

## II. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ОГНЕВЫХ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Д.А. Кондрашов, В.Г. Ефимов, А.Н. Галахов, А.В. Финажин, А.Н. Охотникова

АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск Алтайского края

Основной характеристикой процесса горения высокоэнергетических материалов является скорость горения. Для её определения используется ультразвуковой (УЗ) метод, отвечающий требованиям обеспечения высокой точности, дистанционности, безопасности, дешевизны, автоматизации обработки результатов испытаний и не влияющий на процессы, происходящие внутри объекта исследования. Данный метод определения скорости горения является наиболее перспективным и вызывает повышенный интерес зарубежных исследователей [1–2].

Его действие основано на анализе времени прохождения УЗ волны от излучающего преобразователя через стенку корпуса и свод наполнителя до приемного преобразователя. При этом излученная продольная волна претерпевает отражение от поверхности канала изделия (рисунок 1). Поскольку скорость распространения УЗ волны  $C$  в объекте исследования постоянна, то изменение толщины свода приведет к изменению траектории распространения волны и, следовательно, времени прихода к приемному преобразователю. По изменению времени прихода отраженного сигнала (по сравнению с начальным положением), регистрируемого дефектоскопом, определяется толщина изменившегося (сгоревшего) свода и соответственно скорость перемещения фронта горения.

Рисунок 2 иллюстрирует определение искомой временной  $t_i$  координаты по алгоритму выделения первого вступления отраженного сигнала.

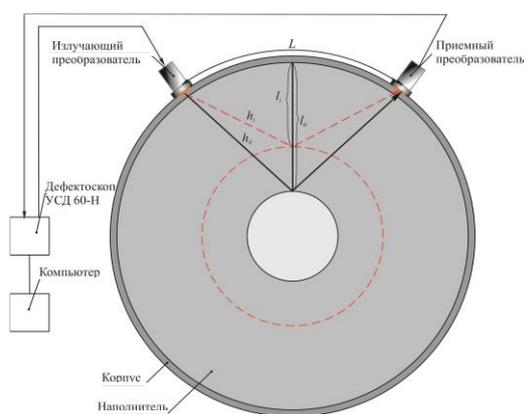


Рисунок 1 – Схема определения толщины свода

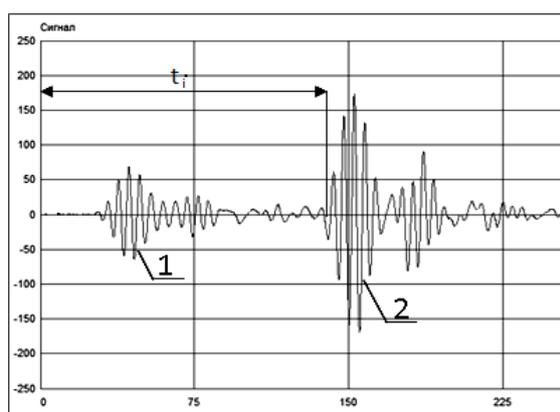


Рисунок 2 – Осциллограмма регистрируемых сигналов: 1 – УЗ импульс, распространяющийся по поверхности корпуса; 2 – УЗ импульс, отраженный от поверхности наполнителя;  $t_i$  – время распространения отраженного импульса

Толщину горящего свода определяют сечением  $l_i$ , перпендикулярным оси изделия, по известным значениям начальной толщины свода  $l_0$  и расстоянию между акустическими осями излучающего и приемного УЗ преобразователей  $L$ :

$$l_i = \sqrt{\frac{\left(h_0^2 + \frac{L^2}{4}\right) * t_i^2}{t_0^2} - \frac{L^2}{4}}.$$

Скорость перемещения фронта горения:  $V = \frac{l_{i+1} - l_i}{t_{i+1} - t_i}$ .

Комплекс технических средств, реализующих метод измерения, состоит из:

- дефектоскопа УСД-60Н (ТУ 4276-010-33044610-09) с установленной частотой повторения зондирующих импульсов 30 Гц;
- излучающего и приемного УЗ преобразователей с рабочей частотой 200 кГц;
- устройств крепления УЗ преобразователей к наружной поверхности корпуса изделия;
- персонального компьютера для регистрации сигнала;
- кабелей соединительных радиочастотных;
- линии связи Ethernet.

Анализ результатов проводился в автоматическом и в ручном режиме целеуказания оператором информативной отсчетной временной координаты. Выбор режима определяется из следующих соображений. До пуска и на начальном участке работы изделия информативная координата (при фиксированной амплитуде строба срабатывания) стабильно выделяется в автоматическом режиме. По мере выгорания свода отраженный импульс попадает в область импульса, прошедшего по поверхности корпуса (корпусной импульс), накладываясь на него, непрогнозируемо искажает форму выходного сигнала, что приводит к произвольному «перескоку» отсчетной координаты. В данной области реализуется значительный разброс данных по скорости перемещения, которые не могут считаться достоверными. На рисунке 3 по оси абсцисс указано относительное время, по оси ординат – относительная амплитуда.

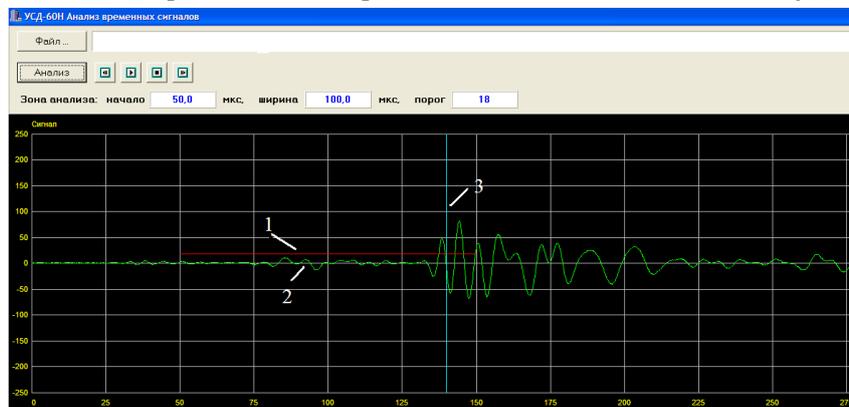


Рисунок 3 – Осциллограмма УЗ сигнала: 1 – строб участка измерения; 2 – корпусной импульс;

3 – автоматически выделенная отсчетная координата

На этапе предварительной обработки:

– методом линейной интерполяции исходные данные приведены к равномерной сетке временных отсчетов, с дискретностью 0,05 с;

– скорость распространения продольной УЗ волны в наполнителе  $C$  откорректирована с учетом текущего давления  $p$  по выражению [3]:

$$C = \frac{\tilde{N}_0}{1 - k(p - p_0)},$$

где  $\tilde{N}_0$  и  $p_0$  – значения скорости распространения и давления до пуска изделия;  $k = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}^{-1}$  – коэффициент волновой скорости.

Для уменьшения погрешности определения скорости перемещения проведено усреднение значений по алгоритму скользящего среднего. Размер окна усреднения менялся от 0,15 до 0,45 с. Результаты усреднения приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Результаты усреднения**

Время усреднения, с	0	0,15	0,25	0,35	0,45
Средняя скорость, мм/с	11,4±0,7	11,1±1,9	11,1±1,9	10,9±1,1	10,5±0,6

Для выявления возможных гармонических компонент в скорости перемещения проведен вейвлет-анализ данных на указанных участках работы и установлен масштаб разложения (частота  $f$ ) сигнала, при котором его энергия имеет максимальное значение (таблица 2).

**Таблица 2 – Результаты анализа**

Время усреднения, с	0	0,15	0,25	0,35	0,45
Частота $f$ , Гц	6	3	6	4	3

## Выводы

1. Комплекс технических средств, реализующий УЗ метод определения скорости горения высокоэнергетических материалов, показал свою работоспособность в условиях огневых стендовых испытаний и позволил провести регистрацию перемещения фронта горения с погрешностью 7...10 %.

2. Дальнейшее совершенствование комплекса направлено на разработку специализированного измерителя с повышенной частотой регистрации и программного обеспечения для регистрации данных на ПК. Также существует необходимость синхронизации работы разработанного комплекса технических средств к системе единого времени огневого испытательного стенда.

## Список литературы

1. Хасегава К., Хори К. Новый метод измерения скорости горения твердого топлива с помощью ультразвука // Физика горения и взрыва.– 2010.– № 2. – С. 79–87.

2. Kurabayashi H., Sato A., Yamashita K., Nakayama H., Hori K., Honda M., Hasegawa K. Ultrasonic Measurements of Burning Rates in Full-Size Rocket Motors // Progress in Propulsion Physics. –2011.– № 2. –Р. 135–148.

3. Коти Ф., Ерейдес Ч. Ультразвуковой метод измерения скорости горения: ошибки, шумы и чувствительность // Физика горения и взрыва.– 2000.– Т.36.– № 1.– С. 59–67.

#### **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРИКОРПУСНОЙ ЗОНЕ ИЗДЕЛИЯ**

С.В. Кулявцева, А.М. Громов, Л.Г. Егорова, С.А. Рябков

*АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск Алтайского края*

Конструкционные особенности ракетного двигателя, такие как выточки, щелевые вырезы, манжетные раскрепления, удаляют конструкцию от равнопрочного состояния. Одновременно различие сил межмолекулярных взаимодействий в материалах изделия и теплозащитного покрытия (ТЗП) приводят к охрупчиванию (ужесточению) материала наполнителя на границе раздела с ТЗП и соответственно снижают механическую работоспособность изделий.

Причины ужесточения материала в прикорпусной зоне двигателя объясняются миграцией пластифицирующих добавок, однако физика миграционных процессов остается неясной. Все это вызывает необходимость разработки таких технологических процессов изготовления изделий, которые бы позволили устранить или уменьшить ужесточение материалов на границе их раздела из-за миграции пластификаторов.

Для решения задач массообмена широко используются методы термодинамики необратимых процессов [1]. При этом неоднократно высказывалось мнение, что решение получающихся сложных систем дифференциальных уравнений практически невозможно. Поэтому усилия многих исследователей были направлены на построение физических моделей процесса, допускающих математическое описание процесса в форме, пригодной для традиционных методов решения.

Цель настоящей работы – создание методики исследования процессов массопереноса в полимерных материалах, в том числе на границах их разделов; изучение процессов диффузии пластификатора в прикорпусной зоне изделия.

В процессе работы проводились экспериментальные исследования и математические расчеты процессов диффузии в полимерных материалах и на границе разделов двух сред.

В результате на основе метода конечных элементов [2] поставлена задача диффузии и реализована методика расчета полей концентрации, диффузионного потока и градиента пластификатора в разнородных соприкасающихся неподвижных средах. Проведены исследования диффузионных процессов в соединениях разнородных полимерных материалов и в окрестности границ связки полимерный материал–ТЗП–оболочка. Рассматриваются задачи переноса тепла теплопроводностью и молекулярной

диффузии в неподвижной среде, в частности, в твердом теле, которое может быть непористым ненабухающим, непористым коллоидным набухающим, капиллярно-пористым и смешанным – коллоидным капиллярно-пористым [3].

Во многих задачах взаимосвязанного тепло- и массопереноса время протекания тепловых и диффузионных процессов соизмеримо. Поэтому задачу взаимосвязанного переноса можно «развязать», используя дополнительную температурно-концентрационную зависимость  $T(C)$ , заменяя многочисленные переносные коэффициенты («температурная развязка» предложена В.И. Коноваловым) [4].

Обычно уравнения теплопроводности и диффузии рассматривают отдельно. Однако в рамках термодинамики необратимых процессов можно их обобщить, учитывая связь между одновременно идущими процессами переноса тепла и вещества; связь, приводящую к существованию эффектов, непосредственно не вытекающих из законов сохранения, таких как эффект термодиффузии, возникновение градиента концентраций в неоднородном температурном поле (эффект Соре) или обратный ему эффект возникновения градиента температуры в неоднородном концентрационном поле (эффект Дюфо) и др. Связь процессов одновременного переноса массы, теплоты и количества движения устанавливает теорема Онзагера [1]. Перенос теплоты может вызвать перекрестный процесс – диффузию.

В соответствии с теоремой Онзагера взаимосвязанная система уравнений А.В. Лыкова [5] трансформируется к системе двух классических уравнений теплопроводности и диффузии с одним оператором Лапласа:

$$\partial P_i / \partial \tau = A_i \nabla^2 P_i. \quad (1)$$

Здесь для теплопроводности действует закон Фурье; диффузии – закон Фика.

Основной задачей аналитической теории тепломассопереноса является изучение пространственно-временного изменения основной физической величины – полевой функции  $P$ , характеризующей либо процесс изменения температурного поля  $P \rightarrow T = f(x, y, z, t)$  в результате теплопереноса, либо процесс изменения концентрационного поля в результате диффузии:

$$P \rightarrow C = f(x, y, z, t), \quad (2)$$

где  $x, y, z$  – пространственные прямоугольные координаты;  $t$  – время.

При решении задачи о диффузии пластификатора в однородной среде достаточно воспользоваться моделью нестационарного теплопереноса, заменяя коэффициент температуропроводности на коэффициент диффузии, при соответствующих граничных и начальных условиях.

Для составных тел это не так. При решении задач теории упругости или нестационарной теплопроводности методом конечных элементов граничные условия сопряжения между контактирующимися телами с различными механическими или теплофизическими характеристиками (граничные условия IV-рода) выполняются

автоматически, в то время как в задачах диффузии концентрация диффузанта  $C$ , в отличие от температуры  $T$ , не является непрерывной функцией при переходе через границы конечных элементов.

Граничные условия сопряжения (IV-рода), соответствующие массообмену между соприкасающимися твердыми телами (в случае газообразного диффузанта граничные условия подчиняются закону Генри), задаются в виде:

$$K_{\delta_1} \tilde{N}_1 = K_{\delta_2} \tilde{N}_2, \quad (3)$$

где  $K_{\delta_1}$  и  $K_{\delta_2}$  – константы растворимости соприкасающихся сред 1 и 2 соответственно [3, 6];  $\tilde{N}_1$ ,  $\tilde{N}_2$  – концентрация диффузанта на границе соприкасающихся тел 1 и 2 соответственно.

Для анализа процесса диффузионного обмена между контактирующими телами на основании закона сохранения энергии на границе соприкосновения двух сред (или тел) в дополнении к (3) необходимо реализовать следующее условие:

$$-D_1 \frac{\partial C_1}{\partial n} \Big|_s(t) = -D_2 \frac{\partial C_2}{\partial n} \Big|_s(t), \quad (4)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  – коэффициенты диффузии в соприкасающихся средах 1 и 2 соответственно; оператор  $\frac{\partial}{\partial n}$  означает дифференцирование вдоль нормали к поверхности раздела сред.

Используя соотношения (3) и (4), можно показать связь между константами растворимости и коэффициентами диффузии. Действительно, из соотношения (3) следует, что  $\tilde{N}_1 = \frac{K_{\delta_2}}{K_{\delta_1}} \tilde{N}_2$ . Подставляя полученное выражение в (4), получаем:

$$-D_1 \frac{K_{\delta_2}}{K_{\delta_1}} \frac{\partial \tilde{N}_2}{\partial n} \Big|_s(t) = -D_2 \frac{\partial \tilde{N}_2}{\partial n} \Big|_s(t)$$

или

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{K_{\delta_1}}{K_{\delta_2}}. \quad (5)$$

Соотношение (5) может быть полезным как контрольное при экспериментальном определении коэффициентов диффузии и растворимости контактирующих пар.

Как известно [7], решение задачи об определении распределения концентрации диффузанта в массиве сводится к отысканию минимума функционала  $\chi$ , к задаче на отыскания его экстремума (минимума):

$$\frac{\partial \chi}{\partial \varphi} = \frac{\partial}{\partial \varphi} \sum_{e=1}^E \chi^{(e)} = \sum_{e=1}^E \frac{\partial \chi^{(e)}}{\partial \varphi} = 0. \quad (6)$$

Вычисление интегралов после их выражения через узловые значения  $\varphi$  приводит к системе линейных алгебраических уравнений (6) порядка  $N \times N$ , где  $N$  – число узлов

сетки конечных элементов, решение которой дает значения вектора концентрации диффузанта в узлах конечных элементов  $\varphi$  функции  $\{\varphi\}$ .

Поскольку из решения (6) находится относительная концентрация в узлах элемента  $\varphi = \tilde{N}/\tilde{N}_0$ , реальная концентрация пластификатора найдется из соотношения:

$$\tilde{N} = \varphi \cdot \tilde{N}_0. \quad (7)$$

При конечноэлементном моделировании диффузионной задачи вес диффузанта  $G$ , мигрировавшего из наполнителя в ТЗП или из одной контактирующей пары в другую, или из одной части области массива в другую часть, может быть определен через концентрацию, содержащуюся в отдельном конечном элементе  $G^{(e)}$ :

$$G^{(e)} = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot C_0 \right) V^{(e)}, \quad (8)$$

где  $n$  – число узлов конечного элемента;  $\varphi_i$  – относительная концентрация диффузанта в узле « $i$ » конечного элемента;  $V^{(e)}$  – объем конечного элемента.

Используя полученные выше методические особенности тепло- и массопереноса, рассмотрим подходы к решению задач миграции пластификатора из пристеночных зон заряда РДТТ.

Поскольку полевая функция  $\varphi$  может принимать в соответствии с зависимостями (3) и (4) значения либо концентрации пластификатора, либо температуры, качественные картины изменения искомых параметров ( $T$  или  $C$ ) в расчетной односвязной области будут подобны.

Поэтому вначале рассмотрим задачу о температурных полях при термостатировании РДТТ, решая нестационарную задачу теплопроводности. В качестве примера рассмотрим РДТТ с геометрическими параметрами заряда, близкими к реальным.

Расчетная схема изделия показана на рисунке 1.

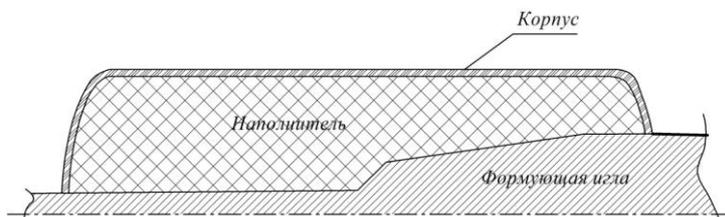


Рисунок 1 – Схема модельного изделия

Общая длина изделия  $L=4$  м; минимальный радиус канала  $a=0,2$  м; радиус цилиндрической части корпуса  $b=1,0$  м. Толщина корпуса  $0,01$  м.

