

УДК 621.929.7:519.1

Использование системного анализа при исследовании аппаратов с вибрационной насадкой

Д-р техн. наук, проф. Сорокопуд А.Ф. mapp@kemtipp.ru
канд. техн. наук Иванов П.П. ipp7@yandex.ru
Кемеровский технологический институт пищевой промышленности
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

Показана перспективность использования метода наложения низкочастотных механических колебаний на систему «твердое тело – жидкость» с целью интенсификации процессов экстрагирования растительного сырья. Показана возможность применения системного анализа при модернизации и проектировании аппаратов с вибрационной насадкой. Используя декомпозиционно-стадийный подход предложена структурная схема исследований.

Ключевые слова: вибронасадка, экстрагирование, системный анализ.

System analysis applied to the research of mass transfer apparatuses with a vibrating nozzle

Sorokopud A.F. mapp@kemtipp.ru, **Ivanov P.P.** ipp7@yandex.ru
Kemerovo Technological Institute of Food Industry

Application prospects of the method of transmitting low-frequency mechanical vibrations to «solid – liquid» system in order to intensify the extraction of vegetable feed have been shown in this article. The applicability of system analysis for modernization and designing of new constructions of apparatuses with a vibrating nozzle has been shown. The scheme of the research on the basis of decomposition-phase approach has been performed in the article.

Key words: vibrating nozzle, extraction, system analysis.

При создании высокоэффективных аппаратов, часто используют принцип подведения энергии извне к взаимодействующим средам.

Одним из наиболее эффективных способов подведения дополнительной внешней энергии является наложение на взаимодействующие фазы низкочастотных колебаний. Такие аппараты отличаются высокой эффективностью при большой удельной производительности [1], поскольку вводимая внешняя энергия может равномерно, или по заранее заданному закону распределяться по поперечному сечению аппарата, и нужным образом влиять на поле скоростей взаимодействующих фаз. Кроме того, вследствие колебательного движения перфорированной насадки с заданной амплитудой и частотой в рабочем объеме аппарата создается знакопеременное движение обрабатываемой среды, которое характеризуется высокой скоростью образования коротких кавитационных волн, создающих ударные воздействия на обрабатываемую систему в фазе сжатия и растягивающие усилия в фазе растяжения, что положительно сказывается на скорости проводимых процессов. Таким образом, создаются предпосылки к оптимальному дроблению дисперсной фазы, к уменьшению её полидисперсности, а также к увеличению скорости обновления поверхности контакта фаз, ускорению проникновения экстрагента в поры твердой фа-

зы. Эти и другие эффекты способствуют снижению внешнедиффузионного сопротивления и ускорению массопереноса внутри капиллярно-пористых тел.

Наиболее часто низкочастотные колебания вводятся в аппарат двумя способами: созданием возвратно-поступательного движения взаимодействующих фаз (пульсационные аппараты) и колебательным движением насадки внутри аппарата (вибрационные аппараты).

Считается, что наложение механических колебаний вибрацией более эффективно, чем пульсационная подача жидкости в слой, поскольку виброэлементы могут быть размещены по всей высоте или длине слоя, а пульсации из-за высокого гидравлического сопротивления слоя действуют локально [5].

Благодаря своим достоинствам вибрационные аппараты нашли применение в качестве экстракторов, гетерогенных химических реакторов, при проведении различных массообменных процессов, кристаллизации, сорбции, растворения, выщелачивания и т.п. [1-6]. Однако, несмотря на известные преимущества аппаратов с вибрационной насадкой они не нашли достаточно широкого применения в пищевой промышленности вследствие несовершенства конструкции и недостаточной изученности процессов, протекающих в них.

Поэтому цель данной работы – разработать рациональную схему проведения исследований аппаратов с вибрационной насадкой и процессов осуществляемых в них.

Применение методологии системного анализа позволяет существенно повысить эффективность разработки новой техники и технологии в различных отраслях промышленности. Для разработки структурной схемы исследований целесообразно рассмотреть типичные конструкции аппаратов с вибрационной насадкой и проанализировать процессы происходящие в них.

