

А. И. Гурьянов, Г. Н. Марченко

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

*Ключевые слова:* приближенное моделирование, конструирование и «масштабирование» АТС; агрегирование элементарных физических явлений.

*Наиболее трудоемкий этап освоения технологических систем – их промышленное аппаратное оформление. Традиционно выбор типа аппарата, его режимных конструктивных и геометрических параметров проводится априорно на основе общих представлениях о протекающих в нем элементарных явлениях и эффектах переноса импульса, массы и энергии. В созданных на такой основе аппаратно-технологических системах (АТС) не идентифицированы системообразующие определяющие явления и эффекты, связи и взаимодействие между ними. Вследствие чего такие системы, как правило, аналитически не замкнуты, не устойчивы и не обладают свойством «моделируемости». В статье излагается методология и теоретические основы структурно-конструктивного альтернативного подхода к синтезу АТС. Приводятся примеры его эффективности при создании класса динамически уравновешенных пульсационных экстракторов для жидкофазных процессов и способа пульсационного противоточного технологического транспортирования концентрированной твердой дисперсии в процессах экстрагирования.*

*Keywords:* approximate modeling, design and 'scaling' ATS; aggregation of basic physical phenomena.

*Mastering of technological systems with their industrial apparatus design is the most laborious stage of development of technological systems. Traditionally the type of apparatus is selected a priori with its design and geometrical parameters on the basis of public views on the processes and basic phenomena and effects of transfer of momentum, mass and energy. These hardware and technology systems (ATS) have been established on such basis are not identified by the major determinants of the phenomenon and effects, and the interactions between them. Therefore such systems are not analytically closed, are not stable and do not possess the property of 'modeling'. The article describes the methodology and theoretical framework of structural-constructive alternative approach to the synthesis of ATS. Examples of its effectiveness provide in design of dynamically balanced pulsating extractors for liquid-phase processes and method of pulse countercurrent transport of concentrated solid dispersion in various extraction processes.*

Основу промышленных химико-технологических систем (ХТС) составляют отдельные аппаратно-технологические системы (АТС)<sup>1</sup>. Они обеспечивают приемлемую для сложившейся в социуме экономической конъюнктуры энергетическую и ресурсную эффективность. Использование адекватной методологии подхода к обоснованию принимаемых решений по определяющим промышленным аппаратно-технологическим системам позволяет, более успешно решать задачи, как совершенствования существующих технологий в целом, так и промышленного освоения новых АТС. Для математического отображения в ХТС связей между отдельными АТС традиционно используется теория графов [1]. Так представление технологического процесса в виде модифицированных сетей Петри [2] позволяет с высокой степенью адекватности решать задачи оптимизации и модификации гибких дискретно-непрерывных ХТС общего и специального назначения, малого и среднего тоннажа, с использованием типовых технологических аппаратов. Технологические аппараты с протекающими в них физико-химическими процессами формализуются в виде передаточных функций, конструктивные решения которых традиционно принимаются априорно на основе общих представлений теорий переноса без раскрытия их структуры. Неоправданно большое разнообразие невостребованных производством заявленных изобретений на технологические аппараты можно объяснить априорным выбором их конструктивных решений.

Проблема конструирования и промышленного освоения, много тоннажных оригинальных АТС, известная отечественным и зарубежным специалистам, как «проблема масштабного перехода (моделирования)» считается не нашедшей до настоящего времени удовлетворительного решения, что связано со сложностью проблемы, недостаточностью знаний и опыта по сравнению с более развитыми областями инфраструктуры социума.

Аппаратно-технологические системы, как правило, по структуре представляют собой сложную многофазную, многокомпонентную, многоуровневую, трехмерную физико-химическую систему (ФХС) агрегированных<sup>2</sup> элементарных процессов, явлений и эффектов, а также режимных, конструктивных и геометрических параметров. В агрегированной, с заданной целевой функцией, ФХС образуются характерные внутренние связи, сильные взаимодействия, зависящие от принятых значений её параметров.

Так, например, в типовой АТС – ректификационном аппарате, в пределах его габаритов и размеров парового пузыря, на его контактных устройствах, выделяются по масштабу пять уровней явлений. В целом в такой системе выделяется до нескольких десятков различных физических явлений [3].

В любой промышленной ХТС ключевым звеном служит та или иная техногенная АТС, агрегирующая целую систему физических, химических, биологических и других элементарных процессов, явлений и эффектов, в том числе и масштаба нано.

