делается переменным, так, что в зоне максимальных линейных скоростей потока помещены завихрители потока. Сопротивление стенок вихревых труб также учитывается при расчете переменного сечения при решении вариационной задачи расчета наилучшей геометрии рабочих цилиндров. Образующие центральных стержней рассчитываются в общей с цилиндрами задаче гидродинамики вихревых потоков. Центральные стержни находятся в зоне повышенной неустойчивости течений, усиливаемых завихрителями потока, расположенных в зонах *максимальных линейных скоростей*. Наиболее близкой изученной математической моделью вихревых потоков в заявляемом устройстве является модель гидроциклона [2]. Известно, что в центре гидроциклона возникает газовый столб по причине разрыва сплошного потока жидкости из-за большой величины центробежной силы вблизи оси гидроциклона и выделения газа из жидкости в результате интенсивного вихреобразования. Таким образом, центральные стержни

от потока принимают сложные гидромеханические переменные импульсы и вместе с этим находятся в области гидроакустической кавитации. В результате все элементы вихревого реактора и, больше всего, стержни находятся в вынужденных колебаниях. Интенсификация тепломассоэнергообмена в физико-химическом процессе превращений методом акустического резонансного возбуждения вихревых потоков осуществляется с помощью вихревых труб переменного сечения с завихрителями потока, расположенных в зонах максимальных скоростей. На рисунке 1 показана схема одной из вихревых труб, образованных внешней поверхностью 2 и внутренней стержневой 3 с выходным отверстием 5. В трубе создается турбулентный кавитирующий вихревой поток, подвергающийся деформационно-сдвиговым воздействиям при взаимодействии с поверхностью трубы, на которой располагаются специальные турбулирующие поток конструктивы 1 - завихрители потока. Количество и расположение завихрителей может быть различным. Вихревой поток формируется с помощью тангенциально расположенного входного сопла 4, в которое продукт поступает под давлением от внешнего источника, например насоса, компрессора.

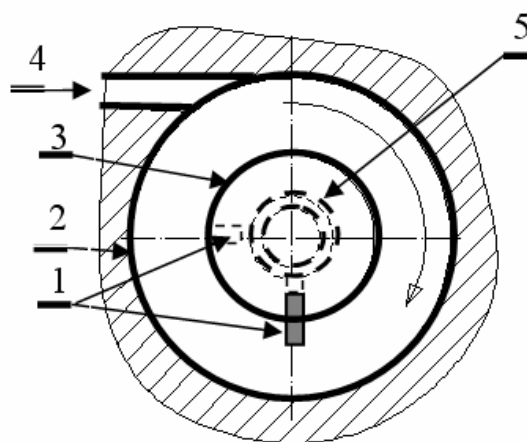


Рисунок 1 – Схема цилиндра вихревой трубы с центральным стержнем переменного сечения

Количество входов может быть различным и их расположение может быть распределено как по длине трубы, так и в плоскости, перпендикулярной оси трубы. На рисунке 2 приведена схема вихревой трубы, образованной поверхностями 2, 3 с вводом жидкого продукта 1 и газообразного 4, причем второй ввод выполнен в виде газоструйного генератора [1], что приводит к эффективной обработке продукта на заданной частоте с акустической мощностью $N_a = 330 * S_c \sqrt{P - 0,9}$, которая может на много превосхо-

дить мощность акустических колебаний за счет гидродинамической составляющей, S_c - площадь входного сопла в квадратных сантиметрах, P - давление газообразного продукта в килограммах силы на сантиметр в квадрате [1].

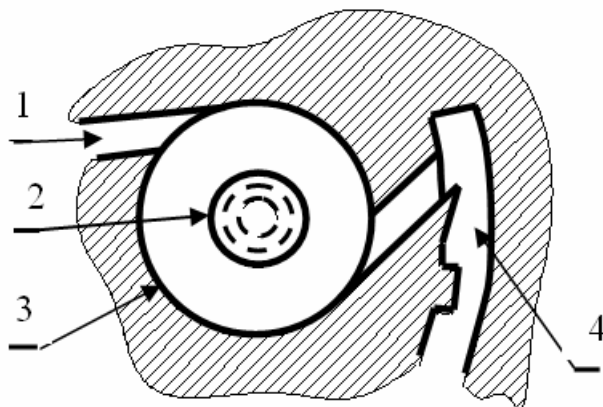


Рисунок 2 – Схема цилиндра вихревой трубы с вводом, выполненным в виде газоструйного генератора