Константы физических условий задачи: коэффициент теплопроводности материала заряда  $\lambda_i = 0,5$  Вт/(м·град), материала корпуса  $\lambda_e = 0,3$  Вт/(м·град), материала иглы  $\lambda_e = 25$  Вт/(м·град); плотность материала заряда  $\rho_i = 15000$  Н/м<sup>3</sup>, материала корпуса  $\rho_e = 16000$  Н/м<sup>3</sup>, материала иглы  $\rho_e = 70000$  Н/м<sup>3</sup>; теплоемкость материала заряда  $C_i =$

1,23 Кдж/(кг·град), материала корпуса  $C_e = 0,8$  Кдж/(кг град), материала иглы  $C_e = 52$  Кдж/(кг·град); коэффициент теплоотдачи воздух–стеклопластик  $a = 8$  Вт/(м<sup>2</sup>град).

**Граничные и начальные условия и нагрузки.** Для упрощения восприятия изменения температурного поля в объеме заряда при решении нестационарной задачи теплопроводности температуру термостатирования изделия – температуру воздуха (окружающей среды) положим равной  $T_a = 50$  °С (конвективный теплообмен); температуру иглы  $T_e = 50$  °С; начальную температуру заряда и корпуса  $T_i = 20$  °С. Расчетное время переходного процесса примем также условно, поскольку для оценки эволюции изменения полей температуры в полимерных материалах не столько важно время перехода к стационарному состоянию, сколько сам характер распределения температуры в объеме с течением времени. Расчетное время примем равным  $t_0 = 4,32 \cdot 10^5$  с (5 сут.). При анализе распределения температуры в сечении изделия воспользуемся относительным временем  $\bar{t}$ , равным  $\bar{t} = \frac{t_0}{t}$ , где  $0 \leq t \leq t_0$  – текущее время. Данную задачу будем решать в осесимметричной постановке задач теории поля.

На рисунке 2 представлены результаты расчетов нестационарных температурных полей в сечении изделия для некоторых промежуточных времен термостатирования в виде изолиний равных температур. Цена деления уровней температур указана в правой части рисунков прямоугольными маркерами с цветовой заливкой.

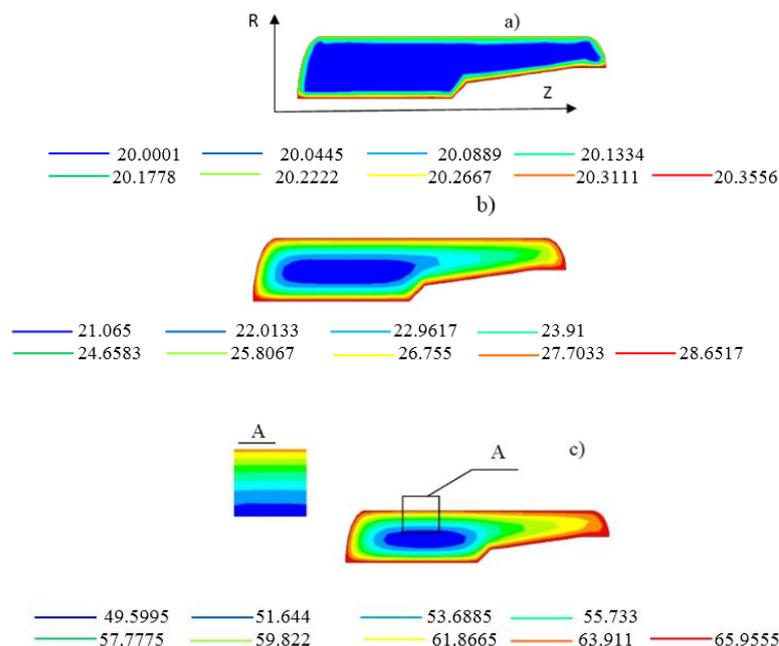


Рисунок 2 – Изолинии изменения температурных полей в сечении изделия с течением времени  $\bar{t}$  : а –  $\bar{t} = 0,008$ ; б –  $\bar{t} = 0,2$ ; в –  $\bar{t} = 1,0$

На рисунке 3 показаны результаты расчетов тепловых потоков и их направления в векторной форме.

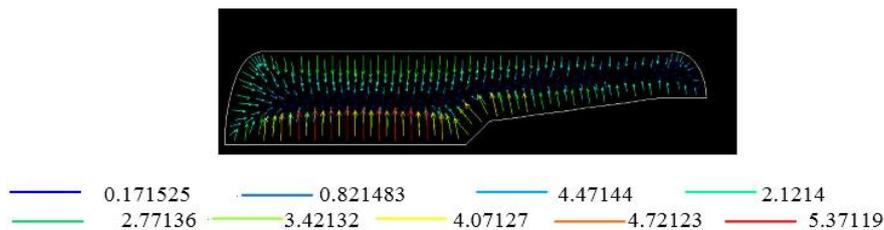


Рисунок 3 – Уровень и направление теплового потока в сечении изделия для времени  $\bar{t} = 1,0$

Анализ результатов расчетов (см. рисунки 2, 3) показывает, что изменение температур в пристеночных областях происходит лишь в направлении, нормальном к линии скрепления заряда с корпусом. Вдоль линии скрепления заряда с корпусом температура практически не изменяется. Это позволяет сделать вывод о возможности использования одномерных моделей для оценочных расчетов температурных и диффузионных полей в зоне скрепления заряда с корпусом, если не принимать во внимание промежуточные пристеночные слои – ТЗП и ЗКС.

Заметим, что в своем большинстве исследования физико-механических, теплофизических и диффузионных свойств наполнителя в зоне скрепления заряда с корпусом, как правило, проводятся на образцах-спутниках, реже непосредственно на натуральных изделиях.

Образец-спутник, моделирующий пристеночные зоны РДТТ, имеет небольшие конечные размеры, конструктивно повторяет набор материалов реального изделия в радиальном направлении, изготавливается в виде круглых пластин или цилиндров из соответствующих материалов, скрепленных между собой. В соответствии с таким представлением образец носит название образец-спутник типа «грибок» (рисунок 4).

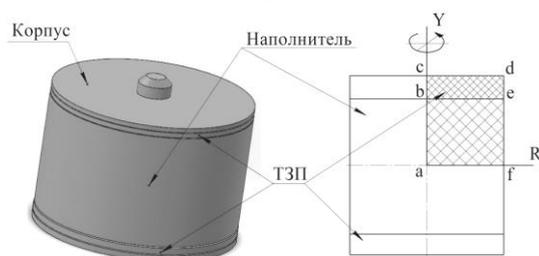


Рисунок 4 – Физическая и расчетная схемы осесимметричного образца (типа «грибок»)

Рассматривая основные этапы технологии изготовления РДТТ – заполнение корпуса (первый этап) и термостатирование двигателя (второй этап), заметим, что диффузионные процессы в пристеночных областях двигателя начинаются еще в процессе заполнения корпуса наполнителем.

Те же самые операции при изготовлении претерпевает «грибок». В этой связи рассмотрим процессы диффузии пластификатора в пристеночных зонах грибка на первом этапе его изготовления, непосредственно в начале контакта пластифицированного наполнителя с ТЗП до его отверждения.

Кроме анализа параметров процесса диффузии пластификатора в ТЗП, рассмотрим вопрос о репрезентативности самого «грибка», в частности, представительности тех его областей, в которых результатам эксперимента можно доверять, и с выделением тех его областей (краевые эффекты), которые необходимо исключить из рассмотрения как не соответствующие поведению материалов натурального изделия.

Задача расчета миграции пластификатора в силу симметрии строения «грибка» решалась в осесимметричной постановке. На рисунке 4 расчетная схема «грибка» представлена как осесимметричная часть половины исходной схемы.

При расчетах полагалось, что абсорбция пластификатора в полимерный корпус «грибка» отсутствует, поэтому корпус из рассмотрения исключался, однако учитывался граничными условиями задачи.

Рассмотрим вариант диффузионного процесса – когда боковая поверхность «cdef» (см. рисунок 4) «грибка» изолирована от внешней среды.

Общие геометрические и физические характеристики «грибка» для обоих рассматриваемых вариантов приняты следующими:

*геометрические условия задачи* (см. рисунок 4):

$cd = R = 3,6 \cdot 10^{-2}$  м – радиус грибка;  $ab = h = 3,6 \cdot 10^{-2}$  м –  $1/2$  высоты грибка;

$bc = 6,0 \cdot 10^{-3}$  м – толщина ТЗП

*физико-механические условия задачи:*

$D_1 = 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с – коэффициент диффузии для полимерного материала;

$D_2 = D_1 K_p^2 / K_p^1$  – коэффициент диффузии для материала ТЗП (где  $K_p^2, K_p^1$  – коэффициенты растворимости ТЗП и полимерного материала;  $K_p^2 / K_p^1 = 2,0; 1,0; 0,5$  – диапазон изменения отношений коэффициентов растворимости, принятые в расчетах; плотность пластификатора  $\rho_{\text{а}} = 1500$  кг/м<sup>3</sup>);

*граничные условия* для диффузионных процессов в «грибке» с изолированной боковой поверхностью:

на боковой поверхности грибка (граница «fe» и «ed», см. рисунок 4) массообмен отсутствует, т.е.

$$-D \frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{fed}(t) = 0, \quad (9)$$

на границе раздела ТЗП – корпус (граница «cd», см. рисунок 4) массообмен отсутствует:

$$-D \frac{\partial C}{\partial n}(t) = 0. \quad (10)$$

В силу симметрии задачи вдоль поверхностей с образующими «abc» и «af» массообмен отсутствует:

$$-D \frac{\partial C}{\partial n}(t) = 0. \quad (11)$$

Рассматриваемый диапазон времени переходных процессов примем условным, равным  $t_{\delta} = 10000$  с, поскольку для оценки эволюции изменения полей концентрации

пластификатора в полимерных материалах не столько важно время полного завершения переходного процесса, сколько сам характер распределения пластификатора в объеме с течением времени. При анализе распределения концентрации пластификатора будем использовать относительное время  $\bar{t}$ , равное  $\bar{t} = \frac{t}{t_\delta}$ , где  $0 \leq t \leq t_\delta$  – текущее время.

Результаты решения задач о перераспределении пластификатора в полимерном материале на границе раздела полимерный материал – ТЗП и в объеме ТЗП иллюстрируются на приведенных ниже графиках и картах для различных времен переходного процесса  $\bar{t}$  при различных соотношениях  $K_p^2/K_p^1$  (рисунок 5).

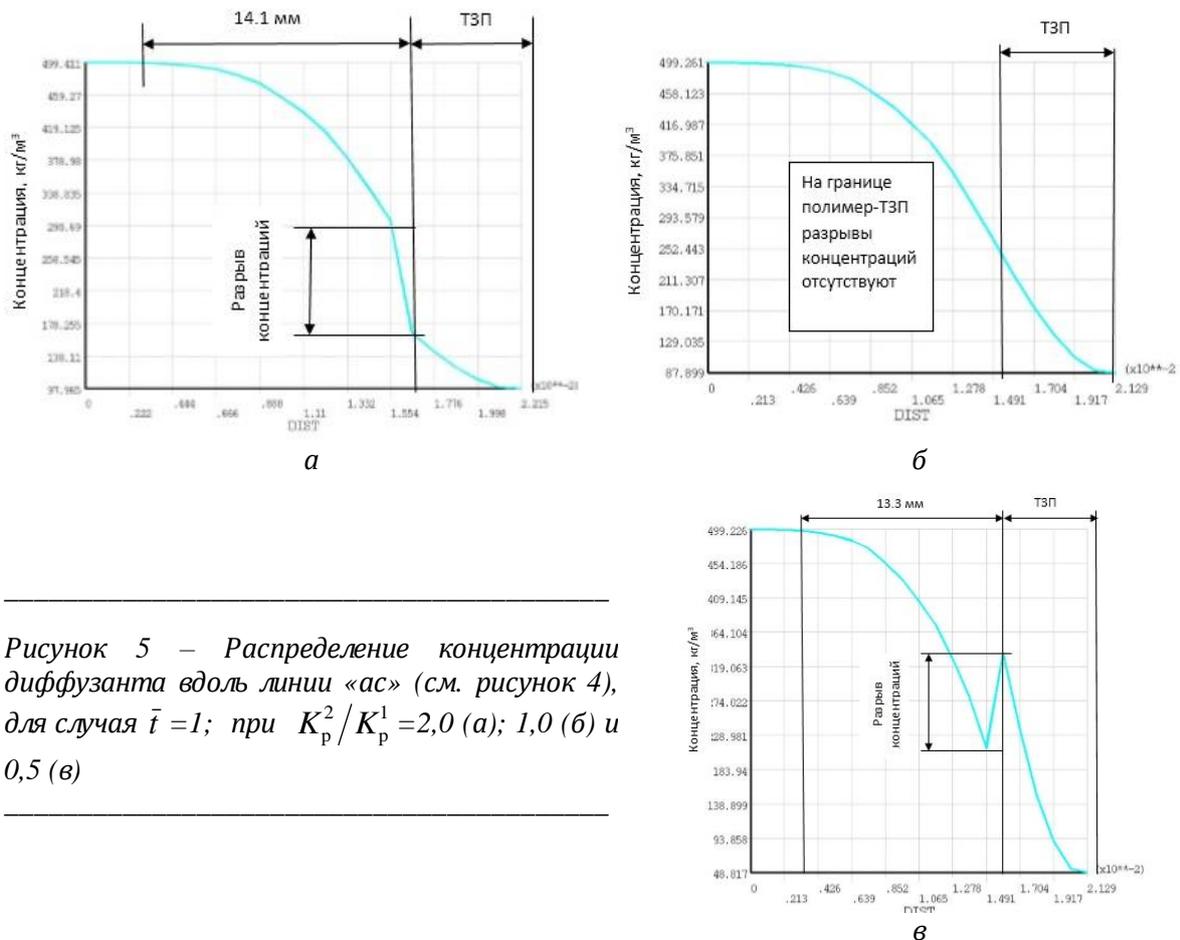


Рисунок 5 – Распределение концентрации диффузанта вдоль линии «ас» (см. рисунок 4), для случая  $\bar{t} = 1$ ; при  $K_p^2/K_p^1 = 2,0$  (а);  $1,0$  (б) и  $0,5$  (в)

Сравнение распределения полей концентрации пластификатора в меридиальном сечении «грибка» представлено на рисунке б для случая, когда боковая поверхность «грибка» изолирована от внешней среды:

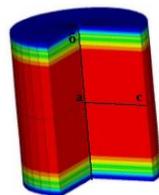


Рисунок б – Распределение полей концентрации пластификатора в меридиальном сечении «грибка»

Для более детальной оценки характера распределения диффузанта в меридиальном сечении «грибка» на рисунке 7 показано изменение концентрации пластификатора вдоль линии «аб» (см. рисунок 6) – от его центра к границам контактирующих полимерных материалов (расчет проведен для  $\bar{t}=1$  при  $K_p^2/K_p^1=0,5$ ) и изменение концентрации пластификатора вдоль линии «ас» – от центра «грибка» к его боковой поверхности.

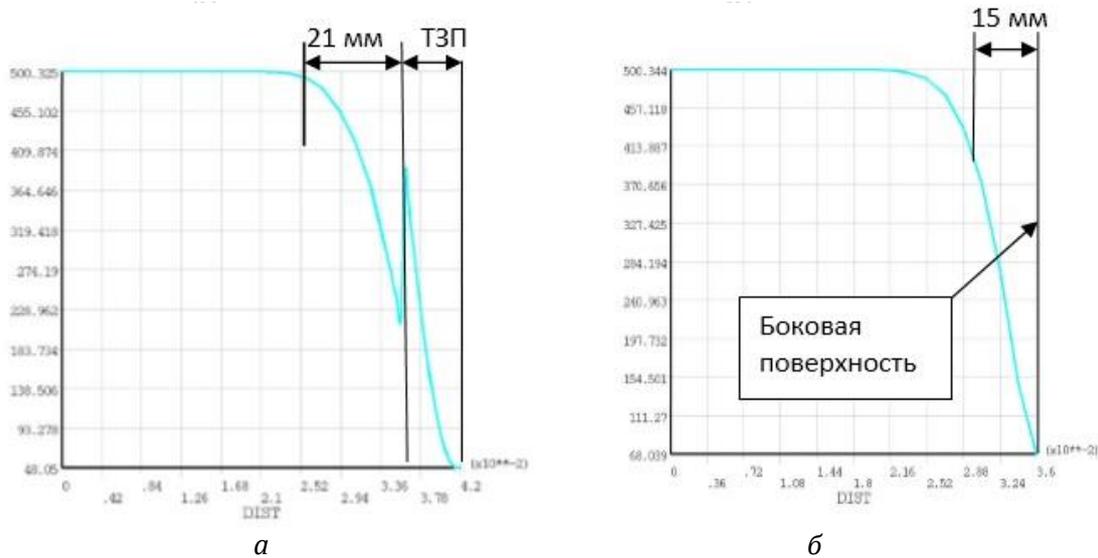


Рисунок 7 – Характер распределения концентрации диффузанта вдоль линии «аб» (а) и линии «ас» ( б) (см. рисунок 6)

Приведенные выше исследования носят качественный характер, поскольку как диффузионные, так и механические характеристики, принятые в расчет, не всегда совпадают с конкретными характеристиками для многообразия используемых на практике различных марок пластификаторов, материалов ТЗП и наполнителя.

Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные нами на образцах «грибках», моделирующие пристеночные зоны заряда РДТТ, подтверждают результаты, полученные численным анализом. При этом распределение концентрации диффузанта по нормали к линии раздела «ТЗП–заряд», полученные в экспериментах в сопоставлении с результатами моделирования, качественно соответствуют распределению концентрации диффузанта, показанного на рисунке 5, в и на рисунке 7, а. Это дает основание полагать, что соотношения  $K_p^2/K_p^1$  для используемых сегодня систем «ТЗП–заряд» меньше единицы, и, стало быть, коэффициенты диффузии у материала заряда всегда выше, чем у ТЗП для большинства современных РДТТ.

## Выводы

1. На основе метода конечных элементов поставлена задача диффузии и реализована методика расчета диффузионного потока и градиента концентрации пластификатора в разнородных соприкасающихся неподвижных средах.

2. Решены имеющие практическое значение задачи о диффузионных процессах в «грибках» – образцах-спутниках адгезионных соединений разнородных полимерных материалов.

3. Показано, что на границе раздела наполнителя и ТЗП имеют место разрывы концентрационных полей, связанные с различием коэффициентов растворимости фаз наполнителя и ТЗП. При равенстве коэффициентов растворимостей обеих фаз скачкообразного характера изменения концентрации у границ контакта систем не наблюдается.

