

Введение Завершающей операцией приготовления энергонасыщенных смесей является смешивание компонентов в специальных устройствах — смесителях порционного или непрерывного действия. С технической точки зрения важно не только ввести в пиротехнический состав предусмотренные рецептурой компоненты в требуемом соотношении, но и необходимо, чтобы все они были равномерно распределены во всем объёме композиции. Однородность смеси обеспечивает одинаковые свойства во всех частях её объёма. Использование пиротехнических смесей неоднородных по своему составу значительно снижает их эффективность. Особенно важно распределять в массе композиции компоненты, вводимые в небольших количествах и имеющие высокую активность: горючие, окислители, инициаторы взрывчатых веществ и т.д. Однородность смеси имеет большое значение, поскольку минимальная навеска, а тем более количество композиции используемое, в частности для изготовления капсуля, может быть очень незначительно. В отдельных случаях, масса требуемого количества смеси исчисляется несколькими десятками грамма. И в этом не большом количестве навески должны быть вещества, предусмотренные рецептурой пиротехнического состава. В настоящее время каждая категория потребителей смесительных машин имеет возможность приобретения уникальной модели, выбор которой, в частности, обуславливается объёмами производства и условиями работы. При этом основными параметрами выбора являются производственная вместимость машины, энергоемкость и интенсивность процесса смешивания, технологичность, её надежность и стоимость. Условно смесители делятся на два класса: со свободным смешиванием компонентов (гравитационные), и с принудительным смешиванием компонентов. При этом использование смесителей первого типа целесообразно в случае приготовления пластичных смесей, т.е. смесей обладающих меньшим удельным сопротивлением при смешивании. Второй тип используется для приготовления более жестких композиций. Еще на стадии обзора предлагаемых к промышленному использованию конструкций, анализ существующих технических решений позволяет определить потенциальные возможности оборудования и выяснить целесообразность его использования. Так, наименьшего эффекта следует ожидать от смесителя со свободным смешиванием материалов, в которых смешиваемые материалы имеют лишь две (в некоторых случаях - три) составляющие движения, а смешивание обеспечивается только постоянным движением – вращательным и (или) поступательным. Анализ имеющихся источников информации позволяет отметить для использующегося оборудования, следующие достижимые результаты работы: для смесителей, в которых организовано свободное смешивание материалов, величина неоднородности смеси составляет 0,15 – 0,12; для смесителей с принудительным смешиванием компонентов смеси, степень сепарации находится в пределах 0,08 – 0,1. Здесь следует оговориться,

что оба типа смесителей не гарантируют качество готовой смеси. Это связано, прежде всего, со слабым протеканием диффузионных процессов на уровне микрообъемов, в результате чего готовые изделия могут иметь значительный разброс по своим характеристикам: скорости горения, энерговыделению и т.д. Промышленный опыт получения пиротехнических составов показывает, что основной причиной является неоднородность готовой композиции, т.е. не высокое качество смеси получаемой в подобных смесителях. Определенного эффекта можно ожидать от использования вибросмесительного оборудования, которое позволяет достигать состояния смеси, величина неоднородности которой для пиротехнического состава будет находиться в пределах 0,03 – 0,05. Дело в том, что вибрационные смесители обеспечивают до пяти составляющих движений, а смешивание осуществляется одновременно и поступательными и вращательными, произвольно меняющимися во времени, движениями смеси. В данном типе смесителей композиция получает наибольшее количество воздействий в единицу времени со стороны машины, что позволяет максимально активировать смесь. На данный момент времени уже имеется достаточно богатый опыт эксплуатации вибрационного оборудования, однако появление новых технологий и меняющиеся требования, как к исходным компонентам, так и к готовому продукту приводит к тому, что существующее и хорошо себя зарекомендовавшее вибрационное оборудование уже не всегда может удовлетворить возросшие потребности производства. Нововведения технологов при приготовлении пиротехнических составов, как правило, заключаются во введении новых типов активаторов или иницирующих веществ, изменении количества и соотношения смешиваемых компонентов и т.д., что в свою очередь приводит к изменению реологии смеси. В действительности же происходит изменение модели смешивания, и при условии неизменности технологических параметров характеризующих режим смешивания, сопровождается неудовлетворительным результатам, что и не удивительно. Частично решить проблему при обработке микрогетерогенных высоконаполненных смесей позволяет применение значительно более интенсивных режимов колебаний. Тем не менее, такое решение не всегда может быть оптимальным. Дальнейшее повышение интенсивности смешивания может быть достигнуто только при использовании новых эффектов воздействия. Это обуславливает необходимость поиска новых технических идей, и одним из вариантов решения поставленной задачи, в данном случае, может быть использование эффекта нелинейных колебаний. Сложный спектральный состав и асимметрия нелинейных режимов способствуют ускоренному протеканию многих вибрационных технологических процессов, а использование эффекта возбуждения позволяет обеспечить практически абсолютную технологическую устойчивость нелинейных колебаний в вибрационной машине. Отход от симметрии упругой характеристики системы сопровождается бифуркациям, в результате которых происходит постоянное