<sup>1</sup> АТС – единая система технологического аппарата и протекающие в нем физико-химических процессов и явлений.

<sup>2</sup> Вся техногенная инфраструктура цивилизации создана на принципе агрегирования.

Процесс формирования и развития инфраструктуры можно отнести к естественному процессу накопления знаний социумом, протекающему по соответствующим ему закономерностям.

Аппаратурно-технологическая система представляет собой, в рамках принятых значений технологических переменных, режимных, конструктивных и геометрических параметров, сложную агрегированную на основе фундаментальных законов сохранения систему, связанных и взаимодействующих между собой естественных процессов и явлений. Такая система *функционально устойчива*, обладает характерными признаками и свойствами, основными (определяющими) и определяемыми элементарными процессами и явлениями, которые либо инвариантны к её масштабу, либо – зависимы от него. По всем её признакам она, может быть, подвергнута анализу, как агрегированная система отдельных естественных элементарных явлений с их функцией и связью, с последующей формализацией их математической моделью.

Эпистемология, обобщая многовековой опыт научного познания действительности, выделяет в этой процессе три этапа: 1) понимание естественной физической сути агрегируемых явлений, характера их взаимодействия и связей; 2) построения математической модели системы; 3) экспериментальная проверка принятой системы. Это фундаментальное положение теории познания, несмотря на большое разнообразие задач поиска практически приемлемых для социума химико-технологических, физико-химических, биологических и других технологических систем, в том числе и нано остаются актуальными и в высокой степени адекватными в обозримо будущей перспективе при их промышленном освоении. В химико-технологических и близких к ним по структуре процессам, явлениям и системам у отечественных и зарубежных специалистов наиболее сложной и трудоемкой задачей, до настоящего времени, считается – промышленное освоение крупнотоннажных АТС. Сложившееся мнение по проблеме «масштабного перехода» в этих отраслях, связано с рядом причин. Одна из них – относительно поздняя востребованность<sup>3</sup> этого сектора промышленности, по отношению к остальной, развитой инфраструктуре социума и соответственно недостаточность развития базы знаний (научных обобщений, опыта). Вместе с тем база знаний<sup>4</sup> каждого этапа промышленного освоения АТС, как по глубине, так и по широте охвата может находиться на разных уровнях: либо на стадии *заблуждений*, либо на стадии становлений. Также как, в целом, и наши общие представления о структуре действительности [4]. Вся история развития фундаментальных научных и прикладных знаний свидетельствует о прорывном характере появ-

ления новых технологических и технических открытий, как результат острой их востребованности социумом и накопление некоего критического объема адекватной информации о структуре действительности. Следствие этих причин – недостаточная методологическая проработанность этой проблемы.

При всей сложности АТС в них всегда можно выделить ограниченный набор «системообразующих» явлений, определяющих её основную функцию и устойчивость. К таким процессам, явлениям относятся способы их организации, обеспечивающие условия протекания и взаимодействия явлений более низкого по масштабу уровня. Устойчивость АТС допускает её реагрегирование с сохранением основной функции при корректировке его отдельных характеристик. Становится также возможным на основе одних и тех же «системообразующих» явлениях агрегировать систему с другим функциональным назначением [5].

До настоящего времени среди большинства отечественных и зарубежных специалистов в области моделирования физико-химических систем существует мнение, что эта проблема в области классических и инновационных технологий не нашла удовлетворительного решения.

Казанской школой моделирования физико-химических систем эта проблема впервые была поставлена профессором Г.К. Дьяконовым (1907-1953) в монографии «Вопросы теории подобия в области физико-химических процессов», изданной в 1956г. В 80-х годах в ряде работ последователей этой школы оно получило развитие: в теории сопряженного физического и математического моделирования промышленными аппаратами [6]; в сформулированной методологии конструирования физико-химических систем, их аппаратного оформления и промышленного освоения [7]. В том числе, выполнены работы в области специальных технологий: квазигетерогенная теории зажигания конденсированных реагирующих систем с одностадийной и многостадийными, протекающими последовательно и параллельно реакциями, послужившая основой разработки широкого класса твёрдотопливных ракетных двигателей различного назначения [8, 9]; на основе представлений о процессе смещения как о марковском двумерном процессе гибели популяций разработана математическая модель непрерывно-действующего смесителя [10]; математическое моделирование многономенклатурных дискретно-непрерывных ХТС производств нитратов целлюлозы [2].