### **Список литературы**

1. Де Гроот С.Р. Термодинамика необратимых процессов. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 277 с.

2. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.

3. Каплан Б.Я. // Журнал аналитической химии.– 1982.– Т. 37.– Вып. 5.– С. 957–961.

4. Коновалов В.И., Пахомов А.Н. Методы решения задач теплопереноса. Теплопроводность и диффузия в неподвижной среде. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2005. – 80 с.

5. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. –Москва–Ленинград: Государственное энергетическое изд-во, 1963. – 536 с.

6. Малкин А.Я., Чалых А.Е. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения. – М.: Химия, 1979. – 304 с.

7. Бекман И. Н. Высшая математика: математический аппарат диффузии: Учебник для бакалавриата и магистратуры / 2-е изд., испр. и доп. – Сер. Университеты России. – М.: Изд-во «Юрайт», 2017. – 459 с.

### **ИНТЕГРАЦИОННАЯ ПЛАТФОРМА УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ СПЕЦХИМИИ**

Д.Г. Абрамов, А.В. Кодолов, Ф.А. Попов

*АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск Алтайского края*

В ФНПЦ «Алтай» с начала 2000-х гг. наметился переход от создания независимых отдельных систем контроля и управления к интегрированной информационно-управляющей системе (ИИУС) предприятием в целом. Большое внимание при этом уделяется вертикальной и горизонтальной интеграции систем управления, согласованию целей управления между уровнями, передаче оперативной информации о ходе производственных и исследовательских процессов снизу–вверх по иерархии управления. Цель функционирования ИИУС – согласованное управление производственными и организационно-экономическими процессами предприятия или объединение, направленное на выполнение установленной производственной программы и достижение наилучших технико-экономических показателей в целом [1].

Создание подобных ИИУС – очень сложная и перспективная задача, к её решению следует приближаться постепенно. К настоящему времени достигнуты значительные успехи в области информационной интеграции, т.е. в разработке компьютерных систем, обеспечивающих широкие возможности быстрого обмена необходимой информацией и представления её различным службам в форме, наиболее удобной для принятия рациональных решений по планированию и оперативному управлению.

**Структура ИИУС.** Проблема создания ИИУС осложняется тем, что на начальных этапах работ основное внимание уделялось созданию автоматизированных систем управления технологическими процессами изготовления изделий (АСУТП) и систем управления предприятиями (АСУП) без рассмотрения их взаимосвязей как локальных программно-технических разработок.

Рассматриваемые подсистемы являются распределенными, поэтому протоколы локальных сетей и протоколы INTERNET позволяют интегрировать информационные и управляющие потоки в узлах каждой подсистемы.

Важный компонент обоих типов систем – это СУБД. Именно они позволяют предоставить пользователю нужную информацию в нужном месте и в нужное время. Однако использование традиционных реляционных баз данных, ориентированных на АСУП-решения, не всегда возможно в системах АСУТП. Для преодоления этих ограничений был предложен новый класс продуктов – базы данных реального времени, созданные независимо либо разработанные на основе существующих реляционных СУБД.

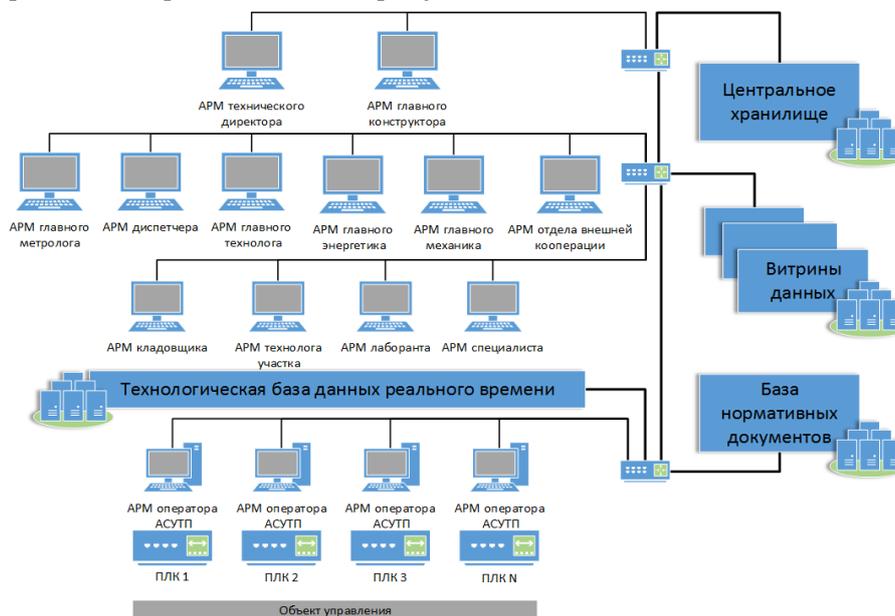
Учитывая сказанное выше, разработаны компоненты такой ИИУС [2]:

- компьютерная сеть, охватывающая производственный и административно-управленческий уровни;
- комплексы автоматизированных рабочих мест обслуживающего персонала, технических специалистов и руководства, оснащенные интеллектуальными пользовательскими интерфейсами;
- подсистемы централизованного контроля, программно-логического и интеллектуального управления, сбора и передачи данных (подсистемы АСУТП);
- технологическая база данных реального времени, формируемая средствами OLTP (Online Transaction Processing, обработка транзакций в реальном времени), предусматривающая синхронизацию, репликацию и резервирование данных для обеспечения отказоустойчивости системы управления;
- база нормативных документов, определяющих условия и регламент работы производства;
- централизованное хранилище данных (Data Warehouse) – предметно-ориентированная интегрированная база зависимых от времени данных, построенная по технологии OLAP (online analytical processing, аналитическая обработка в реальном

времени) и предназначенная для подготовки отчётов и анализа в целях поддержки принятия решений техническими специалистами и руководством;

– витрины данных (Data Mart), ориентированные на представление необходимой информации техническим специалистам и руководству предприятия.

Структура ИИУС представлена на рисунке.



*Структура ИИУС*

В совокупности перечисленные компоненты образуют интеграционную платформу, являющуюся источником всех данных по текущему состоянию производства, необходимых для эффективной работы руководству предприятия, техническим специалистам, производственным службам. Платформа снабжает уровень управления следующими данными:

- общими результатами работы основных технологических агрегатов;
- о производительности отдельных цехов и производства в целом;
- о соблюдении норм качественными характеристиками полуфабрикатов и готовой продукции;
- о запасах сырья, основных полуфабрикатов, готовой продукции в хранилищах;
- о перемещениях материальных потоков между цехами;
- о неисправностях и сбоях основного производственного оборудования;
- об обеспеченности производства различными видами энергоресурсов;
- о нештатных и аварийных ситуациях, требующих внимания производственных служб.

**Производственные показатели для различных служб.** Важнейшим функциональным разделом интеграционной платформы является переработка собираемой в хранилище данных текущей информации в необходимые для различных служб производства показатели, сообщения, сведения, оформленные в виде графиков,

диаграмм, временных трендов, мнемосхем, протоколов, таблиц, отчетов, диспетчерских листов, справок, сводок и размещаемые в соответствующих витринах данных.

В общем случае выполняется переработка текущей информации в реальном времени в необходимые для различных служб производства показатели [3], сообщения, сведения, а также оформление их в виде графиков, диаграмм, временных трендов, мнемосхем, протоколов, таблиц отчетов, диспетчерских листов, справок, сводок и т.п.

Результатом этой обработки являются необходимые для производственных служб и функциональных подразделений контрольные и учетные показатели работы всех производственных объектов и производства в целом.

Большинство расчётов отдельных показателей проводится с помощью специализированного программного обеспечения, позволяющего создавать пользовательские запросы, не обладая знаниями программирования. Программное обеспечение может быть запущено в любой точке локальной вычислительной сети предприятия.

На основании переработанной информации производственные службы и технолог производства могут оперативно корректировать производственные задания, проводить ремонтные работы и техническое обслуживание оборудования.

Диспетчерская служба производства имеет полную картину текущего состояния производства: фиксирует текущие схемы/маршруты перемещений сырья, материалов, полуфабрикатов, готовой продукции между производственными участками, складскими помещениями; сообщает информацию об остановках и пусках единиц основного оборудования, об условиях, требующих вмешательства определенных служб производства; предоставляет информацию руководству предприятия.

**Горизонтальная интеграция различных подсистем** одного уровня управления имеет огромное значение на предприятиях отрасли спецхимии.

С технической точки зрения она предполагает объединение всех автономных систем автоматизации технологических и производственных процессов, а также административных отделений цехового уровня в единую информационную сеть. Это обеспечит необходимый обмен данными в реальном масштабе времени между всеми подразделениями технических специалистов и производственными участками. С производственной точки зрения, это означает учет каждого шага производственного процесса от прибытия сырья до выдачи готовой продукции.

Технологический процесс изготовления рассматриваемых изделий функционально объединяет комплекс территориально удаленных друг от друга зданий, в каждом из которых выполняется его отдельная фаза, причём как последовательно, так и параллельно. Начало выполнения исходной фазы (смешивание) обусловлено наличием в необходимых количествах требуемых сырья и материалов.

В связи с этим процесс изготовления рассматриваемых изделий требует постоянной синхронизации и согласования между территориально удаленными фазами

производства в реальном времени в целях принятия единых управленческих решений и достижения требуемого качества выпускаемой продукции.

Таким образом, создание ИИУС представляется одним из приоритетных направлений развития ФНПЦ «Алтай» на сегодняшний день.

### **Список литературы**

1. Яковис Л.М. Многоуровневое управление производством // Автоматизация в промышленности. – 2009.– № 9.– С. 15–22.

2 Абрамов Д.Г., Звольский Л.С., Кодолов А.В. и др. Структура и особенности построения интегрированных информационно-управляющих систем для опытных производств предприятий спецхимии // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2015.– № 3.– С. 29–32.

3. Абрамов Д.Г., Кодолов А.В., Попов Ф.А. Структура типовой интегрированной системы управления производством предприятия отрасли спецхимии // Труды XVIII Международной молодёжной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2018). – 2018.– С. 333–335.

### **СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН**

А.С. Соколов, Г.А. Бубнов, И.А. Драничников

*АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск Алтайского края*

Так как существующие системы измерения параметров воздушных ударных волн (ВУВ) на основе пьезоэлектрических датчиков морально устарели и в настоящее время не используются, для определения параметров ВУВ в полевых условиях в АО «ФНПЦ «Алтай» разработана информационно-измерительная система (ИС) АРМ «ВУВ» на базе тензометрического метода.

Система регистрирует создаваемое при взрыве давление и позволяет оценить следующие параметры:

- импульс фазы сжатия воздушной ударной волны  $J_+$ ;
- избыточное (пиковое) давление на фронте ВУВ в заданных точках регистрации  $\Delta p_m$ ;
- среднюю скорость распространения фронта ВУВ между двумя точками регистрации по лучу измерения  $V_0$  [1].

На основании полученных результатов обработки профиля ВУВ определяется тротиловый эквивалент испытываемого ВВ.

В состав ИС входят:

- методика выполнения измерений ВУВ при полевых испытаниях;
- тензометрические датчики;
- измерительный блок;

– специальное программное обеспечение (ПО АРМ).

В ИС давление определяется тензометрическим методом, основанным на преобразовании измеряемого параметра в изменение сопротивления тензорезисторов с последующим преобразованием в аналоговый электрический сигнал, который далее, в измерительном блоке (ИБ), преобразуется АЦП и поступает в системы цифровой записи, обработки и отображения информации [2].

Оцифрованные результаты регистрации получают в виде значений напряжения в моменты времени, определенные частотой опроса датчика, а затем пересчитываются в текущее значение параметра с использованием индивидуальной градуировочной характеристики датчика (ГХД). Далее специализированное ПО АРМ рассчитывает параметры ВУВ:  $J_+$ ,  $\Delta p_m$ ,  $V_0$ .

Результаты измерения выдаются в виде таблиц и (или) графиков и заносятся в базу данных по результатам испытаний изделий.

Измерительный блок включает в себя АЦП (с частотой опроса до 2,5 МГц на канал), портативный компьютер, устройства контроля измерительных линий и блоки питания, выполнен в форме автономного законченного прибора с питанием от ~220 В. Для взаимодействия с пользователем допускается подключение периферийных устройств по DVI и USB-интерфейсу либо удаленное подключение по Ethernet (рисунок 1).



Рисунок 1 – Структурная схема ИС определения параметров ВУВ

Основные технические характеристики ИС представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики ИС

Характеристика	Значение
Количество каналов измерения давления	8
Диапазон измерения давления, МПа	0...0,8
Максимальный диапазон входных сигналов для тензометрических каналов, В	±3
Пределы допускаемой приведенной погрешности, для потенциометрических измерительных каналов, %	±0,25
Собственная частота датчика, Гц	20000
Максимальная частота преобразования АЦП, МГц	10
Сопротивление моста датчика, Ом	0...400

Система измерения «АРМ ВУВ» предназначена для эксплуатации в следующих климатических условиях:

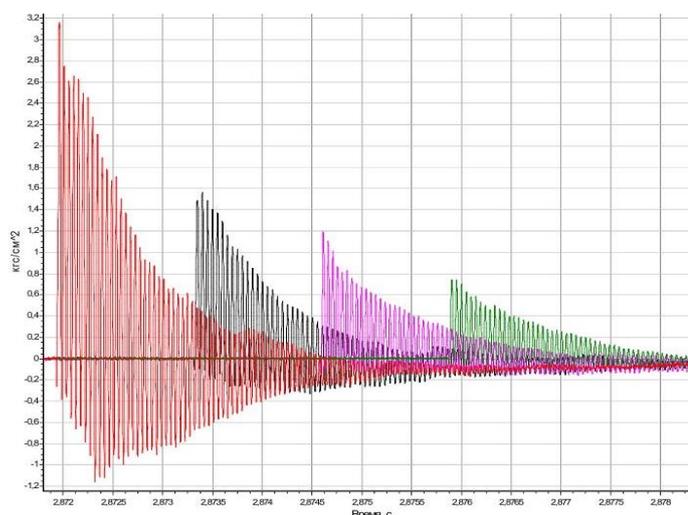
– температура окружающей среды при проведении измерений от 5 до 55 °С;

– относительная влажность атмосферы окружающего воздуха – до 90 % при  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При помощи разработанного ПО и блока контроля достигнута возможность дистанционной проверки состояния измерительной линии (порядок подключенных датчиков, целостность подкидных линий, наличие питания датчиков).

На рисунке 2 представлен график давления, зарегистрированного четырьмя датчиками, находящимися на разном удалении от образца.

Рисунок 2 – Графики давления, зарегистрированного четырьмя датчиками



Результаты измерений параметров оценочных изделий представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений

Параметр	1	2	3	4
Время прихода ВУВ, с	2,8719	2,8733	2,8745	2,8758
$\Delta p_m$ , кгс/см <sup>2</sup>	1,61	0,86	0,56	0,37
$J_+$ , кгс·мкс/см <sup>2</sup>	523,40	382,31	321,47	264,52
$t_+$ , мкс	955,95	1346,97	1770,98	1921,02
$V_0$ , м/с	–	469,65	433,41	427,02

Примечание.  $t_+$  – длительность положительной фазы сжатия ВУВ.

Погрешность измерения соответствует расчетным данным. Обработка результатов измерений проводится по данным регистрации процесса, исходным данным, введенным в соответствии с ЭД на АРМ, результатам поверки средств измерения и включает в себя следующие этапы:

- перевод зарегистрированных значений напряжения в значения параметра для каждого измерительного канала;
- расчет параметров ВУВ для каждого измерительного канала;
- представление результатов обработки в виде графиков и таблиц и запись в базу данных результатов измерений.

Оценка качества измерения параметров ВУВ заключается в оценке профиля ВУВ, который для компактных зарядов ВВ без оболочек описывается при  $\Delta p < 8 \text{ кг/см}^2$  эмпирическим уравнением вида:

$$\Delta p(t) = \Delta p_m \left(1 - \frac{t}{t_+}\right) e^{-a \frac{t}{t_+}},$$

где  $\Delta p(t)$  – текущее избыточное давление ВУВ в фиксированной точке ИПС;  $a$  – безразмерный коэффициент, имеющий функциональную зависимость от  $\Delta p_m$  и  $t_+$ .

Идеализированный профиль ВУВ приведен на рисунке 3.

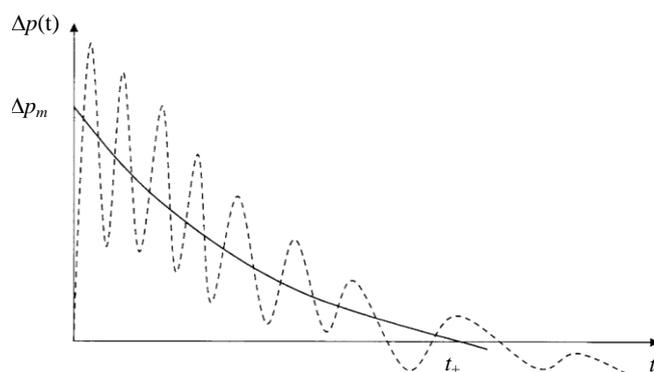


Рисунок 3 – Расхождение регистрируемого сигнала (пунктирная линия) и ожидаемого (сплошная)

Профиль ВУВ, учитывая высокую динамичность регистрируемого процесса, на входе АЦП искажен наложением колебаний с собственной частотой датчика.

На рисунке 3 показаны расхождения между регистрируемым сигналом (пунктирная линия) и ожидаемым (сплошная линия).

По сглаженной кривой профиля зарегистрированного процесса от собственной частоты датчика и испытательной оснастки определяется полный импульс положительной фазы сжатия ВУВ (профиль зарегистрированного процесса без сглаживания и фильтрации):  $J_+ = \int_{t_0}^{t_+} \Delta p(t) dt$ , где  $t_0$  – время начала процесса.

В настоящее время реализованная в АО «ФНПЦ «Алтай» система является единственным эффективным средством для определения параметров ВУВ в полевых условиях и имеет следующие достоинства:

- датчики ударных волн – тензодатчики с усилителем сигнала и возможностью проверки работоспособности;
- наличие двух высокочастотных четырехканальных АЦП с частотой опроса до 2,5 МГц на канал;
- мобильность системы, возможность управления программным обеспечением с помощью Ethernet;
- автономность работы (время автономной работы ограничено емкостью жесткого диска).



## Список литературы

1. Кулев С.Ю., Шалюта В.Н., Абрамова В.И. и др. Автоматизированный измерительный комплекс для определения параметров воздушной ударной волны// Высокоэнергетические материалы: Демилитаризация, антитерроризм гражданское применение: Тезисы V Международной конференции НЕМ's-2010. – С. 75–62.