Вибрационные аппараты по организации своей работы делят на периодически и непрерывно действующие, первые обычно емкостные, вторые – колонного типа. Вибрационную насадку применяют как в колонных аппаратах, где стремятся создать гидродинамический режим, приближающийся к идеальному вытеснению, так и в емкостных аппаратах, где гидродинамический режим приближается к идеальному смешению.

Конструктивные особенности вибрационных аппаратов определяются характером вибрационных колебаний, совершаемых элементами насадки. В подавляющем большинстве аппаратов колебания насадки происходят по гармоническому закону. Обычно направление вибрационных колебаний насадки совпадает с вертикальной осью. При этом имеются разработки, в которых использовано и более сложное колебательное движение [1, 4].

На рис. 1, а) представлен экстрактор с уравновешенной вибромешалкой совершающей колебательные движения со сдвигом по фазе на половину периода. Диски перфорированы конусными отверстиями и совершают вертикальные колебания частотой 20 – 40 Гц и амплитудой 3 – 6 мм. Струи жидкости выбрасываются через отверстия в направлении противоположном направлению движения дисков. Достоинство таких конструкций – повышение скорости движения струй, формируемых при противоположном движении смежно расположенных дисков, способствующих обновлению поверхности контакта фаз и диспергированию твердой фазы. Помимо этого при равной массе тарелок, совершающих встречное движение, уравновешиваются силы инерции, вследствие чего

уменьшаются вибрационные нагрузки на корпус аппарата и привод. Также снижаются энергозатраты, так как действие массовых сил компенсируется.

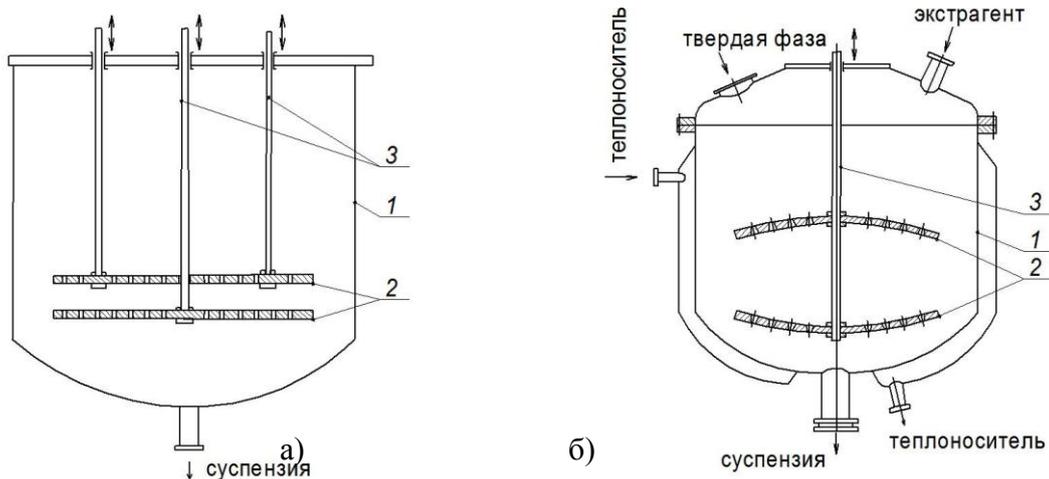
Представленный на рис. 1, б) реактор [4] имеет вертикальный шток совершающий колебательное движение с частотой 5 – 20 Гц при амплитуде до 10 мм. На штоке закреплены полусферические насадки перфорированные коническими отверстиями. Отмечается, что аппарат может использоваться в различных отраслях промышленности для интенсификации широкого круга процессов как в маловязких, так и в вязких средах, при давлении до 25 МПа.