Накопленный опыт анализа разрабатываемых физико-химических систем – выделения в них определяющих подсистем, явлений, синтез на такой основе АТС с заданными свойствами, в том числе их *моделируемость*, приводит к выводу, что процедура создания техногенных технологических систем проводится по одному и тому же принципу – агрегирования естественных процессов, явлений и эффектов действительности. Характерная высокая сложность структуры химических, физико-химических, биологических и подобных им систем требует методологической проработки адекватного подхода к выбору и *агрегирование* их элементной

<sup>3</sup> Востребованность или выбор приоритета развития отрасли инфраструктуры определяется политическими и социальными институтами

<sup>4</sup> Знаний, необходимых и достаточных для решения практической техногенной задачи.

базы, идентификацию характера возникающих в них связей и взаимодействий.

В более востребованных областях техники и технологий социум располагает опытом последних столетий и соответственно более развитой базой знания. Принцип агрегирования – фундаментальная, естественная, относительно простая для алгоритмизации процедура. При современном уровне численного моделирования, процесс развития техногенной среды социума, с соответствующей его методологической проработкой, может проводиться на качественно более эффективном уровне.

По мере накопления знаний о физико-химических процессах и явлениях, протекающих в масштабе нано размера, они будут востребованы, по мере необходимости, и агрегированы, в современные ХТС, физико-химические и аппаратурно-технологические системы.

Формулировка принципов анализа и синтеза физико-химических процессов, элементарных явлений нано и макро масштаба и обоснованность аппаратурных решений качественно меняет процедуру освоения разрабатываемых и модернизируемых промышленных образцов аппаратуры, переводя её на уровень комплексно-ресурсосберегающей. Такой подход к промышленному освоению аппаратурно-технологических разработок позволяет:

- повысить адекватность их математических моделей;

- упростить проблему масштабирования за счет сокращения числа этапов освоения промышленных образцов;

- минимизировать объём экспериментальных исследований отдельных физико-химических подсистем;

- синтезировать системы с заданной целевой функцией и характеристиками, упростить поиск и разработку оригинальных способов проведения физико-химических и гидродинамических процессов.

В развиваемом подходе к синтезу АТС, основополагающим моментом в этой процедуре – выбор системообразующего явления, позволяющего обеспечить системе реализацию её целевой функции с приемлемой ресурсоэффективностью. Процедура выбора системообразующего явления АТС относится к первому этапу теории научного познания. Основа её – сформировавшаяся база знаний и опыта, степень и мотивы востребованности социумом.

Авторами, в статье в качестве примера эффективности развиваемого подхода к синтезу АТС системообразующим явлением, выбрана гидродинамическая регулярная нестационарность (пульсация) Впервые этот способ интенсификации массообмена в жидкофазных средах, запатентованный Ван-Дейком в 1936 г. в механическом и гидравлическом исполнении, нашел применение в технологии обогащения радиоактивных материалов. По продвижению способа в гражданские много тоннажные производства большая работа проведена отечественными специалистами под руководством Карпачевой С.М. [11], была показана возможность повышения эффективности промышленных аппаратов для процессов жидкостной экстракции в 3,5–4,0 раза.

Использование в качестве системообразующего явления нестационарную гидродинамику (пульсаций дисперсионных сред) позволило выйти на качественно новый уровень аппаратурного оформления тепломассообмена и гидродинамики в процессах: - экстракции (жидкость - жидкость), экстрагирования (твердые дисперсии - жидкость), фильтрации гидродинамических дисперсий, разделения низкоконцентрированных суспензий.

При выборе аппаратурного оформления реакционных и тепломассообменных процессов в многофазных системах для получения обоснованных затрат энергии и ресурсов необходимо оптимизировать гидродинамические условия их протекания – развитую поверхность контакта фаз при противоточном режиме их взаимодействия. Наиболее трудно эта задача решается для процессов в жидкофазных и твердо-жидкофазных системах.

Выделение в типовом пульсационном колонном экстракторе системообразующего явления возвратно-поступательного перемещения столба жидкости с рабочей частотой и амплитудой, его силовой анализ, с использованием принципа равновесия Делабера, позволил установить аналитическую зависимость возникающих при его работе динамических сил от режимных, конструктивных, геометрических параметров системы и физических свойств её рабочих сред. Трёхмерная система уравнений равновесия АТС (пульсационного аппарата), позволяет рассчитать возникающих при его работе динамические нагрузки и определить условия их устранения, что позволило успешно провести опытно-промышленные испытания и внедрение динамически уравновешенных пульсационных экстракторов. На Волжском и Казанском заводах СК были проведены соответственно испытание опытно-промышленного ( $D = 0,5$  м,  $H = 6$  м) и внедрение промышленного образцов ( $D = 1,2$  м,  $H = 12$  м) динамически уравновешенных пульсационных экстракторов. Аппараты были установлены на межэтажных перекрытиях. Теоретические расчеты и стендовые исследования динамических нагрузок были подтверждены при эксплуатации их в рабочем режиме – динамические нагрузки на межэтажные перекрытия отсутствовали[12].