2. Кулев С.Ю., Шалюта В.Н., Абрамова В.И. и др. Автоматизированный аппаратно-программный комплекс измерения параметров воздушных ударных волн при испытаниях высокоэнергетических составов и изделий на их основе // Высокоэнергетические материалы: Демилитаризация, антитерроризм гражданское применение: Тезисы VI Международной конференции НЕМ's-2012. – С. 77–78.

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ И СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ МАЛОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Р.О. Хохлов, А.И. Драничников, Г.А. Бубнов

*АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск Алтайского края*

В настоящей работе представлены результаты разработки измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) «Испытатель», предназначенного для определения характеристик изделий на основе высокоэнергетических материалов, а также для регистрации параметров малогабаритных изделий при стендовых испытаниях. ИВК «Испытатель» прошел в АО «ФНПЦ «Алтай» полный цикл разработки от проектирования до внедрения и утверждения типа.

Перед нами была поставлена задача разработать ИВК, который выполнял бы следующие функции:

- ввод, контроль, редактирование, документирование и хранение исходных служебных данных;
- цифровое преобразование измерительных сигналов, поступающих от датчиков;
- регистрацию и хранение цифровых измерительных данных;
- выдачу измерительной информации на мониторе в реальном времени при проведении испытаний;
- обработку результатов измерений;
- представление измерительных данных в виде таблиц и графиков;
- формирование официальных документов с окончательными результатами испытаний.

Итогом разработки и внедрения системы является утверждение типа средства измерения ИВК «Испытатель».

ИВК «Испытатель» представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из четырех автоматизированных рабочих мест (АРМ): «Быстрота-М», «Быстрота-МД», МГИ, МГИ-Д.

Схематическое изображение структуры АРМ «Быстрота-М» показано на рисунке 1. Другие АРМы, входящие в состав ИВК «Испытатель», имеют аналогичную структуру.

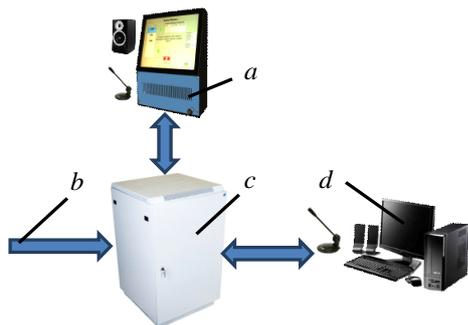


Рисунок 1 – Структура АРМ «Быстрота-М»: *a* – пульт сборщика-испытателя; *b* – линии датчиков; *c* – измерительная стойка; *d* – управляющий ПК

Основным компонентом АРМ выступает измерительная установка LTR производства ООО «Л-Кард» с измерительными модулями, осуществляющими аналого-цифровое преобразование измерительного сигнала и связь компонентов ИВК.

Управление АРМом производится посредством персонального компьютера с ОС Windows 7 и пультом сборщика-испытателя (ПСИ) (рисунок 2) с ОС Linux с установленным на них специализированным ПО, разработанным в АО «ФНПЦ «Алтай».

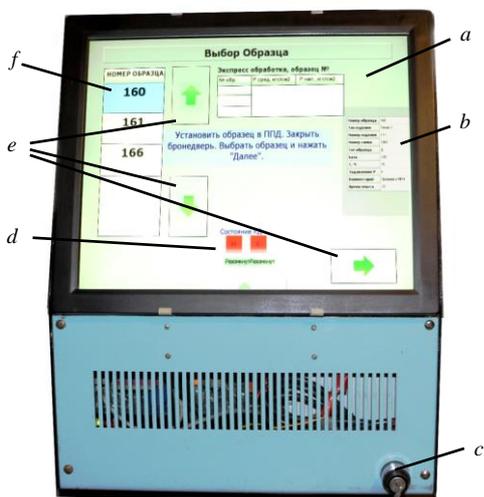


Рисунок 2 – Пульт сборщика-испытателя: *a* – главное окно ПСИ; *b* – информация об образце; *c* – ключ безопасности запальных цепей; *d* – информация о состоянии контактных датчиков; *e* – кнопки управления; *f* – список образцов

Типы измерительных каналов, входящих в состав ИВК «Испытатель», приведены в таблице.

**Состав измерительных каналов ИВК «Испытатель»**

Тип канала	Количество	Диапазон	Приведенная погрешность, %
Тензометрические	28	-10...10 мВ	±0,15
Температурные	28	-400...400 мВ	±0,20
Частотные	8	10...500 Гц	±0,25
Сигнальные	4	0...120 с	±0,0020

Тензометрические ИК предназначены для измерения давления газовой среды и действующей силы с помощью тензометрических датчиков. Выходной сигнал представляет собой напряжение разбаланса тензометрического моста.

Температурные ИК предназначены для измерения температуры газовой среды или элементов конструкции с помощью термометров сопротивления или термопар.

Частотные ИК предназначены для измерения давления струнными датчиками. Информацию об измеряемой величине несет частота выходного сигнала датчика.

Сигнальные ИК предназначены для измерения интервалов времени между перегоранием сигнализаторов начала и конца горения образца.

Отдельные каналы предусматриваются для регистрации сигнала контактной пары, регистрирующей закрытие бронированной двери.

Единая база данных сервера хранит всю совокупность информации по испытаниям и позволяет предоставить к ним удобный доступ через локальную сеть ИВК.

При работе с образцами высокоэнергетических материалов и малогабаритными изделиями на их основе требуется соблюдение повышенных мер безопасности. Срабатывание образца в присутствии людей может вызвать тяжелые травмы, поэтому системе, предохраняющей от случайного или несанкционированного запуска, уделено особое внимание.

Опытная эксплуатация и дальнейшее внедрение ИВК на базе опытной испытательной станции подтвердила, что благодаря автоматизации измерений при помощи разработанного ИВК удалось сократить трудозатраты, повысить точность и достоверность данных. Глубоко интегрированная в ИВК система безопасности позволила свести число опасных ситуаций и инцидентов к минимуму. Несмотря на узкую специализацию ИВК, входящие в его состав АРМ дают возможность решать широкий спектр поставленных задач.

#### **ОСОБЕННОСТИ ОТЛАДКИ И ТЕСТИРОВАНИЯ ПО АСУТП ПРОИЗВОДСТВ СПЕЦХИМИИ**

Д.Г. Абрамов, А.В. Кодолов, Ф.А. Попов

*АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск Алтайского края*

Возрастающие требования к качеству, срокам разработки и изготовления выпускаемой продукции спецхимии [1, 2] приводят к необходимости применения комплексного подхода к разработке систем управления потенциально-опасными производствами. В данном контексте комплексный подход подразумевает использование проверенных структурных и технических решений, а также отлаженных программных алгоритмов, предотвращающих аварии или, в случае их наступления, переводящих процесс в безопасное состояние.

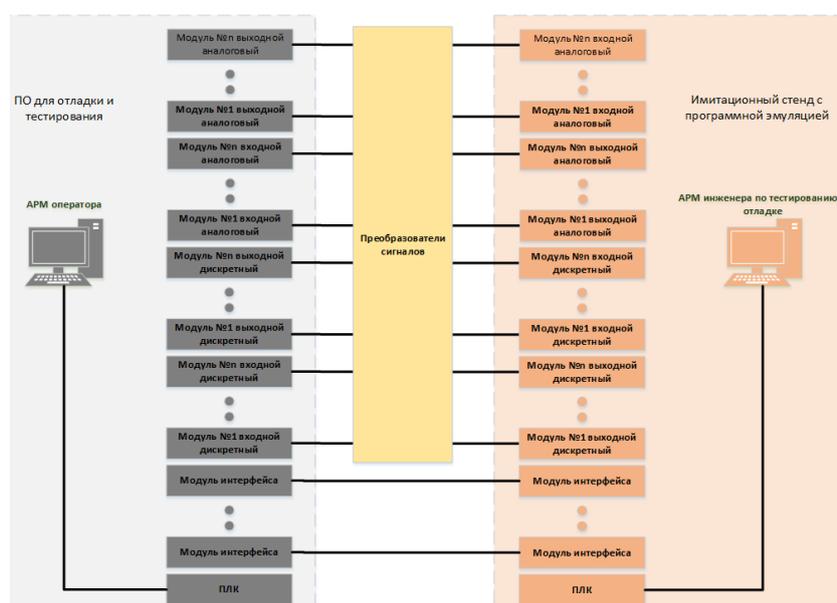
***Особенности отладки и тестирования программного обеспечения АСУТП на имитационных стендах.*** Проблема комплексной отладки и тестирования программных алгоритмов заключается в сложности формирования полного набора согласованных сигналов реального технологического оборудования и невозможности искусственного создания аварийных ситуаций на реальном объекте. Для её решения в АО «ФНПЦ «Алтай» разрабатываются имитационные стенды с учётом особенностей

программных систем реального времени для потенциально опасных производств и имитирующей среды их функционирования.

В общем случае используются типовые решения создания отладочных стендов, состоящих из оборудования, имитирующего внешние – измерительные сигналы (токовая петля, интерфейсный канал, сухой контакт, выход NAMUR и т.д.) и системы установки таких сигналов. Такие отладочные стенды позволяют выявить ошибки обработки блокировочных состояний, интерфейса оператора и систем архивации и сигнализации.

Кроме того, существуют задачи интеллектуального управления для производств спецхимии [3], и именно для таких задач разработаны более сложные системы программной эмуляции, которые имитируют реальные процессы, выполняющиеся на объекте управления.

На рисунке представлена структурная схема стенда для отладки и тестирования ПО АСУТП.



*Структурная схема стенда для отладки и тестирования ПО АСУТП*

Разработанное или модернизированное ПО загружается в оборудование АСУТП: автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора и программно-логический контролер (ПЛК). Модули ввода/вывода сигналов подключаются к имитационному стенду, при необходимости используются преобразователи для согласования уровней измерительных и управляющих сигналов.

АРМ инженера и ПЛК имитационного стенда имеют специально разработанное ПО, позволяющее выполнять программную эмуляцию реальных процессов, происходящих на объекте управления.

В частности, для процесса вакуумного перелива (слива), имеющего место при изготовлении рассматриваемых изделий, в аппаратно-технологической схеме (АТС) которого используются одни и те же коммуникации для перемещения всех необходимых рабочих компонентов, авторами создана система имитации перемещения газоздушных (воздух, азот, углекислый газ, вакуум) смесей по данным

коммуникациям. Такая система позволяет имитировать функционирование коммуникаций различных конфигураций с использованием запорной арматуры, управляемой как дистанционно, так и оператором.

Отладка программного модуля с использованием данной системы позволила выявить ряд несоответствий в АТС процесса и изменить конфигурацию отдельных элементов оборудования и коммуникаций за счет оптимизации количества управляемых как дистанционно, так и оператором элементов запорной арматуры.

Кроме того, по результатам использования данной системы для каждого этапа реализации процесса (см. таблицу) составлены таблицы безопасности, содержащие данные о состоянии технологического оборудования на всех временных интервалах, в течение которых это состояние может подвергнуться изменению. Данные этих таблиц учитываются в логике управляющей программы и по сути составляют основной алгоритм противоаварийной защиты (ПАЗ), позволяющий однозначно определить требуемое безопасное состояние оборудования на любой стадии в реальном масштабе времени.

#### Пример таблицы безопасности для трех технологических объектов

Параметры, определяющие опасность процесса	Места установки датчиков	Предупредительное значение параметра	Действия при достижении предупредительного значения	Предельно допустимое значение	Алгоритм защиты
Максимальный уровень в мернике	Мерник 1, Мерник 2, Мерник 3	Верхний уровень 80%	Световая сигнализация, закрытие клапана подачи продукта в мерник, приостановка процесса	Уровень 90%	Закрытие отсечного клапана, световая и звуковая сигнализация оператору, перевод процесса в точку безопасного состояния
Загазованность в производственном помещении этанолом	Воздух производственного помещения	Более 5 % от нормального значения	Световая и звуковая сигнализация	31 г/м <sup>3</sup> (15% нормы)	Включение аварийной вентиляции, отключение электрооборудования, перевод процесса в безопасное состояние

В целом использование рассмотренных выше имитационных средств дало возможность выявить до 90 % ошибок в управляющей программе до запуска ее на реальном объекте.

**Особенности отладки и тестирования программного обеспечения АСУТП на реальном объекте.** В этом случае на первом этапе тестируется ПО для проверки работоспособности всех контуров управления в режиме холостого хода. С этой целью подаются команды управления на все автоматические контуры, замкнутые по обратной связи, и проверяются цепи управления исполнительными механизмами оборудования и цепи контроля состояния проверяемого оборудования.

Второй этап – это комплексная проверка работоспособности оборудования и ПО, которой предшествует разработка производственной программы, содержащей все способы данной проверки методом имитации различных критических ситуаций. В данной программе описывается каждый шаг выполнения ПО при реализации функций управления как в дистанционном (по командам оператора), так и автоматическом режимах, с описанием ожидаемых реакций системы и состояний безопасного положения оборудования при проверке той или иной критической ситуации.

Основные цели отработки комплексной проверки ПО заключаются в следующем:

- поиск решений по улучшению функциональной надежности технических систем, конструкций аппаратов и отдельных узлов оборудования;
- получение экспериментальных данных, подтверждающих правильность принятых решений и обеспечивающих сохранение заряда на любой стадии его формирования при наступлении возможных нештатных (критических) ситуаций;
- проверка работоспособности аппаратных и программных блокировок в случае наступления таких ситуаций;
- анализ действий обслуживающего персонала в нештатных ситуациях, времени их устранения, необходимого для сохранения изделия;
- уточнение таблиц безопасности;
- выработка рекомендаций по бездефектному изготовлению серийных изделий за счет предотвращения любых нештатных ситуаций на ранних стадиях их возникновения;
- корректировка производственной программы и других нормативных документов по ведению процесса на основании полученных данных.

В частности, при создании АСУТП нами имитировались следующие наиболее вероятные критические ситуации:

- аварийный останов процесса в произвольный момент времени;
- сбой системы электропитания;
- переключение на схемы аварийного электропитания;
- поломка вакуумного насоса и компрессора, сбой в работе маслостанции;
- превышение регламентных значений давлений в корпусе и барокамере;
- пожар на технологическом участке;
- выход из строя управляющего компьютера;
- выход из строя контроллера УСО;
- отказ информационного сервера.

Кроме того, выполнены: проверка герметичности коммуникаций; аварийный сброс вакуума азотом; оценка качества весоизмерительной системы.

В случае наступления нештатных ситуаций в реальном процессе созданная АСУТП осуществляет перевод оборудования в наиболее безопасное состояние, с точки зрения исполняемой технологии и стабилизации важных технологических параметров на

определенный промежуток времени, достаточный для устранения проблемы без значительных, влияющих на качество заряда отступлений от регламентных требований.

Обработанные совместно с конструкторами и технологами данные комплексного тестирования в дальнейшем использованы для уточнения таблиц безопасности.

Ниже в качестве примеров охарактеризованы результаты тестирования программного перевода объекта управления в безопасное состояние при имитации режима «Аварийный останов» в момент слива массы в корпус и аппаратного перевода объекта в безопасное состояние при имитации состояния «пробой силового кабеля технологического участка».

Состояние оборудования на момент имитации режима «Аварийный останов»:

- корпус изделия находится в барокамере;
- сливная система собрана с корпусом;
- смеситель на позиции слива;
- переходник в рабочем состоянии;
- маслостанция отключена;
- включен вакуум по всем позициям;
- выполняется режим слива топливной массы в корпус заряда.

Анализ полученных данных показал, что в рассмотренной ситуации выполняются надежные программно-логические блокировки на любой стадии процесса слива, и оборудование объекта управления остается в таком состоянии, которое не может привести к нарушению регламентных норм контролируемых параметров. Зафиксированное при этом незначительное падение вакуума по всем позициям относительно начальных значений связано с тем, что после перевода оборудования в состояние блокировки приборы регистрировали вакуум в коммуникациях до запорной арматуры. Этот факт свидетельствует о надежности программных блокировок в режиме «Аварийный останов», работоспособности приборов регистрации вакуума и герметичности коммуникаций.

В данном случае, при условии герметичности запорно-регулирующей арматуры и исправности оборудования контролируемые параметры за 1 ч нахождения процесса в режиме «Аварийный останов» практически остались неизменными. Следовательно, в течение этого периода не произойдет значительных изменений физико-механических показателей топливной массы, так как время жизни ее компонентного состава намного превышает период остановки.

Для проверки аппаратного способа перевода оборудования в безопасное состояние и определения правильной последовательности вывода оборудования в рабочий режим, имитировалась ситуация пробоя силового кабеля питания стойки управления УСО зданием. Состояние оборудования на момент имитации то же, что и в предыдущем случае.

Эксперимент был выполнен дважды, но с различным порядком вывода оборудования в рабочий режим. Анализ результатов показал, что при наступлении имитируемого события аппаратные блокировки не всегда обеспечивают надежное удержание контролируемых параметров в пределах регламентных требований. Это связано с тем, что проектом АСУТП не предусмотрено дистанционное управление вакуумными насосами из-за их конструктивных и паспортных особенностей, требующих ручных операций при их штатном включении или выключении.

Однако при изменении порядка выхода из критической ситуации результат был положительным. Таким образом, рассмотренный метод позволяет найти приемлемые режимы работы оборудования на объекте управления при наступлении критических ситуаций и определить порядок вывода оборудования в рабочий режим без потери качества управления.

Аналогичным образом составляются таблицы безопасности и по другим вероятно возможным нештатным ситуациям. По сути каждая из них описывает пошаговую логику перевода объекта на регламентные режимы работы после устранения обнаруженных неисправностей.

Таким образом, описанные способы проверки и отладки программного обеспечения АСУТП, включая систему безопасности, позволили не только построить и уточнить таблицы безопасности, но и определить максимально возможное время нахождения процесса в безопасном состоянии, в течение которого важные технологические параметры остаются в пределах нормы.

Это, в свою очередь, позволило уточнить нормы времени для ремонтного персонала службы КИПиА, которыми они могут располагать для поиска и устранения неисправности при наступлении реальных нештатных ситуаций.

### **Список литературы**

1. Абрамов Д.Г., Звольский Л.С., Кодолов А.В. и др. Структура и особенности построения интегрированных информационно-управляющих систем для опытных производств предприятий спецхимии // Информационные технологии в проектировании и производстве. –2015.– № 3.– С. 29–32.