Энергия вихревого потока, пропорциональная расходу потока Q , разности давлений на входе и выходе устройства $P_{вх} - P_{вых}$, расходуется на деформационно-сдвиговые воздействия разрывов сплошности в потоке и создание кавитационного процесса, а также на преодоление сил трения потока со стенками вихревой трубы 2 и центральным стержнем 3. При этом стержень находится в зоне неустойчивости центра вихря и воспринимает сложные переменные гидромеханические импульсы кавитационного процесса, что приводит к вынужденным виброакустическим колебаниям как стержней, так и суммарно всего устройства.

Приближенная модель вихревого потока. Энергия и спектр акустического поля озвучивания потока в ультразвуковом диапазоне складываются из колебательных процессов в самой жидкости за счет кавитации и акустической энергии за счет вибро-акустических колебаний конструктивов устройства. Приближенно можно представить энергию кольца вихря длиной Δz , тангенциальной скоростью $V_\tau = V(r_2/r)^n$ [2], внешним и внутренними радиусами кольца $r_2 = r_2(z)$, $r_1 = r_1(z)$, рисунок 3, в виде

$$E_k = \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{(V_\tau)^2}{2} (\rho \Delta z r dr) = \frac{\pi \rho V^2 \Delta z}{2-2n} (r_2^{2-2n} - r_1^{2-2n}) r_2^{2n}, \quad (1)$$

где V - тангенциальная скорость у внешней границы элемента вихря массой $\Delta m = \rho \Delta z r dr$, ρ - удельный вес продукта, $n < 1$ - коэффициент, учитывающий вязкость жидкости и корректирующий условие $V_\tau r = const$, получающееся из решения уравнения Стокса для вихря идеальной жидкости. Время продвижения продуктом пути Δz составит $t_z = \pi(r_2^2 - r_1^2) \Delta z / Q$, откуда длина траектории торможения внешних элементов кольца составит $l_2 = t_z V$, внутренних $l_1 = t_z V (r_2/r_1)^n$.

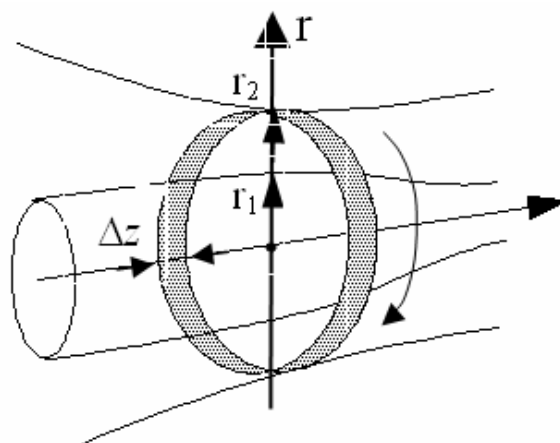


Рисунок 3 – Схема элемента потока вихря в вихревой трубе

Кольцо испытывает торможение за счет трения о стенки вихревой трубы и соударения с конструктивом завихрителя потока, поэтому для построения приближенной математической модели гидродинамики турбулентного вихря удобно ввести эффективную площадь торможения за счет завихрителя $s_T \Delta z = s_T(z, \eta) \Delta z$, определяющую расстановкой завихрителей и их эффективной площадью торможения, η - коэффициент вязкости жидкости. Тогда величина уменьшения энергии кольца E_k за время t_z составит $\Delta z \cdot s_{T2} l_2 \rho \frac{V^2}{2} + \Delta z \cdot s_{T1} l_1 \rho \frac{V^2 (r_2/r_1)^{2n}}{2}$, если $s_{T2} \Delta z, s_{T1} \Delta z$ - эффективные площади завихрителей потока, расположенных соответственно на внешней и внутренней поверхностях вихревой трубы. С учетом последнего соотношения и (1) уравнение баланса энергии кольца примет вид

$$E_k - [s_{T2} l_2 \rho \frac{V^2}{2} + s_{T1} l_1 \rho \frac{V^2 (r_2/r_1)^{2n}}{2}] \Delta z = \frac{\pi \rho (V + \Delta V)^2 \Delta z}{2-2n} (r_2^{2-2n} - r_1^{2-2n}) r_2^{2n}, \quad (2)$$