Основными технологическими показателями жидкофазного экстрактора, определяющего его ресурсную и энергетическую эффективность – удельная производительность и интенсивность массообмена между диспергируемой и дисперсионной фазами. Первый технологический показатель зависит от скорости седиментации или осаждения диспергируемой фазы и определяется разностью их плотностей. Второй – зависит от величины удельной межфазной поверхности и частоты коалесценции и редиспергирования одной из фаз. Наложение на дисперсную среду синусоидальных пульсаций, с одной стороны ухудшает условия седиментации и коалесценции диспергируемой фазы, что приводит к снижению предельной производительности аппарата и отрицательно сказывается на регулярности протекания этих явлений, а с другой – стабилизирует по высоте аппарата величину межфазной поверхности.

Последним фактором обеспечивается высокая разделительная способность жидкофазных пульсационных экстракторов. Из такого сложного характера взаимодействия рассматриваемых явлений можно сделать вывод об избыточности традиционного симметричного синусоидального режима пульсаций. Оценка времен протекания явлений седиментации, коалесценции и редиспергирования фазы при заданной суммарной производительности и соотношения расходов фаз отличаются больше, чем на порядок. Явление редиспергирования протекает за десятые доли секунды, практически в интервале максимальных скоростей одного полупериода, то есть, дважды за весь период. С целью более эффективного использования регулярной нестационарности для интенсификации процесса жидкостной экстракции целесообразна несимметричная пульсация – с различным энергетическим потенциалом каждого полупериода. В этом случае явления редиспергирования и коалесценции протекают в более благоприятных условиях – не совмещены во времени. Техническая реализация такой гидродинамической нестационарности не вызывает каких-либо сложностей.

Теоретические и экспериментальные исследования [13, 14] влияния несимметричной пульсации на технологические характеристики АТС показали возможность подбором параметра несимметричности:

- получить максимальные значения технологических характеристик аппарата при снижении энергетических затрат;

- в зависимости от физических свойств обрабатываемой жидкофазной дисперсии обосновано выбирать условия протекания явлений седиментации, коалесценции и редиспергирования.

Для жидкофазных массообменных процессов регулярная нестационарность является по существу системообразующим гидродинамическим явлением экстрактора, поскольку позволяет создать в аппарате для редиспергирования одной из фаз локальные зоны с необходимым масштабом изотропной турбулентности. Инвариантность такой зоны к габаритным размерам промышленного АТС позволяет существенно улучшить моделируемость или устойчивость (масштабируемость) за счет обоснованного выбора её конструктивных параметров.

Использование регулярной нестационарности в качестве системообразующего гидродинамического явления позволило найти оригинальный способ пульсационного технологического транспортирования (ПТТ) критически концентрированных суспензий и агрегировать на его основе АТС для проведения в концентрированных суспензиях тепло и массообменных процессов при противоточном взаимодействии твердой дисперсии и жидкой дисперсионной среды [5].

Способ ПТТ открывает возможность критической ревизии технологических процессов в горнодобывающих, сырьевых сельскохозяйственных и других отраслях промышленности, в которых имеется необходимостью обработки много тоннажных потоков твердых дисперсий

Способ пульсационного технологического транспортирования твердой дисперсии в виде плотного слоя был апробирован в промышленных условиях, получил высокую оценку отечественных и зарубежных специалистов. Апробация способа была проведена:

– в фармацевтическом производстве для процесса водного экстрагирования из березового гриба чаги биологически активных веществ, были проведены промышленные испытания пульсационного аппарата производительностью 3-4 т. в сутки;

– в спиртовом производстве для процесса экстрагирования этиловым спиртом ароматических смол из хмеля, был внедрен пульсационный аппарат производительностью 8-10 т. в сутки сухому хмелю.

Методологические аспекты промышленного освоения специальных технологий вырабатываются в условиях повышенной востребованности социума. Разработчикам таких проектов ставится задача выбора аппаратурно-технологических решений целевого назначения, приемлемой ресурсоэффективностью [2, 8, 9, 10]. Коллективы специалистов неизбежно интуитивно выходят на установленные эпистемологией законы освоения реальности и принцип агрегирования АТС, внося, при этом свой вклад в расширение и углубления базы знаний, опыта в совершенствовании в целом инфраструктуры социума.