2. Кодолов А.В. Проблемы создания системы информационной поддержки процессов жизненного цикла изделий на предприятиях отрасли спецхимии // Теоретические и практические аспекты технических наук (Аэтерна-2015, Уфа).– С. 46–48.

3. Жарков А.С. и др. Проблемы создания интегрированных АСУ для производств спецхимии и пути их решения.– Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2014.–188 с.

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЗАРЯД ДЛЯ СНАРЯЖЕНИЯ ОСКОЛОЧНО-ФУГАСНЫХ БОЕПРИПАСОВ**  
В.А. Беляев, И.Н. Сурначев, Д.В. Пушкин, М.А. Чеканов, Б.В. Певченко, Н.Е. Дочилов

Осколочно-фугасные боеприпасы (БП): боевые части ракет, артиллерийские снаряды, авиабомбы и др. – в зависимости от своего назначения поражают цели преимущественно за счет осколочного (воздушные цели) или фугасного (надводные и наземные цели) действия. Поэтому для БП осколочного действия важно повышение скорости метания (энергии) осколков, что можно достичь, в частности, применением взрывчатых составов (ВС) с высокой мощностью взрыва, как правило, относительно низкой энергией (тротиловым эквивалентом) взрыва. А для БП фугасного действия важно повышение тротилового эквивалента, что достигается использованием ВС с высокой энергией (теплотой) взрыва. Обычно такие ВС, содержащие диспергированный алюминий (АВС), характеризуются относительно низкой метательной способностью (бризантным действием) и имеют отрицательный кислородный баланс.

Как показывают расчеты, одновременное повышение тротилового эквивалента взрыва и скорости осколочного поля заметно повышает эффективность БП обоих типов.

Кроме того, большинство БП подрываются как при контакте с целью, так и на некотором расстоянии от нее, т.е. БП должны обладать одновременно высоким фугасным и осколочным действием. Поэтому большой интерес представляют заряды ВС, обладающие высокой мощностью и энергией взрыва.

Повысить фугасное и бризантное действие БП (при прочих равных условиях) можно за счет повышения параметров детонационной волны при инициировании пересжатой детонации в основном заряде, применяя бинарные заряды (БЗ), в которых в качестве основного заряда (ОЗ) используется АВС с высокой теплотой взрыва, а в качестве инициирующего заряда (ИЗ) – мощный ВС, который и инициирует в ОЗ пересжатую детонацию.

Проведенные опыты показывают (рисунок 1), что с ростом массовой доли ИЗ в ОЗ возрастает как скорость разлета осколков, так и тротильный эквивалент БП, следовательно, чем мощнее ИЗ, тем выше параметры взрыва БП. На рисунке 1 приведен ИЗ-1 из более мощного применяемого в РФ ВС по сравнению с известным в РФ ИЗ-2. Приrost объясняется тем, что с увеличением массовой доли ИЗ всё большая часть ОЗ детонирует в режиме пересжатой детонации и при определенном значении массовой доли ИЗ весь объем ОЗ детонирует в таком режиме.

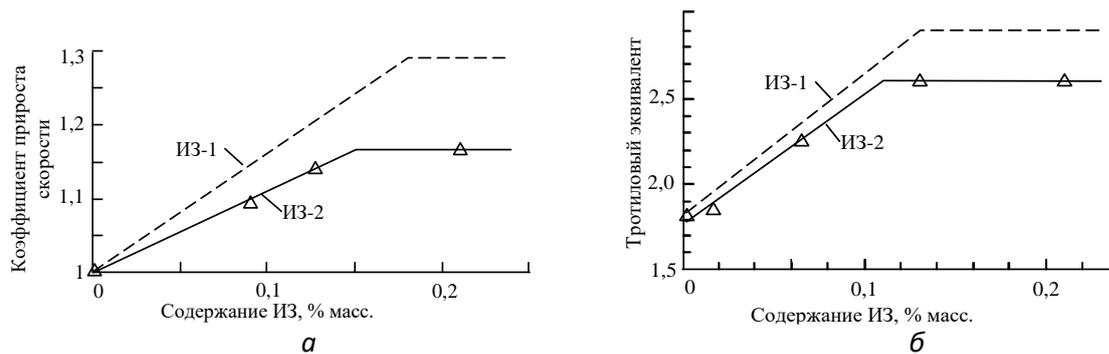


Рисунок 1 – Коэффициент прироста скорости осколков (а) и тротилового эквивалента (б) в зависимости от содержания ИЗ

Дополнительное повышение массы АВС боеприпаса также увеличивает его тротиловый эквивалент из-за роста удельного тротилового эквивалента АВС (рисунок 2).

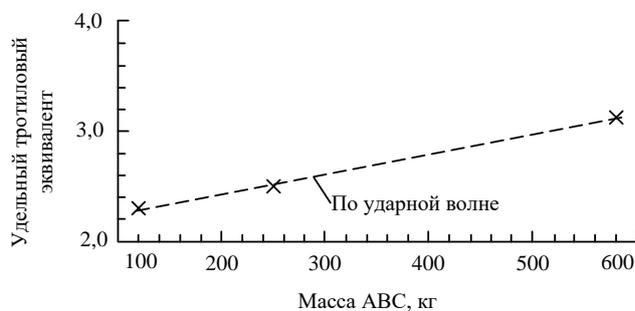


Рисунок 2 – Зависимость удельного тротилового эквивалента БП от массы АВС

Таким образом, БЗ с оптимальным соотношением алюмосодержащего состава и мощного инициирующего ВС позволяют создать универсальный БП, обладающий максимальными значениями мощности (бризантного действия) и тротилового эквивалента (фугасного действия) в условиях массово-габаритных ограничений.

### Список литературы

1. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – М.: Физматлит, 2004. – 832 с.
2. Курепин А.Е. Основы проектирования боевых частей управляемых ракет / Под ред. И.О. Артамонова. – Дзержинск: АО «ГосНИИмаш», 2018. – 368 с.

### ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ ВЗРЫВА ОСКОЛОЧНО-ФУГАСНЫХ БОЕПРИПАСОВ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ МНОГОТОЧЕЧНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ

В.А. Беляев, И.Н. Сурначев, Д.В. Пушкин, М.А. Чеканов

АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск Алтайского края

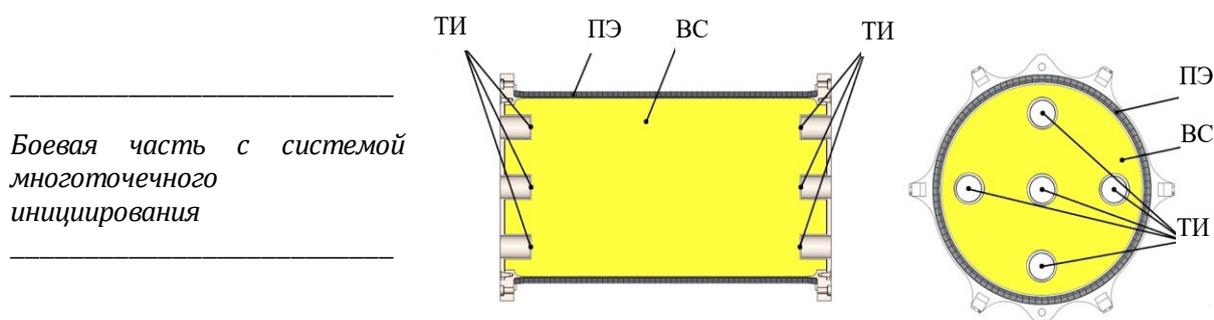
Цель повышения мощности взрыва осколочно-фугасных боеприпасов (ОФБП) – увеличение энергии осколков, образующихся при дроблении корпуса ОФБП, что ведет к росту их поражающей способности. Традиционно начальную скорость осколков  $v$  повышают использованием в ОФБП мощных взрывчатых составов (ВС) с высокой скоростью детонации  $D$ . Согласно известной зависимости [1]:

$$v = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\beta}{2} + \beta},$$

где  $\beta = M_{\text{АН}} / M_{\text{ИНЭ}}$  – коэффициент нагрузки;  $M_{\text{АН}}$ ,  $M_{\text{ИНЭ}}$  – массы ВС и метаемых осколков.

Дополнительным путем повышения поражающей способности ОФБП является увеличение скорости разлета осколков (готовых, полуготовых, естественного дробления) за счет применения в БП различных способов инициирования заряда использованием системы многоточечного инициирования.

Данная система позволяет повысить скорость осколков или поражающих элементов БП за счет создания зоны повышенного давления в продуктах детонации, например, при встречном инициировании заряда ВС, осуществляемом из двух либо нескольких встречных точек инициирования (ТИ) (см. рисунок). Также смещение ТИ по радиусу БП в противоположную сторону по отношению к поражаемой цели увеличивает коэффициент нагрузки  $\beta$  и начальную скорость разлета поражающих элементов.



Кроме того, одновременность срабатывания ТИ может определять уголклонения осколочного поля, тем самым предоставляя возможность управлять полем поражения, что также повышает эффективность действия БП.

### Список литературы

1. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – М.: Физматлит, 2004. – 832 с.
2. Курепин А.Е. Основы проектирования боевых частей управляемых ракет / Под ред. И.О. Артамонова. – Дзержинск: АО «ГосНИИмаш», 2018. – 368 с.

### ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕСИ ТОЛУОЛ – КСИЛОЛ, А ТАКЖЕ ПРОДУКТА ИХ НИТРАЦИИ – ЭВТЕКТИЧЕСКОЙ СМЕСИ ДНТ – ДНКс

А.В. Григоренко

АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск Алтайского края

В связи с разработкой новых составов взрывчатых веществ (ВВ), а также модернизацией способов их получения актуальной задачей является их анализ. Современное аналитическое оборудование позволяет проводить аналитический

контроль как входного сырья, так и получаемых продуктов, например, газожидкостная хроматография (ГЖХ) предназначена для анализа летучих смесей.

В АО «ФНПЦ «Алтай» разработана методика качественного и количественного анализа эвтектической смеси динитротолуол–динитроксил (ДНТ–ДНКс) с помощью ГЖХ. Вследствие плохой восприимчивости к детонации ДНТ и ДНКс самостоятельно как ВВ не используется, но могут входить в смеси для получения промышленных ВВ, безопасных в применении [1].

### Экспериментальная часть

Контроль исходной смеси ароматических углеводородов проводили на газовом хроматографе «Кристалл 5000» с пламенно-ионизационным детектором. Использовалась капиллярная колонка FFAP 50 м×0,32 мм×0,5мкм и FFAP 50 м×0,32 мм×0,5мкм. Температура испарителя 190 °С, детектора 200 °С, анализ проходил с программированием температуры колонки от 75 до 180 °С. Расход газов устанавливали в соответствии с инструкцией к прибору. Толуол, ксилолы и этилбензол идентифицировали по временам удерживания предварительной калибровкой прибора хроматографированием стандартных образцов (рисунок 1).

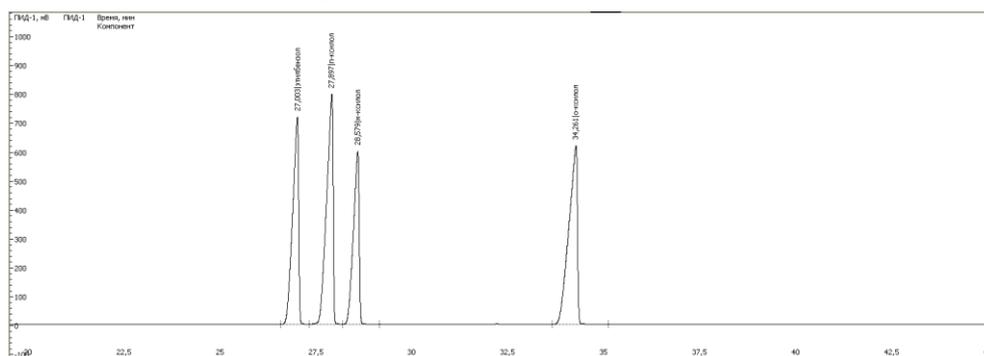


Рисунок 1 – Хроматограмма смеси этилбензола и о, м, п-ксилолов

Для анализа смеси нитропродуктов использовали газовый хроматограф «Кристалл 2000М» с пламенно-ионизационным детектором и капиллярную колонку ZB-1 30 м×0,32 мм×0,5мкм. Температура испарителя 180 °С, температура детектора 190 °С, анализ проходил с программированием температуры колонки от 110 до 170 °С. Расход газов устанавливали в соответствии с инструкцией к прибору. Продукты нитрации идентифицировали по временам удерживания предварительной калибровкой прибора хроматографированием заведомо известных образцов. Количественный расчет проводили методом внутренней нормализации по площадям пиков. Пробы в хроматограф вводили в виде 20 %-го ацетонового раствора.

В качестве объектов исследования использовали эвтектические смеси ДНТ и ДНКс, полученные смешением ДНТ и ДНКс, а также продуктов нитрования смеси толуол – ксил (о, м, п-ксилолы). Цель работы – создание методики анализа с использованием смеси

динитропроизводных толуола, о, м, п-ксилолов и этилбензола в качестве стандартов для идентификации.

Первым этапом работы была хроматография образцов пронитрованных ароматических углеводородов. Продукт нитрации толуола состоит из двух изомеров 2,4 и 2,6-ДНТ [2] (рисунок 2).

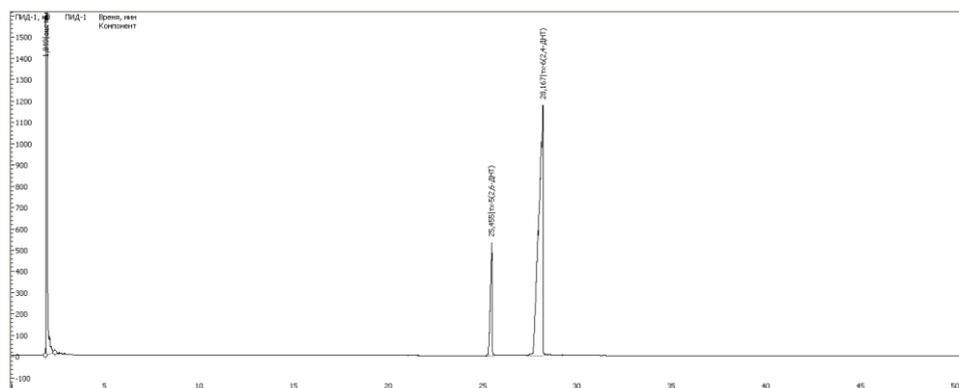


Рисунок 2 – Смесь 2,4 и 2,6-ДНТ

Следующим этапом работы стала хроматография производных о,м и п-ксилола. Как известно при нитровании о-ксилола образуется четыре динитропроизводных 3,4; 3,6; 4,5 и 3,5 или 4,6-динитро-о-ксилолы [3]. Таким образом была получена хроматограмма с четырьмя основными пиками (рисунок 3), отнесение которых к отдельному соединению без дополнительной хроматографии стандартных образцов невозможно, но идентификация по отнесению к группе ДН-о-Кс вполне пригодна.

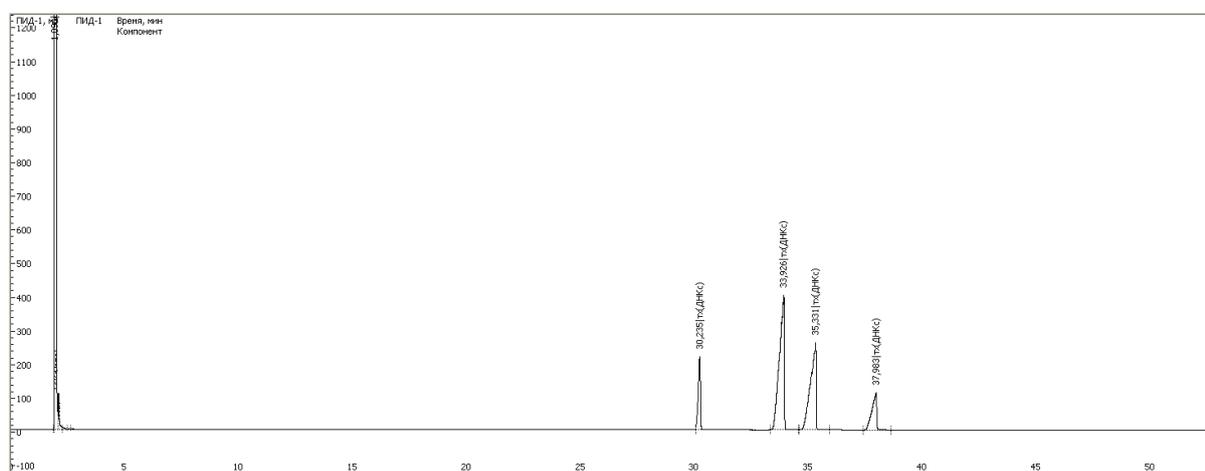


Рисунок 3 – Смесь изомеров ДН-о-Кс

Хроматография раствора динитропроизводных м-ксилола показала наличие примерно равных количеств двух соединений, по-видимому 2,5 и 4,6-динитро-м-ксилолов [4] (рисунок 4). Полученные времена удерживания также не были соотнесены к конкретному соединению, а были объединены в группу ДН-м-Кс.

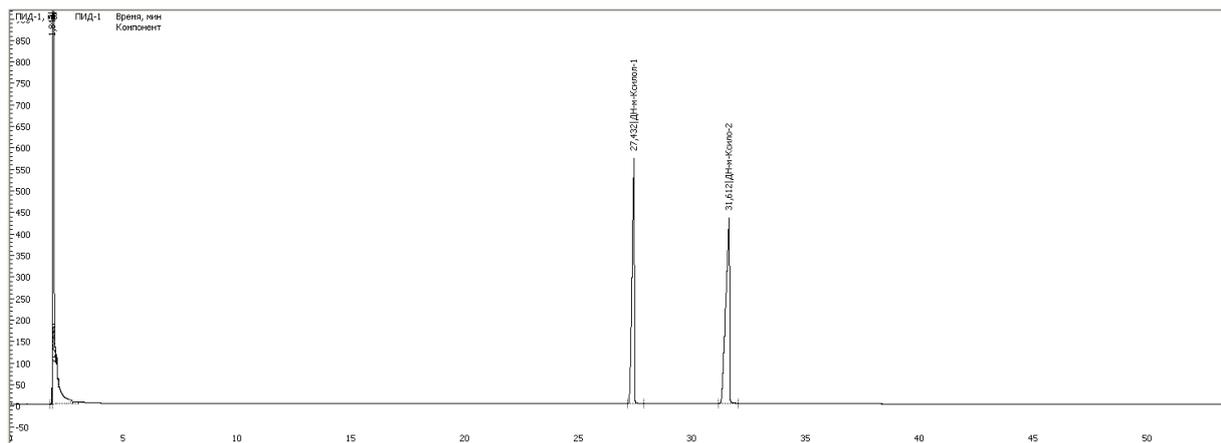


Рисунок 4 – Смесью изомеров ДН-м-Кс

Нитрация п-ксилола, через промежуточный 2-нитро-п-ксилол дает три изомера: 2,3; 2,5 и 2,6-динитро-п-ксилолы [3], что было подтверждено наличием на хроматограмме (рисунок 5) трех пиков.