где ΔV - величина изменения тангенциальной скорости. Коэффициент $n = 1$ следует из решения уравнения гидродинамики для вихревого потока идеальной жидкости, при $n < 1$ функция $V_r(r)$ следует из экспериментальных исследований гидродинамики вихревого потока в гидрориклоне и зависит от числа Рейнольдса, которое для предлагаемой модели $R = 2r_2 V(r_2/r)^n / \nu$, ν - коэффициент кинематической вязкости. По экспериментальным данным [2] для вязкой жидкости $n \approx 0,6$ и зависит от давления в вихревой трубе. Этот коэффициент уточняется в процессе проведения экспериментальных исследований. В уравнение (2) величина s_T для идеальной жидкости соответствует высоте завихрителя потока и изменяется пропорционально коэффициенту вязкости жидкости η . Уравнение (2) можно преобразовать к виду $f(r_1, r_2) \Delta z = \Delta V / V^2$, решая следующее из этого соотношения дифференциальное уравнение для тангенциальной скорости внешней границы, получается

$$V(z) = \frac{1}{\frac{1}{V_0} - \int_0^z f(r_1, r_2) dz}, \quad (3)$$

где $V_0 = Q / s_c$ скорость на выходе тангенциально расположенного в точке $z = 0$ входного сопла, s_c - площадь сечения сопла. Соотношение (3) получено из допущения преимущественной тангенциальной составляющей вектора скорости вихревого потока. В реальном установившемся потоке роль радиальной и осевой составляющих незначительная в начале потока и увеличивается по мере его продвижения в вихревой трубе при уменьшении $r_2 - r_1$. В принятых допущениях выражение для тангенциальной скорости вихревого потока получается в виде

$$V(z, r) = \frac{V_0}{1 - V_0 \int_0^z f(r_1, r_2) dz} \left(\frac{r_2}{r} \right)^n, \quad (4)$$

откуда образующие вихревой трубы $r_2(z)$, $r_1(z)$ можно получить из решения вариационной задачи

$$V(z^*, r^*) = \max_{r_1, r_2} V(z, r), \{L > z > 0, r_2 > r > r_1\}, \quad (5)$$

где L - длина вихревой трубы. Для более точной задачи можно вычислять критерий как интегральную величину скорости по линиям размещения вихреобразователей. Задача (5) решается

численно при аппроксимации образующих r_2, r_1 кусочно-линейными функциями с помощью разработанной программы. Размещение вихреобразователей находится в процессе численного эксперимента.

Максимальная мощность ультразвуковых колебаний кавитационной и вынужденных виброакустических колебаний конструктивов устройства достигается в вихревой трубе с образующими, полученными при решении вариационной задачи (5). Регулирование частотного спектра может быть только за счет виброакустической составляющей. Спектр колебаний кавитационной составляющей зависит от физических параметров продукта. На рисунке 4, где ордината пропорциональна амплитуде виброакустических колебаний, представлен частотный спектр устройства, вихревые трубы которого изготовлены с параметрами $r_2(0) = 0,03$ метра, $Q = 1,7$ м³/час, $P_{вх} - P_{вых} = 4$ атмосфер.

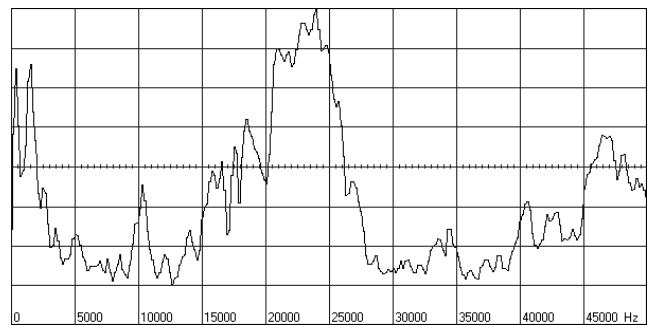


Рисунок 4 – Частотная характеристика устройства обработки жидкого продукта

На рисунках 4, 5 ординаты нормированы максимальным значением спектральной составляющей. Диапазон 42-50 кГц соответствует спектру кавитационной составляющей для воды и *не меняется* в любом устройстве с гидродинамическим процессом. Большой интерес представляют колебания в диапазоне 20-25 килогерц, где наблюдаются наибольшие физико-химические преобразования продукта. На рисунке 5 приведен спектр виброакустических колебаний для устройства с вводом, выполненным в виде разновидности газоструйного генератора, сконструированного авторами, с частотой 19,5 кГц по схеме ввода, представленного на рисунке 2.