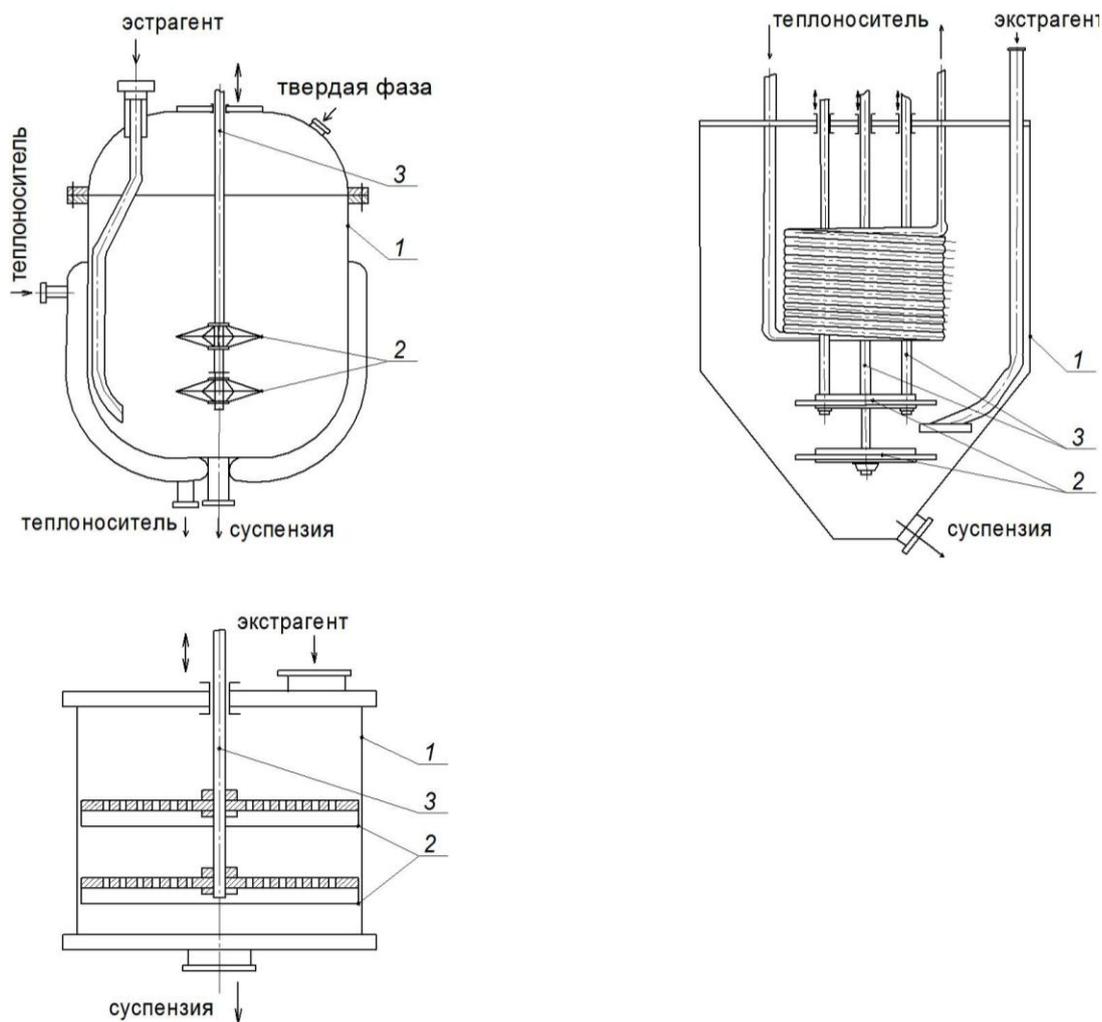
Емкостной аппарат АПГ-2К-0,2, рис. 1, в) имеет вибронасадку в виде тарелок с коническими отверстиями, предназначен для обработки маловязких жидких сред. Интенсификация процессов осуществляется вследствие увеличения удельной поверхности и условий контакта фаз. Аппарат обеспечивает герметизацию и стерильные условия процесса и может быть использован в микробиологической, химико-фармацевтической и других отраслях промышленности

Экстрактор с вибромешалкой рис. 1, г) имеет цилиндрическо-конический корпус (сосуд) внутри которого кроме вибрационной насадки размещен змеевик обеспечивающий требуемый температурный режим [1]. Конструкция вибронасадки аналогичная изображенной на рис. 1, а) и совершает колебания с частотой 25 Гц и амплитудой 4 мм.