скачкообразное изменение состояния равновесия системы. В обогащаемой композиции при этом происходит резкое увеличение скорости протекания диффузионных процессов на уровне макрообъемов. Отмеченная особенность нелинейных колебаний весьма полезна для практического использования. Высокая технологическая эффективность асимметричных режимов вибрационной обработки по сравнению с гармоническими режимами подтверждена экспериментально. Опыта же эксплуатации вибрационного оборудования, в котором реализуется специфический асимметричный режим, на данный момент пока накоплено недостаточно. Это обусловлено рядом сложностей, возникающих на этапе его проектирования. При довольно простой конструктивной реализации идеи использования эффекта нелинейных колебаний возникают вопросы при выборе параметров составляющих сущность конкретных технических режимов работы. Отдельную проблему представляет и разработка научно обоснованной методики создания математической модели, позволяющей осуществлять масштабный переход при проектировании оборудования, учитывающего ряд очевидно не связанных между собой факторов: энергоэффективность, реологические свойства, производительность и т.д. По этой причине вопросы, касающиеся моделирования поведения системы, имеют актуальность, а их практическое применение позволит расширить как типы эксплуатируемого оборудования, так и области его применения.

Экспериментальная часть Для проверки реализуемости описанных выше достоинств эффекта нелинейных колебаний в реальной механической системе были проведены экспериментальные исследования на специально разработанном вибрационном стенде, предложенном кафедрой «Машины и аппараты химических производств» Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). Рис. 1 - Вибростенд В основу работы этого смесителя положен принцип использования гармонических круговых колебаний, накладываемых ортогонально вертикальной оси смесительной емкости. Такой способ реализации технической идеи наиболее характерен для большей части предлагаемых к промышленному использованию конструкций вибрационных смесителей. Вибростенд состоит из вибростола, установленного на шести спиральных пружинах (основных упругих элементах), жестко закрепленных на раме (рис. 1). Излом упругой характеристики системы обеспечивается путем введения в конструкцию дополнительных ограничивающих упругих элементов. (Особенность конструкции смесителя сохраняет возможность переход между исследуемыми режимами за счет переналадки вибростенда и позволяет осуществлять гибкую регулировку режима работы при наложении на систему нелинейных колебаний). Привод вибростенда состоит из электродвигателя подключаемого через преобразователь частоты вращения (модель LS-600) в трехфазную сеть переменного тока, корпуса подшипникового узла дебаланса совмещенного с

фланцем кронштейна дебаланса. В корпусе подшипникового узла монтируется втулка, которая с одной стороны собирается с кронштейном дебаланса, а с другой соединяется с валом двигателя. Собранный привод с помощью шпилек крепится к нижней части вибростола. Генерируемая при вращении дебалансных валов вынуждающая сила вызывает горизонтальные колебания вибростола. Конструкция вибростенда позволяет в ходе исследования регулировать массу дебаланса и частоту установившихся колебаний системы. Основные параметры вибростенда были приняты следующими: масса колеблющихся частей $m = 10,6$ кг, суммарная жесткость основных упругих элементов $k_1 = 340\,700$ Н/м, суммарная жесткость упругих ограничителей изменяется в пределах $k_2 = (1 \div 5) k_1$, зазор между вибрационным столом и упругими ограничителями Δ изменяется в пределах $(0,1 \div 0,9)A$ мм, статический момент массы инерционного элемента $m_{др} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ кг·м, мощность электродвигателя $N = 0,12$ кВт. В ходе исследования были получены законы движения вибростола. Для удобства представления результатов и анализа исследуемой системы были введены в рассмотрение следующие безразмерные параметры подлежащие варьированию: $\dots$. На рисунке 2 в качестве примера в плоскости безразмерных параметров показана область рекомендуемых эксплуатационных режимов работы смесителя. Рис. 2 – Изменение подводимой энергии при работе на нелинейном режиме: 1 – эксперимент; 2 – расчет; 3 – гармонические колебания ($\kappa = 2,5$, $\nu = 0,85$) Экспериментальные исследования состояли из двух частей и проводились следующим образом. Первая часть эксперимента. Работа, выполненная в этой части была направлена на выявление эффективных режимов функционирования установки при наложении гармонических колебаний на смесь в зависимости от частоты, амплитуды и коэффициента заполнения емкости. В качестве смешиваемых компонентов использовался речной песок с размером частиц от 100 мкм до 160 мкм и гидроксид калия (KOH). Содержание гидроксида калия в соответствии с рецептурным составом в композиции составляет 5% от общего объема смеси. За ключевой компонент принимается гидроксид натрия. На основании проведенных экспериментов были получены амплитудно-частотные характеристики для различных режимов и графики зависимости коэффициента неоднородности от степени заполнения емкости при соответствующих режимах работы. Компромисс «производительность-качество» для готовой композиции достигался при коэффициенте заполнения, лежащем в диапазоне от 0,3 до 0,45 (для используемой конструкции смесительной емкости). При значениях коэффициента заполнения выше 0,5 наблюдалось снижение качества готовой смеси. В случае работы установки при значениях коэффициента заполнения меньше 0,3 улучшения качества смеси не наблюдалось, однако уменьшение объемов загружаемых компонентов приводило к снижению производительности оборудования. Качество смеси оценивалось путем отбора и последующего