Нано материалы и технологии скорее следует рассматривать как один из этапов развития технологической инфраструктуры социума на той же философской и методологической основе, на которой происходило её становление и развитие в последние столетия.

Адекватный поход к выбору аппаратурно-технологических решений позволяет существенно снизить риски при разработке и промышленном освоении АТС с достижением ими мирового уровня ресурсоэффективности, что дает основание считать эту проблему социально значимой, требующей концептуальной корректировки в высших технических учебных заведениях содержания курсов гуманитарных, общенаучных и аппаратурно-технологических дисциплин.

## Литература

1. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. – М.: Наука, 1976. -464с.
2. Матрёнина О.М. Математическое моделирование многоименных дискретно-непрерывных химико-технологических систем производств нитрата целлюлозы. Дисс. на соискание ученой степени канд.тех.наук. 05.17.08 – Казань, КНИТУ (КАИ) им Туполева, 2010. Научн.рук. доктор техн.наук, проф. Марченко Г.Н.
3. Общая теория масштабирования и ее применение к процессам экстракции/RosenA.M.|| ISEC'88 Int. SolventExtr.Conf., Moscow, Juli 18-24, 1988: Conf. Pap. Vol.2 – Moscow, 1988.–с.267-269.
4. Давид Дойч. Структура реальности: РХД; Москва-Ижевск; 2001.
5. Гурьянов А.И., Костерин А.В., Сигал П.А. Способ ГАСПАКА. Проведение непрерывного массообменного процесса/Патент РФ №2050917, 27.12.1995, БИ №36.
6. Дьяконов С.Г., Елизаров В.И., Кафаров В.В. Современное физическое и математическое моделирование про-

- мышленных аппаратов. ДАН СССР, 1986.-т.282, №5.-1196-1199.
7. Гурьянов А.И. Конструктивное совершенствование СХТС//Математическое моделирование сложных химико-технологических систем (СХТС-III). Тезисы доклада III Всесоюзной конф.-Таллин: 1982, ч.2.-с.155.
  8. Марченко Г.Н., Матвеев В.В. Введение в квазигетерогенную теорию зажигания реагирующих конденсированных веществ. «ФЭН», Казань.1997, 326с.
  9. WhoisWho России, 6 выпуск 2012г. Энциклопедия личностей серии HubersWhoisWho. Адрес редакции: Россия, 115088, г. Москва, ул. Угрешская, д.2, строение 2, офис 207, с. 1498.
  10. Александровский А.А. Исследование процесса смешения и разработка аппаратуры для приготовления композиций, содержащих твердую фазу. 05.17.08 – Процессы и аппараты химической технологии. Автореферат дисс. на соискание учен. степени доктора тех. наук. – Казань, КХТИ им.С.М.Кирова, 1977.
  11. Моделирование и оптимизация процессов массообмена в пульсационных реакторах/ С.М.Карпачева, В.И.Кошкин// Теорет. Основы хим. технологии.- 1990. – т.24, №1. – 137-141.
  12. Гурьянов А.И., Егоров. Н.И., Каган С.З. Разработка и исследование пульсационного коаксиального экстрактора. Химич. Промышленность, №4, 1980, с.232-234.
  13. Гурьянов А.И., Моряшов А.А. Исследование предельной производительности и дробление дисперсной фазы в экстракторе с асимметричной пульсацией потоков. В сб.: Массообменные процессы и аппараты хим.технологии. Казань, КХТИ, 1987, с.50-55.
  14. Гурьянов А.И., Розенцвайг А.К. Теоретико-экспериментальный анализ механизмов разрушения капель в пульсационных экстракторах. В сб.:Массообменные процессы и аппараты хим.технологии, КХТИ, Казань, 1984, с.71-73.

---

© **А. И. Гурьянов** – д-р техн. наук, проф. каф. энергообеспечения и энергоресурсосберегающих технологий КГЭУ, gurai@mail.ru; **Г. Н. Марченко** – д-р техн. наук, проф., член-корр. АН РТ, Marchenkogerman@mail.ru.

© **A. I. Guryanov** - Doctor of technical sciences, professor KFEU, , gurai@mail.ru; **G. N. Marchenko** - Doctor of technical sciences, professor, Marchenkogerman@mail.ru.