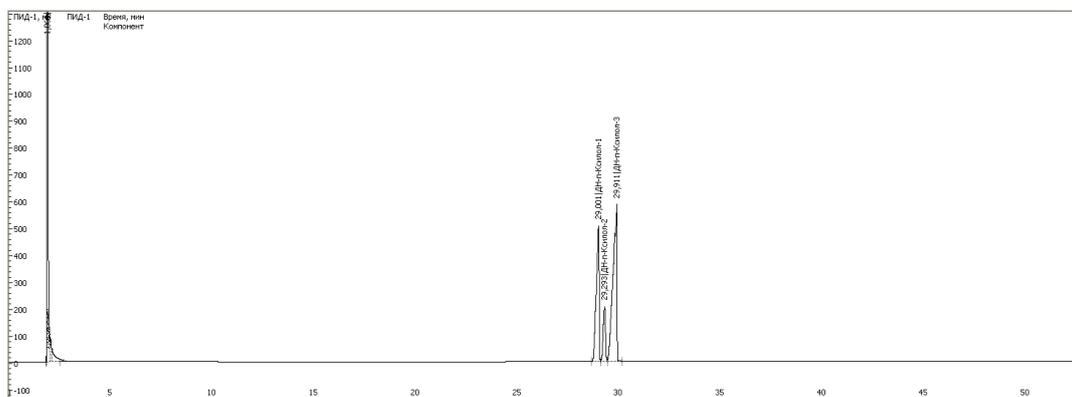


Рисунок 5 – Смесью изомеров ДН-п-Кс

Этилбензол – это ароматический углеводород, входящий в состав каменноугольного и нефтяного ксилола, поэтому была получена смесь его динитросоединений для идентификации изомеров (рисунок 6). Преимущественно в смеси содержится 2,4-динитроэтилбензол, что подтверждается литературными данными [5].

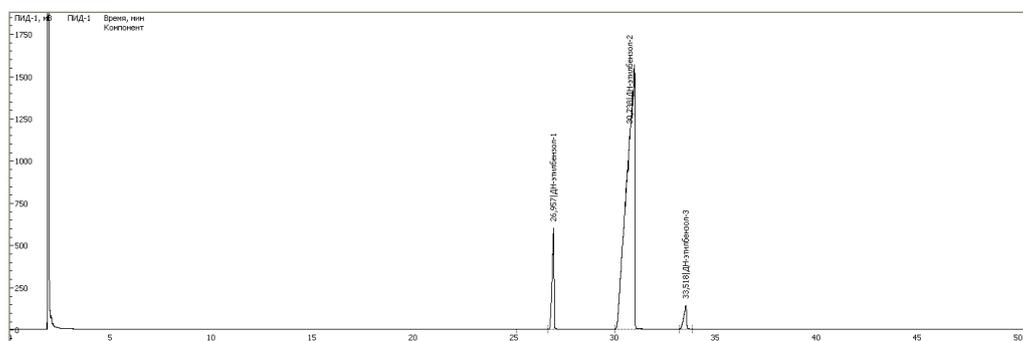


Рисунок 6 – Смесью ДНЭБ

Таким образом, были установлены времена удерживания основных динитропроизводных, образующихся в результате нитрования различных

ароматических углеводородов. Созданная методика позволила надежно идентифицировать компоненты, эвтектической смеси, полученной в заводских условиях (рисунок 7) и использованной в качестве стандартного образца в исследовании.

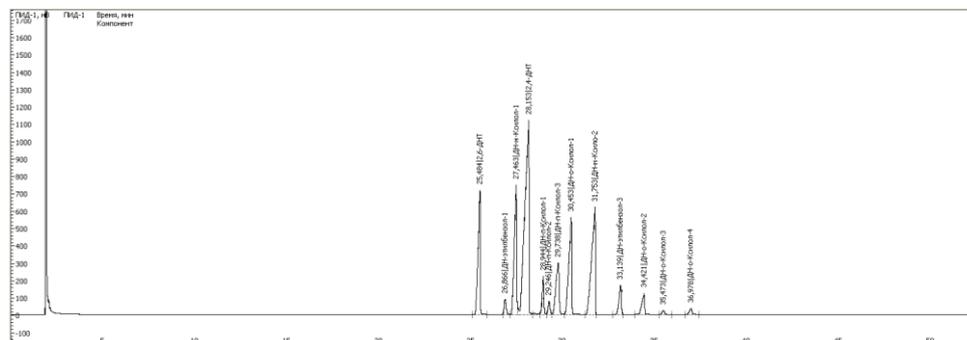


Рисунок 7 – Эвтектика заводская

Следовательно, в продуктах реакции содержатся динитропроизводные о,м,п-ксилолов и этилбензола. Также была испытана эвтектика из смеси толуола и о-ксилола (рисунок 8).

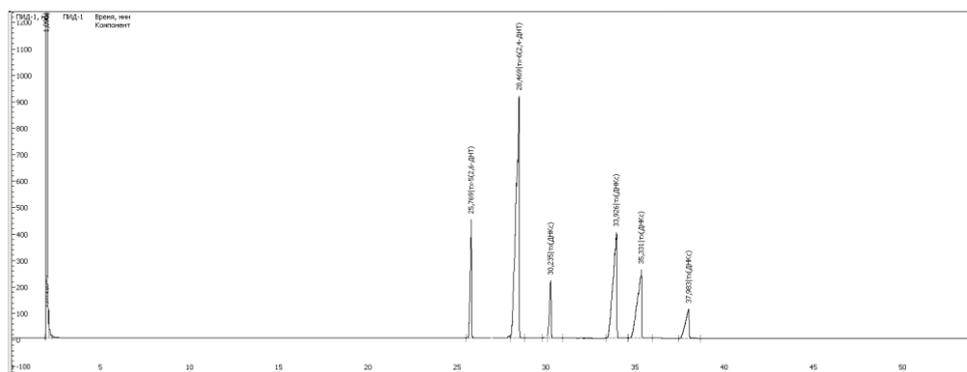


Рисунок 8 – Эвтектика из толуола и о-ксилола

Анализ показал, что смесь состоит из 2,4; 2,6-динитротолуолов и смеси изомеров ДН-оКс. Процентное соотношение полученных изомеров ДНТ и ДНКс полностью совпало с загруженными количествами толуола и о-ксилола, использованными при нитрации.

Таким образом, разработанные методики вполне пригодны для входного контроля используемой для нитрации исходной смеси толуол-ксилол, а также количественного и качественного определения состава получаемой смеси динитросоединений. Результаты можно использовать при рассмотрении физико-химических свойств эвтектической смеси, а именно влияния изомерного состава исходных углеводородов на качественные характеристики получаемого продукта.

### Список литературы

1. Орлова Е.Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ, 1973.
2. Tillett J.G., J. Chem. Soc. (London), 1962.– 5142.

3. Noelting E., Thesmar G., Ber., 1902.–35.– 631.
4. Лейтман Я. И., ЖПХ, 1971.–44.– № 10.– 2263.
5. Weisweiller G., Monatsh., 1900.– 21.– 39.

### **ЗАЩИТА ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ КОМПЛЕКСА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В УСЛОВИЯХ ПОЛИГОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВОВ**

А.А. Демин<sup>1</sup>, А.М. Ершов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай»,

г. Бийск Алтайского края

<sup>2</sup>Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», г. Бийск Алтайского края

Для определения характеристик высокоэнергетических составов в условиях полигонных испытаний используют высокоточное измерительное оборудование [1], которое необходимо защищать от воздействия воздушных ударных волн (ВУВ) и поражающих элементов (ПЭ). В настоящее время существует множество готовых решений данной проблемы, однако стоимость предлагаемых изделий чрезвычайно высока.

Поэтому для снижения себестоимости изделий была поставлена задача разработать конструкцию бронеканеры, защищающей элементную базу измерительного комплекса, из недорогого и технологичного металлопроката стали 3пс.

При проектировании бронеканеры необходимо было, в первую очередь, выбрать толщину стенок с учетом действия на них ударных нагрузок, которые моделировали методом конечных элементов (МКЭ) по методике [2], действие ВУВ – по методике [3].

Расчет МКЭ показал, что при однократным попадании ПЭ в форме кубика размером 10x10x10 мм со скоростью 1000 м/с под углом соударения  $\alpha$  к поверхности стенки бронеканеры, равным  $90^\circ$ , минимальная толщина стенки должна превышать 20 мм (рисунок 1). Глубина проникания ПЭ при этом составит около 12 мм, в этом случае стенка бронеканеры сохранит свою целостность, но пластические деформации распространятся до ее тыльной поверхности.

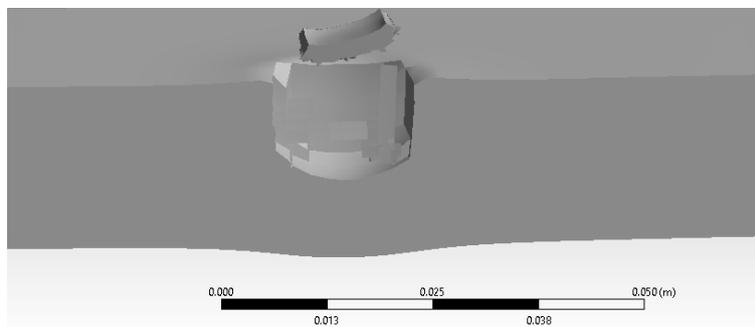


Рисунок 1 – Повреждение стенки бронеканеры при  $\alpha=90^\circ$

Уменьшить толщину стенок можно за счет уменьшения величины  $\alpha$ , развернув бронеканеру во время ее монтажа на полигоне по отношению к предполагаемому

направлению движения ПЭ. Следует учесть, что конструкция бронеканеры для удобства расположения в ней аппаратуры должна иметь прямоугольную форму, поэтому минимально возможный угол  $\alpha$  составит  $45^\circ$ . Глубина каверны  $h$  при  $\alpha = 45^\circ$  для материала сталь 3пс составляет не менее 4 мм (рисунок 2). Очевидно, что при многократном попадании ПЭ во время эксплуатации бронеканера быстро утратит свои защитные свойства.

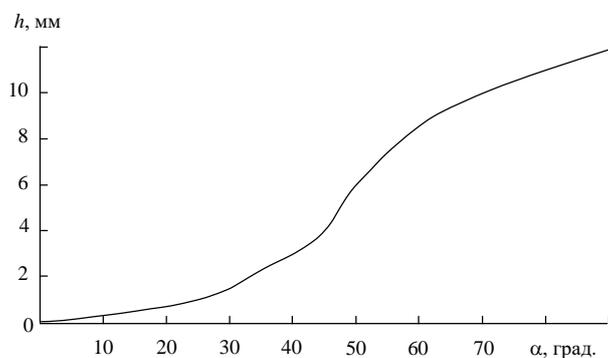


Рисунок 2 – Зависимость глубины каверны от угла соударения

В диапазоне  $26...28^\circ$  угол  $\alpha$  принимает рациональные значения, так как глубина каверны не будет превышать 1,1...1,5 мм, что позволяет при проектировании уменьшить толщину стенки бронеканеры до 10 мм и сохранить ее работоспособность в течение длительного времени эксплуатации (рисунок 3).

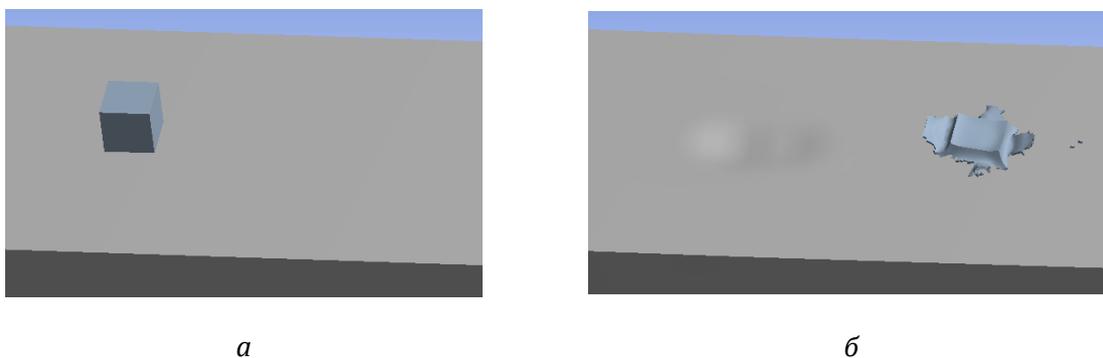
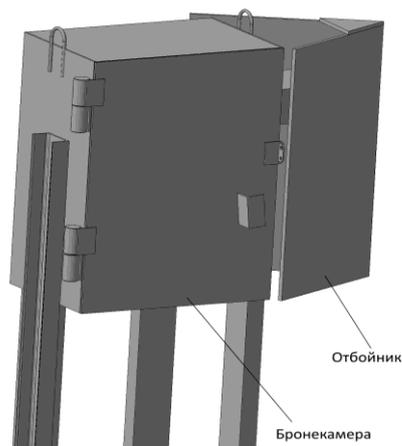


Рисунок 3 – Стенка бронеканеры при  $\alpha = 28^\circ$  до соударения (а) и после него (б)

В целях сохранения прямоугольной формы профиля внутреннего пространства бронеканер дополнительно необходимо предусмотреть в ее конструкции отбойник (рисунок 4).

Рисунок 4 – Трехмерная геометрическая модель бронеканеры



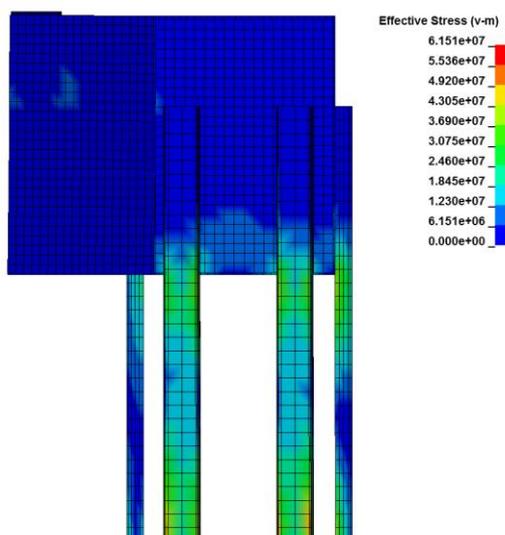
Уменьшение угла стыка сварных плит отбойника менее  $52^\circ$  потребует существенного увеличения материалоемкости конструкции без значимого повышения ее бронестойкости, поэтому является нецелесообразным.

Моделирование действия ВУВ на бронеканеру состояло в задании взрывного воздействия на элементы конструкции в виде функции давления от времени [4]. При этом давление рассчитывалось по эмпирическим зависимостям (модель Кингери и Балмэша для ВУВ), полученным на основе обширного экспериментального материала.

Моделирование ударного воздействия с помощью МКЭ показывает, что на расстоянии 20 м от эпицентра бронеканера гарантированно предохраняет микроэлектронное измерительное оборудование от разрушительного действия ВУВ, созданной высокоэнергетическим составом, эквивалентным 35 кг тротила, поскольку в соответствии с ГОСТ 28213-89 «Испытания электронной техники на одиночный удар» величина изменения скорости импульса ударного ускорения не превышает допустимых значений (см. таблицу). Конструкция бронеканеры при этом функционирует в области допустимых напряжений, что свидетельствует о возможности ее длительной эксплуатации (рисунок 5).

#### Параметры нагружения

Параметр	Значение			
Масса высокоэнергетического состава в тротиловом эквиваленте, кг	50	45	40	35
Пиковое ускорение, $\text{м/с}^2$	11,64	10,3	9,4	8,9
Время действия импульса, мс	21,5	22,1	22,4	22,0
Расчётное значение изменения скорости импульса, $\text{м/с}^{-1} \cdot 10^{-3}$	0,159	0,145	0,134	0,125
Допустимое значение изменения скорости импульса, $\text{м/с}^{-1} \cdot 10^{-3}$	3,4			




---

*Рисунок 5 – Распределение напряжений в конструкции бронекмеры при действии ВУВ*

---

Таким образом, предложена простая и эффективная конструкция бронекмеры из металлопроката стали 3пс, обеспечивающая защиту элементной базы измерительного комплекса в условия полигонных испытаний высокоэнергетических составов.

### **Список литературы**

1. Курепин А.Е., Кузнецов И.А. Основы проектирования боевых частей управляемых ракет / Под ред. И.О. Артамонова; Российская академия ракетных и артиллерийских наук. – М.: Граница, 2018. – 367 с.
2. Демин А.А., Титов И.А., Верещагин П.В. Моделирование разрушения пуль стрелькового оружия при рикошете // Южно-Сибирский научный вестник. – 2019. – № 2. – С. 28–32.
3. Neuberger A. Springback of circular clamped armor steel plates subjected to spherical air-blast loading / A. Neuberger, S. Peles, D. Rittelc // International Journal of Impact Engineering. – 2009. – № 1. – P. 53-60
4. LS-DYNA Keyword User's Manual, LSTC, Version R7.0. Liver-more, CA. Vol. I-II, 2013.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ  
ПРИ ДЕЙСТВИИ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК**

Р.В. Тучков, А.В. Щемелинин, И.И. Анисимов

*АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск Алтайского края*

При прочностном конструировании многослойных конструкций из высокоэнергетических наполненных полимеров, эксплуатирующихся на подвижных носителях, требуется прогнозирование их механического поведения при длительном воздействии виброударных нагрузок. Достоверность решения подобных задач определяется пониманием особенностей механического поведения наполненного полимера в условиях многоциклового периодической нагрузки. Ключевым элементом проблемы обеспечения прочностной работоспособности при эксплуатации указанных изделий является обоснованный выбор критериев разрушения полимерного материала, позволяющих учитывать сложный характер и многообразие одновременных и последовательно действующих эксплуатационных нагрузок.

В настоящем сообщении обсуждаются результаты исследования механического поведения высоконаполненного материала ( $\psi \approx 80\%$ ) методами механики деформируемых сред. Актуальность и необходимость проведения подобных исследований в последнее время существенно возрастает в связи с появлением и активным использованием новых типов энергоемких многофракционных полимерных материалов. Основное внимание в настоящей работе акцентируется на исследовании кинетики накопления повреждений в наполненных полимерных системах при сложных режимах вибронагружения.