анализа. Оценка качества смешивания проводилась по общеизвестной методике определения значения коэффициента неоднородности смеси, который вычислялся по следующей формуле: $K_j = \frac{c_i}{c_0} \cdot \frac{1}{i}$, где c_i – текущее значение концентрации одного из компонентов в пробах; c_0 – концентрация того же компонента при идеальном распределении; i – общее число взятых проб. Изменение амплитуды колебания осуществлялось за счет использования съемных грузов инерционного элемента. Анализируя результаты экспериментов можно отметить, что изменение амплитуды в диапазоне от 1 до 3 мм значительного влияния на качество смеси не оказывало, однако увеличение ее до 3-6 мм приводило к увеличению коэффициента неоднородности. Это, вероятнее всего, является следствием агрегатирования частиц и сильным проявлением насосного эффекта, препятствующего в частности, отрыву частиц от дна емкости, что в свою очередь вызывает изменение интенсивности диффузии слоев смеси.

Оптимальные значения коэффициента неоднородности достигались при частоте вращения инерционного элемента 1450 - 1500 об/мин. При этом достижимое значение коэффициента неоднородности смеси принимало значение $K_j = 0,15$ (рисунок 3, кривая 2). При режимах работы на частотах вращения инерционного элемента меньше указанного значения наблюдалась сегрегация фракций и общая нестабильность протекания процесса. При частотах больше указанных достижимое значение коэффициента неоднородности смеси находилось в пределах $K_j = 0,24 - 0,30$. Это объясняется отчасти тем, что каждая смесь в зависимости от физических свойств смешиваемых компонентов характеризуется своим определенным набором режимных параметров, оптимальных для проведения процесса. Рис. 3 – Изменение коэффициента неоднородности смеси: 1 – нелинейные колебания; 2 – гармонические колебания. По результатам первой части экспериментальных исследований оптимальным для дальнейшего исследования являлся следующий режим: частота вращения инерционного элемента 1450 об/мин, амплитуда колебаний 5,5 мм, коэффициент заполнения емкости 0,35. Вторая часть эксперимента. Во второй части экспериментов оценивался эффект использования нелинейных колебаний. На рисунке 3, кривая 1 представлен график изменения коэффициента неоднородности для смеси в случае реализации эффекта нелинейных колебаний. При этом достижимое значение коэффициента неоднородности смеси принимает значение $K_j=0,1$. Хорошо видно, что при общей интенсивности процесса смешивание протекает гораздо эффективней при использовании нелинейных колебаний. При этом общая стабильность процесса выше, нежели при гармонических режимах работы. Некоторое изменение коэффициента неоднородности при увеличении времени протекания процесса связано, во-первых, с постепенным измельчением крупной фракции в результате трения частичек друг о друга и о стенки емкости (истирание приводит к некоторому искажению результата, поскольку отобранные пробы смеси рассеиваются на ситах с соответствующими размерами

ячеек, после чего оцениваются объемы рассеянных компонентов). Во-вторых, частично это объясняется склонностью гидроксида калия к адгезии (проявляющейся в прилипании частичек ключевого компонента к поверхности контейнера) при длительной обработке. Выводы На сегодняшний день существует большое количество конструкций вибрационного смесительного оборудования, позволяющего обрабатывать смеси с самыми разнообразными реологическими свойствами. При этом на рынке представлены модели как отечественного, так и иностранного производства (Италия, Израиль, Германия). В силу единства принципов и закономерностей процесса смешивания, как в тех, так и в других смесителях отсутствуют какие либо существенные отличия, как по функциональным возможностям, так и по качеству смешивания. Следует отметить более высокие показатели зарубежных смесителей по удельным энергозатратам, материалоемкости, эстетическим и эргономическим показателям. Однако ни одним из производителей вибрационного оборудования не рассмотрена возможность использования нелинейных динамических эффектов в предлагаемых ими конструкциях. Изложенные в данной статье результаты являются передовым опытом по исследованию полезного использования эффекта нелинейных колебаний для создания новых и усовершенствования существующих вибрационных технологических процессов и машин. Не смотря на положительный эффект от реализации предложенных идей на практике, они не могут быть признаны достаточными, а всего лишь позволяют говорить о необходимости продолжения исследований в этой области. Во многом возможность создания нового поколения вибрационных машин, реализующих эффект нелинейных колебаний, обусловлено рядом теоретических проблем. Успех в решении теоретических проблем позволит разработать универсальную методику расчета вибровозбудителей различной мощности и различного функционального назначения. Указанное направление открывает широкое поле деятельности для специалистов по вибрационной технике.