В работе [3] рассмотрен емкостной экстрактор с одной плоской вибрационной насадкой перфорированной цилиндрическими отверстиями. Характерными особенностями насадки являются: минимальный зазор между корпусом аппарата и тарелкой (не более 2 мм), а также наличие на ее периферии жестко закрепленной отбортовки, высота которой в 1,1 – 1,5 раза больше амплитуды колебаний, что обеспечивает формирование направленных струй высокого давления. Аналогичная конструкция с двумя тарелками (рис. 1, д) исследована в работах одного из авторов и показала возможность повышения производительности аппарата при незначительном увеличении потребляемой мощности.

Недостаточная изученность аппаратов этого типа объясняется сложностью задачи: степень турбулизации в любой точке аппарата, а следовательно скорость процесса зависят от формы и величины рабочего органа (вибрационной насадки), параметров его колебаний (амплитуды и частоты), расстояния от вибрационного элемента до дна аппарата, и до свободной поверхности жидкости, физических свойств сырья и многих других факторов.





Основным недостатком емкостных аппаратов с вибрационной насадкой является сравнительно небольшая производительность. Решить эту проблему возможно путем установки дополнительных вибрационных насадок, с целью увеличения высоты обрабатываемого слоя. В результате такой модернизации появляется возможность создания вибрационного экстрактора колонного типа имеющего непрерывный режим работы.

Первый колонный экстрактор с вибрационной насадкой был предложен в 1935 г. Ван-Дийком. В цилиндрическом корпусе этого экстрактора размещен пакет перфорированных тарелок, гибко связанных между собой и штоком с помощью цепной подвески. Гибкая связь оказалась слабым звеном конструкции.

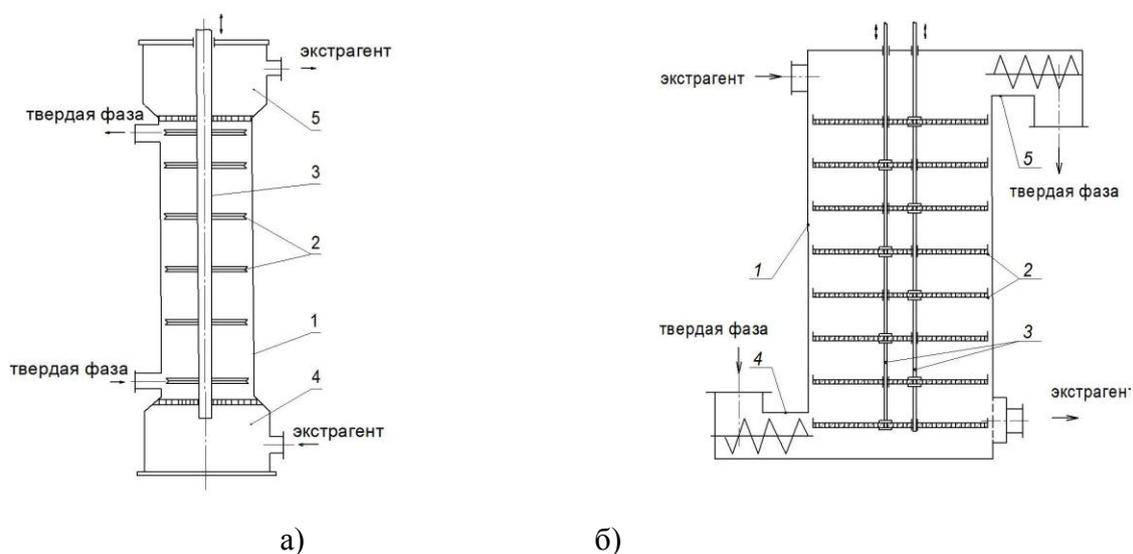
На рис. 2, а) изображен реакционный аппарат С.М. Григорьева, который является классическим образцом колонных аппаратов с вибрационной насадкой. В корпусе 1 установлена штанга 3 с возможностью возвратно-поступательного движения вдоль вертикальной оси. На штанге жестко закреплены перфорированные диски – тарелки 2, которые могут иметь круглые либо прямоугольные отверстия. В последнем случае отверстия тарелок снабжены направляющими лопатками, создающими наклонные каналы, проходя через которые, обрабатываемые среды приобретают горизонтальную составляющую скорости движения струй, увеличивая поперечное перемешивание. Данный эффект способствует снижению поперечной неравномерности, предотвращая уменьшение эффективности массообмена с ростом диаметра аппарата. Корпус аппарата имеет верхнюю 5 и