Экспериментальные исследования проводились на образцах-лопатках, которые в режиме виброползучести ( $\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_a \cdot \sin \omega t$ ) подвергались воздействию растягивающей ( $\sigma(t) > 0$ ) синусоидальной нагрузки с частотой колебаний 10Гц, генерируемой с помощью электродинамического вибростенда LDS V650 PA1000L. При прогнозировании параметров разрушения композитного материала анализировались возможности использования двух типов критериев длительной прочности: Бейли и Ильюшина\*.

При обработке результатов экспериментов было установлено следующее.

Критерий Бейли с высокой достоверностью (> 90%) позволяет прогнозировать время до разрушения образца в режиме монотонного непрерывного действия вибрационной нагрузки, при этом параметры длительной прочности определяли из статических испытаний ( $\sigma(t) = \sigma_0 = \text{const}$ , рисунок 1).

---

\* Ильюшин А.А. Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкоупругости. – М.: Наука, 1970. – 281 с.

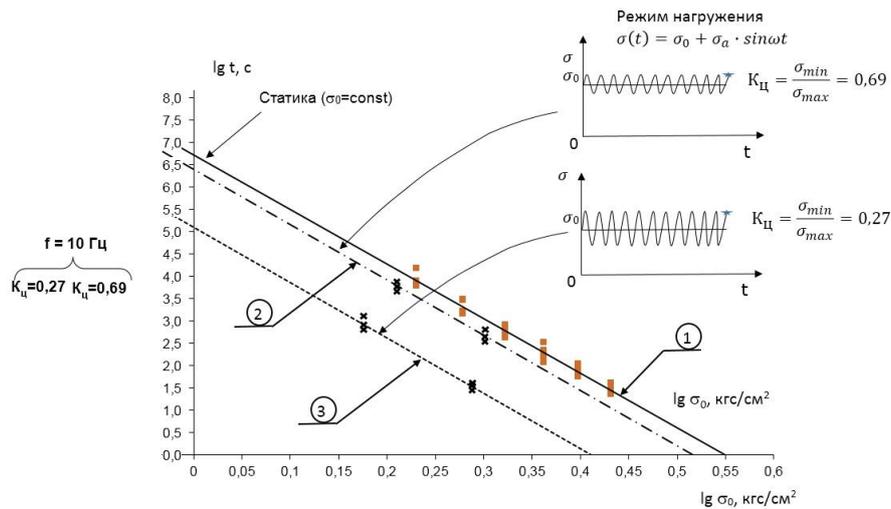


Рисунок 1 – Результаты экспериментального исследования и прогнозирования длительной прочности наполненного композита по критерию Бейли при использовании в режиме ползучести (1) и виброползучести (2), (3). Маркерами обозначены экспериментальные результаты разрушения исследуемых образцов

При использовании критерия Ильющина достоверность прогнозирования времени до разрушения исследуемого композита ~30%. Данный критерий требует построения огибающей по максимальным значениям повреждаемости для определения её величины в момент разрушения образца (рисунок 2).

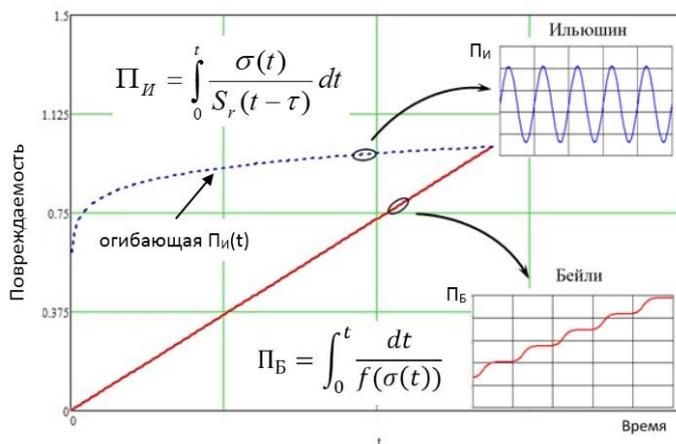


Рисунок 2 – Кинетика накопления повреждаемости по критериям Бейли (П<sub>Б</sub>) и Ильющина (П<sub>И</sub>) при испытании в режиме виброползучести ( $\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_a \cdot \sin \omega t$ )

Для проверки применимости линейных критериев при немонотонных режимах виброн нагружений были проведены испытания образцов полимерного материала с полной или частичной разгрузкой (рисунок 3). Установлено, что полная разгрузка образцов существенно увеличивает параметры длительной прочности исследуемого материала (см. рисунок 3, а, б) относительно непрерывного режима виброползучести (см. рисунок 3, з). Однако при частичной разгрузке образцов (см. рисунок 3, в), время до разрушения уменьшается (расчётное время  $t_2$  по критерию составляет 5 мин).

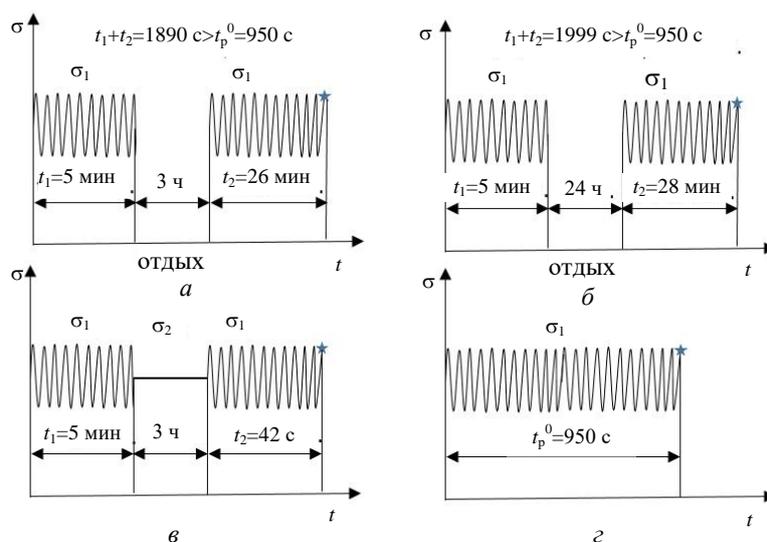


Рисунок 3 – Результаты испытаний исследуемых композитов в режимах вибронагружения: непрерывного (г), с полной (а, б) и частичной (в) разгрузкой

В результате расчётно-экспериментальных исследований установлено, что для относительно простых режимов нагружения (статическое приложение нагрузки или регулярные моночастотные вибрации) при прогнозировании долговременной прочности наполненных полимеров лучше подходит критерий Бейли (точность 90...93 %). Точность предсказания времени до разрушения полимера по критерию Ильюшина не превышает 30 %.

При определении величины накопленной повреждаемости в момент разрушения образцов критерии показали близкие к результатам лабораторных испытаний значения: Бейли – 1,09; Ильюшин – 1,098.

Таким образом, для прогнозирования времени до разрушения наполненных полимеров в режимах монотонного вибронагружения с частотой порядка 10 Гц можно использовать критерий Бейли.

Наличие частичной или полной разгрузки в процессе виброползучести высоконаполненных композитов (см. рисунок 3) существенно влияет на ресурс прочностной работоспособности при последующем нагружении. Для прогнозирования длительной прочности в нестационарных режимах вибронагружения требуется корректировка линейных критериев Бейли и Ильюшина.

#### РАЗРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ОБОЛОЧКЕ И НЕСПЛОШНОСТИ АДГЕЗИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ ОБОЛОЧКИ И НАПОЛНИТЕЛЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.К. Качанов<sup>1</sup>, И.В. Соколов<sup>1</sup>, В.В. Первушин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

<sup>2</sup> ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «С оюз»,

г. Дзержинский Московской области

В многослойных изделиях для определения дефектов соединения полимерного наполнителя и оболочки из композиционного материала широко используются

акустические методы неразрушающего контроля (НК) многослойных изделий [1–5]. Так, в различных вариантах ультразвукового (УЗ) эхо-импульсного метода качество соединения слоев определяется по величине эхо-сигнала, отраженного от границы слоев [3], по анализу многократно переотраженного в оболочке реверберационного сигнала [6] или по анализу сигнала обратного рассеивания (по структурному шуму) [7]. Однако эти методы не дают убедительного результата при дефектоскопии изделий из полимерных материалов с большим затуханием ультразвука, так как для контроля таких изделий необходимо снижать частоту зондирующего сигнала до 100 кГц и ниже. При этом на столь низких частотах протяженность УЗ волны  $\lambda$  в композитном материале составляет порядка 3...4 см, что зачастую существенно превышает толщину оболочки объекта контроля. Именно по этой причине для каждого нового изделия приходится подбирать способ, оптимальный только для него.

В настоящей работе предлагается относительно простой теневой низкочастотный метод, основанный на сравнении УЗ сигналов, прошедших от излучающего преобразователя к приемному через наполнитель и оболочку изделия, и использующийся преимущественно для дефектоскопии цилиндрических изделий относительно небольшого диаметра.

Реализация метода проводилась на имитаторе реального изделия (рисунок 1), который представляет собой цилиндр, состоящий из многослойной оболочки, выполненной из органопластика, и многокомпонентного наполнителя. Диаметр цилиндра  $D = 200$  мм, толщина  $H = 100$  мм; толщина оболочки 5 мм.

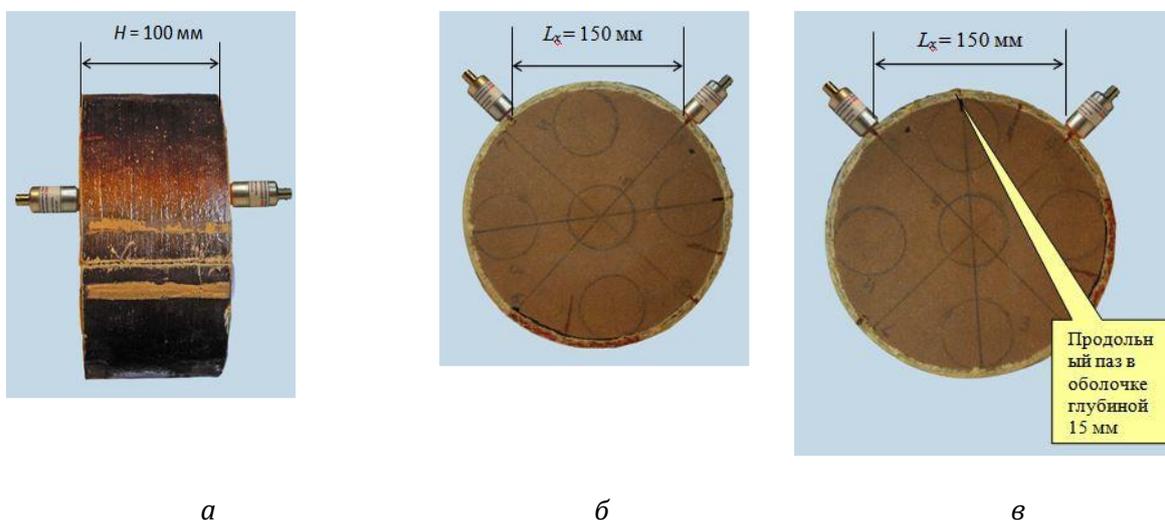


Рисунок 1 – Контролируемое изделие: а – схема теневого контроля для определения скорости продольных колебаний в наполнителе; б – схема расположения отдельных ПЭП на бездефектном участке; в – схема расположения ПЭП на участке с пазом в оболочке

Контроль осуществлялся с помощью разработанного в МЭИ УЗ многофункционального программно-аппаратного измерительного комплекса (ИК), позволяющего формировать любые простые (с базой  $B=1$ ) или сложно-модулированные (с  $B=1$ ) УЗ сигналы и обеспечивающего разнообразную радиотехническую обработку

УЗ эхо-сигналов [8]. В данном случае использовались зондирующие сигналы большой длительности с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ сигналы) с  $B \approx 100$ , которые в приемной части подвергались оптимальной фильтрации (сжатию принятого сигнала во времени с образованием короткого импульса с относительно большой амплитудой главного максимума и малым уровнем боковых лепестков), а также синхронному детектированию (переносу спектра сигнала в область видеочастот) [9].

Для решения задачи УЗ одностороннего контроля данного изделия были разработаны отдельные широкополосные мозаичные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) со средней частотой  $f_0 = 80$  кГц и с относительной полосой  $\Delta f/f_0 \approx 100\%$ . Небольшая апертура низкочастотного ПЭП  $d = 18$  мм обеспечивает широкую диаграмму направленности  $\Theta \approx \arcsin(\lambda/d)$  и соответственно позволяет обеспечить излучение зондирующего сигнала под углом  $90^\circ$ .

На первом этапе определяли скорость распространения УЗ продольных колебаний сигнала в материале наполнителя. Расположение отдельных ПЭП при этом показано на рисунке 1, б.

На рисунке 2 приведена эпюра принимаемого сигнала, с помощью которой была определена скорость продольных колебаний в наполнителе: задержка сигнала относительно зондирующего импульса при  $H = 100$  мм равна  $T = 70$  мкс, что соответствует скорости продольных колебаний  $C_H = 1430$  м/с. Импульсная амплитуда принятого сигнала  $A = 45$  мВ.

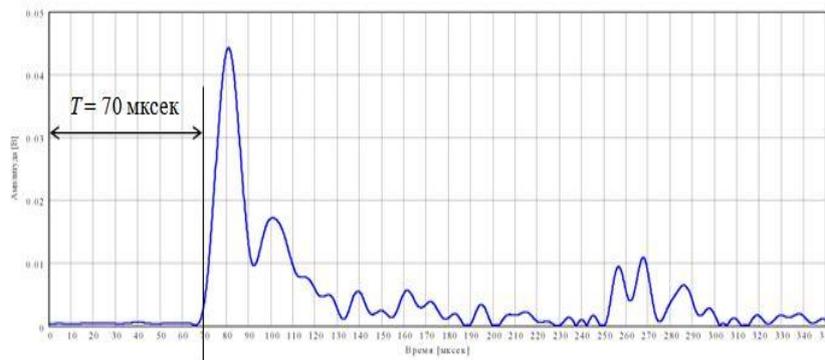
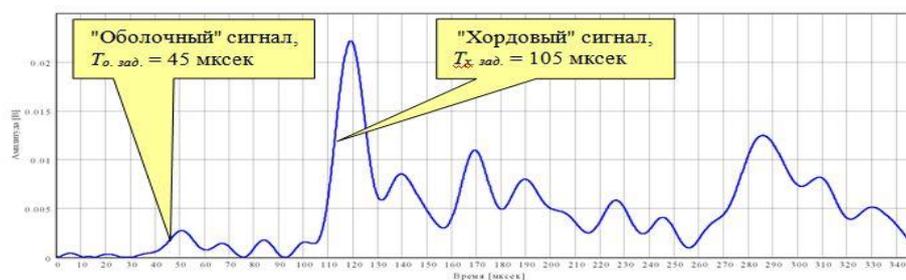
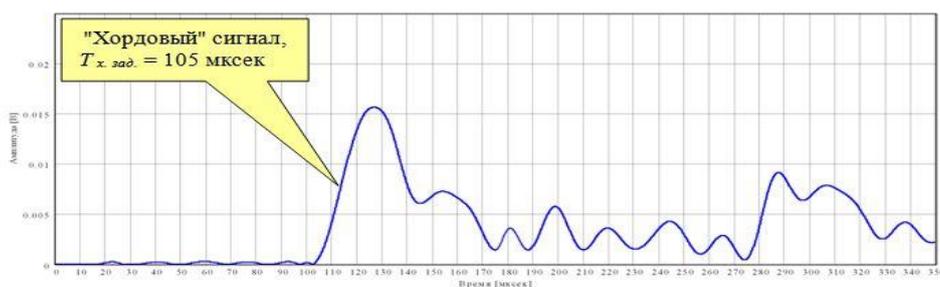


Рисунок 2— Оциллограмма принимаемого сигнала при определении скорости продольных колебаний в наполнителе

На рисунке 3 приведены результаты эксперимента, по установлению возможности так называемого «хордового» измерения цилиндрического изделия в целях определения дефекта в оболочке. В этом эксперименте вначале производится измерение сигнала, прошедшего от излучающего преобразователя до приемного на бездефектном участке поверхности изделия. Взаимное расположение преобразователей показано на рисунке 1, б; расстояние между преобразователями выбрано равным  $L_x = 150$  мм; задержка импульсного сигнала, прошедшего от излучающего преобразователя до приемного, равна  $T_{\text{зад}} = 105$  мкс (рисунок 3, а).



а



б

Рисунок 3 – Результаты «хордового» измерения цилиндрического изделия на «бездефектном» месте в оболочке (а) и на «дефектном» (б)

Из этих результатов следует, что сигнал распространялся со скоростью  $C = L_x / T_{x,зад} \approx 1430$  м/с, что соответствует скорости продольных УЗ колебаний в наполнителе, определенной в предыдущем эксперименте. Следовательно, можно с уверенностью утверждать, что УЗ сигнал распространялся в изделии вдоль хорды, соединяющей точку излучения и точку приема. Импульсная амплитуда хордового сигнала  $A_x = 22,5$  мВ.

Одновременно с «хордовым» импульсом на осциллограмме на рисунке 3, а уверенно идентифицируется еще один сигнал с задержкой  $T_{o,зад} = 45$  мкс и с амплитудой  $A_o = 2,5$  мВ. Легко определить, что скорость его распространения составляет  $C_{обол} \approx L_x / T_{o,зад} \approx 3330$  м/с, что соответствует скорости распространения ультразвука в полимерных композиционных материалах, т.е. этот сигнал является «оболочным» (распространяющимся по оболочке изделия). Его импульсная амплитуда  $A_o = 2,5$  мВ.

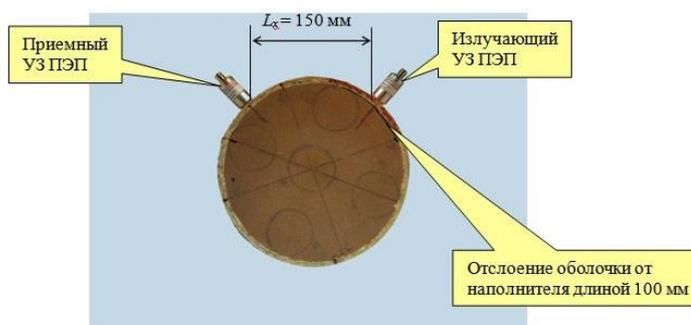
Таким образом, сигналы распространяются как по наполнителю вдоль хорды, соединяющей точки излучения и приема, так и по оболочке изделия. При этом амплитуда «хордового» сигнала превышает амплитуду оболочного, что дает возможность надёжно измерить «хордовый» сигнал.