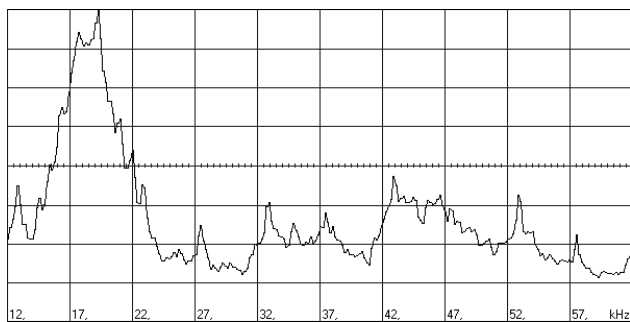


Рисунок 5 – Частотная характеристика устройства с вводом газообразного продукта, выполненного в виде газоструйного генератора акустических колебаний

Как видно, амплитуда виброакустических колебаний такого устройства существенно превышает амплитуды диапазона 42-50 кГц. Изготовленный опытно-промышленный ультразвуковой генератор с $s_c=3,6 \text{ см}^2$, $P=3,5 \text{ атм.}$ для пищевой промышленности имеет акустическую мощность 2000 ватт.

Применение ультразвуковых технологий в нефтяной промышленности. Изготовленные опытные образцы проходили испытания в пилотных проектах в качестве устройства деструкции углеводородов путем акустического резонансного возбуждения вихревых потоков продуктов в качестве эффективного метода борьбы с парафиноотложениями в насосно-компрессионных трубах при добыче нефти с устройством, расположенным по схеме, представленной на рисунке 6. В течение длительного периода работы скважины парафиноотложений не наблюдалось, без устройства скважина подвергается механической прочистки фрезой с периодом 3-5 дней. Кроме этого, фракционный состав нефти изменился в сторону увеличения выхода светлых фракций. Тяжелые фракции асфальтены, силикагелевые смолы выделились в виде отдельных образований, отделяемых с помощью фильтра грубой очистки. Подземное нефтепромысловое оборудование, в отличие от наземного, имеет существенное отличие в условиях решаемых задач, связанное с *большим давлением*, относительно малым размером, небольшой производительностью. Временная, или безвозвратная деструкция углеводородов нефти непосредственно в скважине с помощью эффективного кавитационного генератора решает проблему уменьшения или полного устранения парафиноотложений. При этом эффективно используется большое давление в скважине, достигающее сотен атмосфер, кавитационный процесс, деформационно-сдвиговые взаимодействия продукта и его акустическая обработка при таких давлениях приводят к деструкции дисперс-

но-агрегатного состояния продукта и преобразованию химических связей, что приводит к упрощению дальнейших технологий переработки углеводородного сырья.

Комбинированные способы акустического возбуждения продукта с гидродинамической и газоструйной составляющими применимы в технологиях наземного нефтепромыслового оборудования. В подземном нефтепромысловом оборудовании возможно применение устройства, соответствующего схеме рисунка 1, которое расположено непосредственно в скважине по схеме рисунка 6, где насос 1 подает нефть в заявляемое устройство 2 и, далее, обработанная нефть по насосно-компрессионным трубам 3 подается на поверхность земли 4 и отводится наземным путем 5 в накопительные емкости.