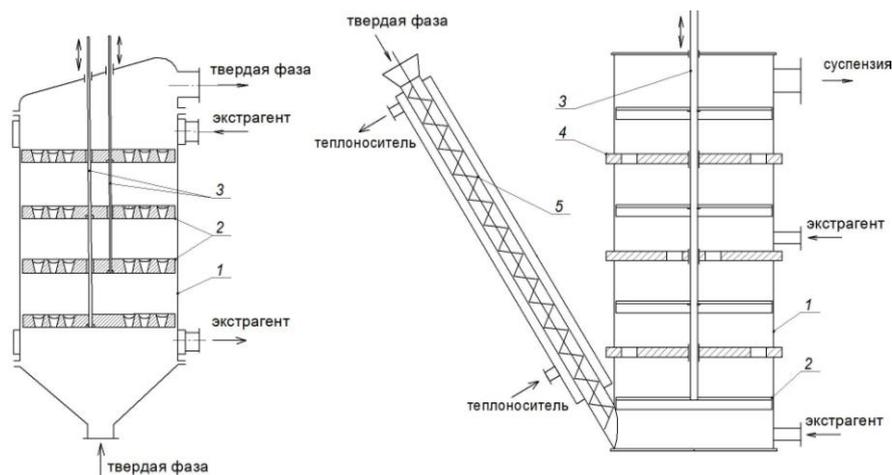
нижнюю 4 отстойные зоны. Аппараты конструкции Григорьева нашли применение в химической промышленности.[1]

Другим образцом колонных вибрационных аппаратов является непрерывно действующий вибрационный экстрактор [А.С. № 1722521], рис. 2, б). В корпусе 1 устанавливают две штанги 3 с закрепленными на них тарелками 2, снабженными по периферии бортами, направленными в сторону транспортирования твердой фазы (снизу вверх). Штанги движутся в противофазе. Отверстия перфорации тарелок представляют собой патрубки, конструкция которых обеспечивает различное гидравлическое сопротивление прохождению через них сред во взаимно противоположных направлениях. Таким образом, гидравлическое сопротивление движению среды в сторону выгрузки твердой фазы меньше, что определяет направление её движения в аппарате. Экстрактор имеет устройство для непрерывной подачи твердой фазы 4, в виде горизонтального шнека, аналогичное устройство 5 используется для удаления твердой фазы. В аппарате предполагается создать противоточное движение твердой (снизу вверх) и жидкой (сверху вниз) фаз. На наш взгляд это затруднительно, поскольку часть свежего экстрагента будет уноситься с суспензией.

Известен дифференциально-струйный твердофазный экстрактор предназначенный для экстрагирования веществ растворителями из твердых тел, (рис. 2, в) [А.С. №1634293]. В корпусе аппарата 1 установлены две штанги 3 с закрепленными на них пакетами тарелок 2. Штанги совершают вертикальные колебательные движения в противофазе. Тарелки выполнены гофрированными, при этом на вершинах гофр установлены сопла и сетка, вогнутая внутрь гофр. По мнению авторов, использование этой конструкции позволяет повысить производительность в 1,3 – 1,5 раза.

Узким местом рассмотренных аппаратов является наличие двух штанг, что усложняет конструкцию привода и требует большой точности при изготовлении. Кроме того, в аппаратах работающих по схеме противотока, сложно обеспечить герметичность узла подачи твердой фазы обычно расположенного в нижней части, а высокие требования к однородности дисперсного состава твердой фазы существенно снижают область их применения.





Экстрактор (рис. 2, г) [Патент РФ 2467782] содержит вертикальный цилиндрический корпус 1 с шнековым питателем 5 для подачи твердой фазы и устройством вывода фаз. В корпусе установлена с возможностью продольного возвратно-поступательного движения штанга 3 с закрепленными на ней тарелками 2, перфорированными свободными отверстиями для прохода фаз и снабженными по периферии бортами, направленными в сторону, противоположную движению фаз. Корпус аппарата секционирован по высоте жестко закрепленными перегородками 4 с переточными щелями, расположенными по периферии, и по центру перегородок, попеременно по высоте аппарата. В каждой секции установлена насадка, перфорированная отверстиями конической или цилиндрической формы, при этом размер отверстий перфорации насадок в нижних секциях аппарата будет больше, чем в последующих.

Таким образом, основным рабочим элементом вибрационного экстрактора является вибрационная насадка (КФУ-1) – конструктивно функциональный узел (КФУ). В зависимости от свойств твердой и жидкой фаз он может иметь различные размеры и геометрические характеристики (форма и размеры отверстий, доля свободного сечения отверстий, наличие и направление установки отбортовки и ее размеры и т.п.). Это представительные элементы КФУ-1. В емкостных экстракторах как правило 1 – 2 тарелки, в колонных экстракторах тарелок больше, чтобы обеспечить работу аппарата в режиме близком к идеальному вытеснению. В секционированных колонных аппаратах следует выделить КФУ-2 более сложного уровня – контактную ступень. Она включает вибрационную тарелку, неподвижные перегородки с переточными отверстиями различной конфигурации. Шнек-питатель также следует отнести к КФУ-3 содержащему шнек, обогревающую рубашку, устройства дозирования твердой и жидкой фаз. Наличие теплообменных устройств в аппарате позволяет создать требуемый температурный режим тем самым расширить область применения вибрационных аппаратов.

Взаимодействие фаз в рабочем объеме экстракторов сопровождается интенсивным перемешиванием циркуляцией и дроблением как жидкой, так и твердой фаз не только за счет воздействия струй, образованных перфорацией тарелки, но и за счет прохождения обрабатываемой системы через зазор между корпусом и тарелкой, через переточные щели в перегородках и т.п., таким образом осуществляется дополнительное измельчение фаз.

Еще более сложные элементарные процессы имеют место в емкостном экстракторе, когда реализуется способ получения экстрактов из замороженного плодово-ягодного

сырья [6]. В экстрактор загружается замороженное до -18°C плодово-ягодное сырье и заливается экстрагент (вода или водно-спиртовой раствор) с температурой $18 - 20^{\circ}\text{C}$, процесс осуществляется при комнатной температуре. В результате в одном рабочем объеме реализуются операции размораживания, дробления и экстрагирования. На размораживание затрачивается тепло накопленное корпусом экстрактора и экстрагентом, а также тепло из окружающей среды. В результате получается экстракт с температурой $4 - 10^{\circ}\text{C}$. Из приведенного обзора конструкций и анализа явлений, происходящих в вибрационных аппаратах следует, что они могут быть отнесены к сложным конструктивно-функциональным системам, поскольку обладают достаточным количеством признаков последних – наличие подсистем (КФУ), сложность функций систем в целом, большое количество критериев оценки сложности системы и её подсистем, существенно различная природа подсистем, необходимость применения для исследования системы и подсистем достаточно широкого круга теоретических и экспериментальных методов. При такой оценке вибрационные аппараты представляются в непрерывной связи с осуществляемыми в них процессами, т.е. процессами для которых они создаются. Таким образом, под аппаратом с вибрационной насадкой далее будем понимать технологический аппарат как сложную по устройству систему, в которой протекают физические, физико-химические, биохимические и другие процессы взаимодействия фаз. В свою очередь процессы, осуществляемые в аппаратах с вибрационной насадкой, можно также отнести к сложным системам, поскольку им присущи соответствующие признаки. Процессы осуществляются в несколько стадий - размораживание, дробление, экстрагирование; дробление и экстрагирование и т.п. каждая стадия различна по своей природе, в свою очередь на каждой отдельной стадии одновременно происходят различные по природе физические явления. Кроме того, имеет место наличие подсистем, сложность функции системы в целом, большое количество критериев оценки системы и подсистем, различная природа подсистем и т.п. Такая оценка процессов осуществляемых в аппаратах с вибрационной насадкой, в свою очередь предопределяет их неразрывную связь с аппаратурно-технологическим оформлением.

Все вышеизложенное подтверждает целесообразность использования системного анализа для решения поставленных в работе задач.