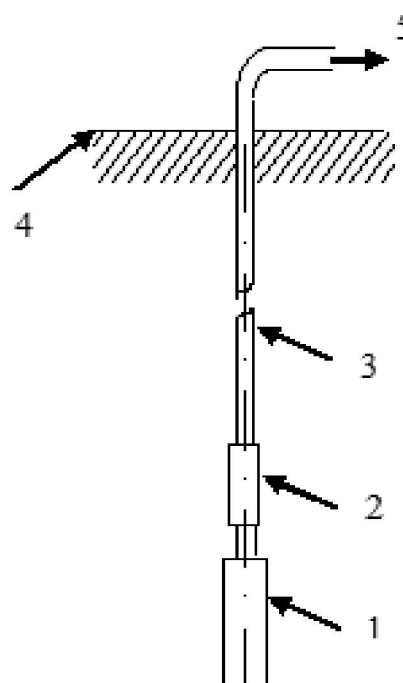


Рисунок 6 – Схема установки ультразвукового генератора в стволе скважины

Успешное решение задачи деструкции нефти с помощью рассмотренных выше устройств с изменением физико-химических свойств парафинов в скважине решает проблему ликвидации отложений парафинов на стенках насосно-компрессионных труб.

Таким образом, применение разработанного устройства позволяет интенсифицировать теплообмен, проводить деструкцию углеводородов при меньших энергетических и трудовых затратах.

Применение ультразвука в отраслях пищевой промышленности. Рядом исследований установлено, что ультразвуковые колебания спо-

собны изменять агрегатное состояние вещества, диспергировать, эмульгировать его, изменять скорость диффузии, кристаллизации и растворение веществ, активизировать реакции, интенсифицировать технологические процессы. Воздействие ультразвуковых колебаний на физико-химические процессы в пищевой промышленности дает возможность повысить производительность труда, сократить энергозатраты, улучшить качество готовой продукции, продлить сроки хранения, а также создать новые продукты с новыми потребительскими свойствами.

Наиболее перспективным и достаточно освоением использованием ультразвуковых технологий являются следующие технологические процессы:

- приготовление пищевых водных и водожировых эмульсий в мясомолочной, кондитерской, пищевкусовой отраслях промышленности, при изготовлении колбас, молочных продуктов, соков и т.д. ;

- низкотемпературная обработка продуктов с целью “мягкой” варки;

- диспергирование, гомогенизация и пастеризация сырья, полуфабрикатов и продуктов;

- биологическая активизация пищевых продуктов с целью улучшения потребительских и лечебно-биологических свойств;

- гидрогенизация жиров, осветление растительных масел;

- мгновенная варка водомучных суспензий в хлебопекарных и спиртовых технологиях;

- очистка диффузионного сахарного сока;

- осаждение винно-кислых солей, содержащихся в вине;

- обеззараживание воды.

Использование ультразвуковых технологий в пищевой промышленности не ограничивается приведенными примерами.

С помощью разработанного аппарата для спиртового производства была осуществлена в промышленном объеме мгновенная варка водомучной суспензии с целью извлечения крахмала в проточном режиме. В ультразвуковой генератор под давлением 3-4 атм подавалась суспензия

и пар, на выходе получалась готовая суспензия с температурой 80-95°C с выделенным крахмалом. Микробиологический анализ показал отсутствие микрофлоры. Опыт использования ультразвуковой варки дает основания считать возможным распространение его и на другие процессы спиртового производства – осахаривание, активизацию бражки, коагуляцию барды, ректификацию и т.д. Таким образом, использование ультразвуковых аппаратов в тепломассоэнергообменных процессах спиртового производства позволяет надеяться на радикальные изменения технологии водно-тепловой обработки зерна.

В аналогичном аппарате была осуществлена холодная пастеризация и гомогенизация молока, при этом творожные сырки, изготовленные из озвученного молока, обладали более длительным сроком хранения.

Таким образом, использование ультразвуковых технологий в различных пищевых производствах позволяет:

- во много раз увеличить скорость физико-химических процессов;

- снизить энерго и ресурсозатраты;

- интенсифицировать процессы тепломассоэнергообмена;

- радикально изменить аппаратные оформления техпроцессов в сторону уменьшения металлоемкости и совмещения нескольких операций;

- освободить производственные площади;

- получить новые виды продуктов с биологически активными лечебными свойствами;

- снизить себестоимость продукции.

Вместе с тем необходимо отметить следующее – внедрение акустических технологий в ряде случаев влечет за собой корректировку некоторых параметров техпроцессов.

Библиографический список

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. Пер. с нем., 2 изд. М. 1957. 368 с.
2. Шестов Р.Н. Гидроциклоны. Л.: Машиностроение, 1966. 79 с.
3. Патент № 2232629 РФ. Способ интенсификации химических реакций.