В работах Сабурова А.Г. (1996 - 2005 гг) обоснованы необходимые этапы анализа и синтеза гетерофазных технологических процессов, а также предпосылки определения иерархической структуры процессов и аппаратов. Это позволило автору сформулировать декомпозиционно-стадийный подход как дальнейшее развитие принципов системного анализа с учетом специфики гетерофазных технологических процессов масложировой промышленности. Применение декомпозиционно-стадийного метода обеспечивает рациональную постановку конкретных задач с учетом технологических, процессовых и аппаратурных аспектов решаемой проблемы и предопределяет эффективное её решение.

Реализация системного подхода при разработке новых и совершенствовании существующих аппаратов с вибрационной насадкой для осуществления процессов в системе «твердое тело – жидкость» предполагает следующие этапы анализа: совершенствование конструктивных элементов вибрационных аппаратов, разработка математических описаний, и проверка их адекватности реальным процессам на различных уровнях иерархической структуры, оптимизация отдельных узлов исследуемых аппаратов по важнейшим энергетическим показателям. Такая последовательность в реализации системного анали-

за обеспечит снижение сложности решаемых задач и возможность более детального изучения аппаратов с вибрационной насадкой для достижения поставленных целей.

Элементарные процессы, происходящие на различных стадиях массообмена в вибрационных аппаратах, изучены недостаточно. В тоже время, целесообразность таких исследований вполне очевидна как с точки зрения углубления знаний о механизме осуществления элементарных процессов и создания адекватного их описания, так и с точки зрения разработки и совершенствования аппаратов с вибрационной насадкой. По этим причинам следующий уровень иерархической структуры исследования аппаратов с вибрационной насадкой составляет совокупность явлений, происходящих в твердых частицах, каплях и т.п. Влияние физико-химических и др. свойств обрабатываемых в вибрационных аппаратах материалов проявляется не только при осуществлении элементарных процессов, но и при расчете и проектировании КФУ; и обуславливает качественные показатели готового продукта. Знание физико-химических и др. свойств перерабатываемых материалов в значительной мере определяет выбор представительных элементов и КФУ при синтезе вибрационных аппаратов.

Таким образом, существенная особенность реализации этапов анализа аппаратов с вибрационной насадкой и их структурной иерархии заключается в тесной взаимосвязи технологических и процессно-аппаратных вопросов решаемой проблемы. Комплексное рассмотрение этих вопросов в различной степени необходимо практически на всех ступенях иерархии.



Рис. 3. Структурная схема исследований

Анализ вышеизложенного показывает, что декомпозиционно-стадийный подход реализует принципы нисходящей иерархии анализа (от аппарата к приборной технике) и восходящей иерархии синтеза. Это является характерной особенностью системного анализа процессов химической технологии. Применение декомпозиционно-стадийного подхода показывает, что он не налагает жестких взаимосвязей между уровнями структурной иерархии, поэтому и получена схема (рис. 3) которая учитывает особенности целей и задач объекта исследования (вибрационных аппаратов) и процессов, осуществляемых в них.

Список литературы

1. Городецкий И.Я., Васин А.А., Олевский В.М., Лупанов П.А. Вибрационные массообменные аппараты / Под ред. В.М. Олевского. - М.: Химия, 1980.-192 с.
2. Мищенко Е.В. Экстракция в вибрационном поле. Вопросы вибрационной технологии: Межвузовский сборник научных статей. Дон. гос. техн. ун-т. Ростов н/Д: Дон. гос. техн. ун-т. 2006, С. 153-155.
3. Сорокопуд А.Ф., Помозова В.А., Мустафина А.С. Интенсификация экстрагирования плодово-ягодного сырья с использованием низкочастотного вибрационного воздействия.// Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья, 2000. - №5. - С. 35 - 39.
4. Аксельруд, Г.А., Молчанов А.Д. Растворение твердых веществ. - М.: Химия, 1977. – 272 с.
5. Васановьев, В.Д. Вибрационная техника в химической промышленности / В.Д. Васановьев, Э.Э. Кольман-Иванов. – М.: Химия, 1985. – 240 с.
6. Патент РФ №2403808 Способ получения экстрактов / Сорокопуд А.Ф., Плотников И.Б., Астафьева А.Н, Сорокопуд В.В. опубл. 20.11.2010, БИ. №32.