### Определение дефекта в оболочке изделия

На следующем этапе был проведен эксперимент в целях выявления возможного дефекта в оболочке изделия. Для этого на оболочке был создан паз шириной 3 мм и глубиной  $h = 15$  мм, таким образом, что распространение «оболочного» сигнала полностью исключается (рисунок 4). В данном эксперименте отдельные ПЭП располагались на участке поверхности изделия с искусственным дефектом. Расстояние

между преобразователями также составляло  $L_x = 150$  мм (см. рисунок 4). В этом случае на осциллограмме на рисунке 3, б наблюдается лишь «хордовый» сигнал с задержкой  $T_{x, \text{сдв}} = 105$  мкс, а «оболочный» отсутствует. Импульсная амплитуда «хордового» сигнала в этом случае  $A_x = 16$  мВ, что меньше амплитуды соответствующего сигнала, показанного на рисунке 4, б. Незначительное уменьшение амплитуды сигнала объясняется некоторым перекрытием акустического тракта по «хордовому» каналу пазом, проникающим в наполнитель на глубину 10 мм по всей ширине последнего.

Рисунок 4 – Расположение преобразователей на участке отслоения между оболочкой и наполнителем



Таким образом, отсутствие «оболочного» сигнала говорит о наличии дефекта оболочки в контролируемой зоне.

#### **Определение расслоения между оболочкой и наполнителем**

Следующий эксперимент был проведён для определения возможности обнаружения заложенного при изготовлении дефекта – отслоения между оболочкой и наполнителем.

На рисунке 4 показано взаимное расположение преобразователей на участке поверхности изделия, при котором излучающий ПЭП оказывается расположенным в середине зоны отслоения оболочки от наполнителя. Протяженность зоны отслоения по дуге равна  $L_i = 100$  мм и простирается на всю толщину образца. Наличие такого отслоения полностью исключает возможность появления «хордового» сигнала на приёмном преобразователе.

Действительно, на осциллограмме (рисунок 5) наблюдается лишь «оболочный» сигнал с задержкой  $T_{i, \text{сдв}} = 45$  мкс и полное отсутствие «хордового». Импульсная амплитуда «оболочного» сигнала  $A_i = 2,5$  мВ. Следовательно, сигнал на рисунке 5 по времени распространения и амплитуде полностью соответствует «оболочному» сигналу на осциллограмме (см. рисунок 3, а). Таким образом, отсутствие «хордового»

сигнала говорит о наличии дефекта – отслоения оболочки в контролируемой зоне.

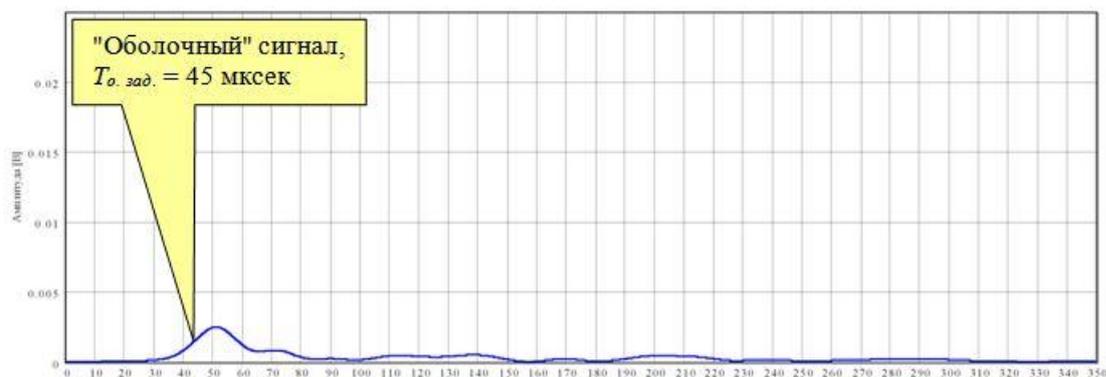


Рисунок 5 – Результаты контроля изделия на участке с отслоением оболочки

Проведенные эксперименты показали, что предложенный метод позволяет уверенно обнаруживать, разрешать во времени и регистрировать «оболочный» и «хордовый» сигналы в цилиндрических изделиях из полимерных материалов с относительно небольшим диаметром.

### Выводы

1. При использовании предложенного УЗ теневого метода контроля цилиндрических изделий из полимерных материалов, основанного на сравнении «оболочного» и «хордового» сигналов, можно выявить дефект оболочки в исследуемой зоне между излучателем и приёмником по уменьшению (или при полном отсутствии) «оболочного» сигнала.

2. Устойчивый «оболочный» сигнал может быть использован как квалификационный признак отсутствия дефекта оболочки в исследуемой зоне. Уверенно регистрируемый в исследуемой зоне «хордовый» сигнал позволяет судить об отсутствии дефектов в наполнителе в зоне между излучателем и приёмником, отсутствие «хордового» сигнала – о наличии дефектной зоны на пути «хордового» сигнала между излучателем и приёмником. При этом дефект возможен или в наполнителе на пути «хордового» сигнала, или в месте соединения оболочки и наполнителя на пути «хордового» сигнала, или в оболочке на пути «хордового» сигнала.

3. Совместный анализ «оболочного» и «хордового» сигналов позволяет точно локализовать местоположение дефекта.

### Список литературы

1. ГОСТ15140-78. Методы определения адгезии. – М.: Изд-во стандартов. 2001. – 13 с.
2. Ланге Ю.В. Акустические методы неразрушающего контроля соединений в многослойных конструкциях // Дефектоскопия. – 1974. – № 3. – С. 70–79.

3. Yanling Zhu, Chunguang Xu, Dingguo Xiao, Lin Qi. Evaluation of coating bonding strength by Ultrasonic Nondestructive Testing. 14th Int. Symposium on Nondestructive Characterization of Materials (NDCM 2015) June 22-26, 2015, Marina Del Rey, CA, USA.

4. Rokhlin S.I., Wang N. and Lobkis O. and Cantrell J.H., Development of linear and non-linear ultrasonic methodology for quantitative assessment of environmental degradation of adhesive bonds, Ohio State University and NASA Langley RC, 2010.

5. Scarponi C., Briotti G., Ultrasonic technique for the evaluation of delaminations on CFRP, GFRP, KFRP composite materials, Composites: Part B. N31 (2000) p.237-243, Elsevier, 2000.

6. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общей ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

7. Романишин Р.Н., Романишин И.М., Студент М.М. и др. Ультразвуковой метод определения адгезионной прочности // Дефектоскопия. – 2018. – № 7. – С.19–26.

8. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В. и др. Ультразвуковая адаптивная многофункциональная дефектоскопия. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 175 с.

9. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В. и др. Методы обработки сигналов в ультразвуковой дефектоскопии. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 220 с.

#### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТВЕРДОТОПЛИВНОГО ЗАРЯДА В СРЕДЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ CREO PARAMETRIC**

*А.Б. Кузнецов, С.А. Биткин*

*АО «Государственный ракетный центр им. академика В.П. Макеева»,*

*г. Миасс Челябинской области*

Одна из основных задач при разработке ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) – проектирование заряда твердого топлива (ТТ). Для этой цели используется комплексная программа Square [0], разработанная АО «ФНПЦ «Алтай» (Н. А. Макаровец, Н. И. Огаркова), позволяющая рассчитывать:

- характеристики выгорания заряда ТТ с произвольной формой поверхности;
- вскрытие поверхности корпуса в процессе выгорания заряда;
- проходные сечения, свободный объем камеры сгорания по времени работы;
- массу заряда, координаты центра масс, продольный и поперечный момент инерции заряда;
- продольное распределение массы топлива в процессе выгорания зарядов.

Кроме того, известны методика и программа расчета заряда разработки ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» (М.Л. Филимонов), позволяющие моделировать процесс горения с учетом переменности скорости горения топлива [1, 2].

В настоящее время на предприятиях отрасли используются системы автоматизированного проектирования (САПР), обладающие широкими возможностями по созданию и анализу трехмерных твердотельных моделей. Системы твердотельного

моделирования предлагается использовать для анализа, выбора формы заряда и расчета вскрытия поверхности корпуса на первых этапах проектирования РДТТ. Такой подход позволит оперативно анализировать создаваемые заряды ТТ, не покидая среду конструкторской САПР, что сократит время на принятие решения о выборе формы заряда и исключит возможность ошибок и неточностей при перемещении информации из конструкторской программной среды в расчетную.

В качестве примера использования системы твердотельного моделирования при проектировании заряда ТТ ниже приводится методика проектирования заряда твердого ракетного топлива в программной среде твердотельного моделирования Creo Parametric [3].

Рассмотрим эту методику на примере канально-щелевого заряда с проточкой, который показан на рисунке 1.

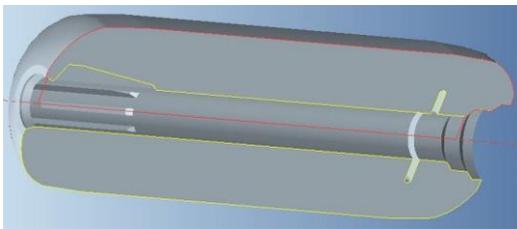


Рисунок 1 – Схема канально-щелевого заряда с проточкой



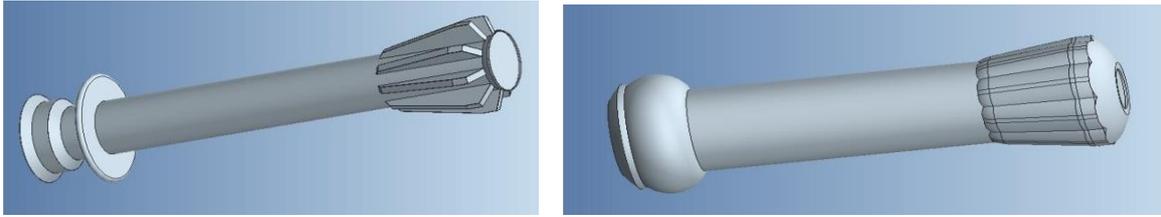
Рисунок 2 – Зона размещения заряда ТТ

На начальной стадии проектирования маршевых РДТТ при формировании облика ракеты актуально решение обратной задачи внутренней баллистики по определению поверхности горения в зависимости от толщины горящего свода, обеспечивающей требуемую расходно-тяговую диаграмму. Для оценки массы теплозащитного покрытия (ТЗП) необходимо учитывать последовательность вскрытия участков поверхности корпуса по мере выгорания заряда ТТ.

Для оперативности выбора принципиальной схемы заряда на данном этапе допустимо использовать закон горения параллельными слоями. Это допущение позволяет в дальнейшем упростить геометрические построения и сократить время анализа заряда.

Суть методики заключается в создании твердотельной модели полостей заряда ТТ. С помощью инструментов анализа среды Creo Parametric в модели можно вычислить необходимые внутрибаллистические и массово-габаритные параметры заряда в зависимости от толщины сгоревшего свода.

В дереве модели одной детали последовательно создается зона под размещение заряда (рисунок 2) и профилируется полость (рисунок 3), форма которой определяет внутрибаллистические параметры работы РДТТ. С помощью инструментов «вращение», «вытягивание», «смещение» для работы с твердотельной геометрией модели создаются отдельные элементы полости, такие как сквозной или глухой канал, щели, проточки, «зонтики» (см. рисунок 3). При этом по ходу построения модели вычисляются МЦМХ заряда, площадь горения и другие внутрибаллистические характеристики (ВБХ).



*Рисунок 3 – Форма канала с проточкой и щелями (до начала горения и частично вышедшей на ТЗП)*

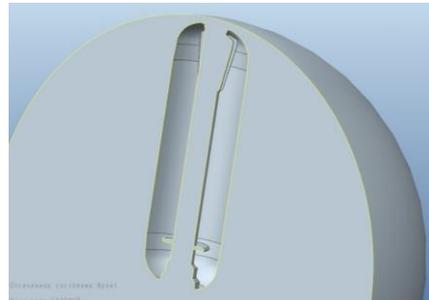
Для представления результатов вычисления ВБХ в виде графиков или таблиц в заключении построений необходимо создать таблицу семейства модели, элементы которой представляют собой модель проектируемого заряда с различной толщиной сгоревшего свода, при этом для каждого элемента будут вычислены все необходимые параметры, указанные выше. Количество этих элементов ограничено лишь вычислительными возможностями ЭВМ, соответственно, с необходимой точностью можно получить совокупность МЦМХ и ВБХ заряда, задав шаг для толщины сгоревшего свода во всем диапазоне от начала горения до его завершения. После проверки элементов таблицы семейства, значения параметров в столбцах станут доступны для копирования из таблицы Excel.

По мере построения дерева модели визуально на экране отображаются некие абстрактные фигуры (рисунки 3, 4), внешний вид которых явно не совпадают с проектируемым зарядом. Такую модель невозможно вставить в сборку двигателя или ракеты и сделать соответствующие чертежи. Модель на данном этапе служит исключительно для последовательного вычисления МЦМХ и ВБХ заряда, которые сохраняются в виде параметров элементов анализа в дереве модели.

---

*Рисунок 4 – Использование вспомогательной поверхности сферы для нахождения площади горения*

---



При визуальном анализе моделей заряда с различной толщиной сгоревшего свода (элементов таблицы семейства) (рисунок 5) становится ясно, какие участки выгорающего заряда выходят на ТЗП раньше других. Сопоставив эти толщины сгоревшего свода с соответствующим им временем работы двигателя, можно оценить необходимую толщину ТЗП на данных участках.

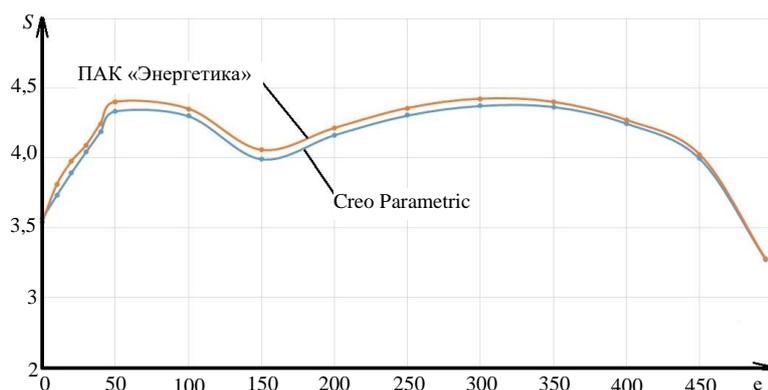


Рисунок 5 – Результаты расчета площади горения заряда по двум методикам

Для того чтобы использовать проектируемый заряд как деталь сборки, необходимо создать новую деталь для воспроизведения твердотельной модели зоны под размещение топлива. С помощью инструмента «объединение/наследование» из этой детали «вычитается» созданная ранее расчетная модель (рисунок 6). В результате деталь становится ассоциативно связанной с расчетной моделью, при этом ее можно использовать для сборки вышестоящих элементов ракеты.

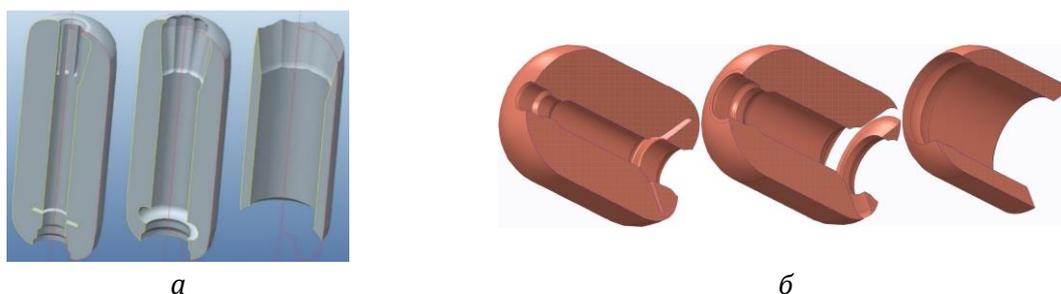


Рисунок 6 – Модели канально-щелевого заряда (а) и канального заряда с «зонтиком» (б) с различными толщинами сгоревшего свода

Для сравнения результатов вычислений был проведен анализ канального заряда с проточкой типа «зонтик» (рисунок 6, б) в ПАК «Энергетика» (разработка ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша») и в САПР Creo Parametric. Из рисунка 5, где показаны зависимости площади горения от толщины сгоревшего свода, видно, что разность величин, вычисленных по двум методикам, не превышает 2,3 %. Вычисление этих значений в ПАК «Энергетика» заняло 10 мин, а в Creo Parametric – около минуты, включая время на создание таблицы семейства и перенос значений в рабочий файл таблицы Excel.

Таким образом, конструктор на своем рабочем компьютере может достаточно оперативно оценить ВБХ и МЦМХ заряда ТТ на ранних этапах проектирования. При необходимости более полного и точного исследования заряда его геометрию можно выдать на подробный анализ с помощью специализированных программных комплексов.

## Список литературы

1. Расчет площади поверхности и инерционных характеристик энергоузлов изделий Т (РТМ САПР-15-6-80) / Инструкция для работы с программой SQUARE-2, КБМ, Миасс, 1982.
2. Внутренняя баллистика РДТТ / РА РАН/ Под ред. А.М. Липанова и Ю.М. Милехина и др.– М.: Машиностроение, 2007. – 504 с.
3. Creo Parametric. База знаний, <http://www.ptc.com> /appserver/cs/search/search.jsp, PTC, 2011.

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЕФЕКТОСКОПИИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С НАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОНДЕНСИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА**

Д.В. Минаев, В.В. Первушин, С.С. Дормашова  
ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «С оюз»,  
г. Дзержинский Московской области

Автоматизированный комплекс дефектоскопии сложнопрофильных заполненных изделий из высокоэнергетических конденсированных материалов (ВКМ) (далее комплекс) был разработан и введен в опытную эксплуатацию в ФГУП «ФЦДТ «С оюз». В нём реализованы два метода неразрушающего контроля:

– ультразвуковой теневой с бесконтактным вводом и приёмом ультразвуковых (УЗ) колебаний для контроля сплошности скрепления наполнителя с корпусом на цилиндрических участках изделий;

– радиоскопический для контроля монолитности наполнителя и сплошности скрепления его с корпусом на сложнопрофильных участках, а также для уточнения характера выявленного дефекта на цилиндрических участках изделий.

Для реализации разработанной схемы автоматизации (см. рисунок) используется специализированное оборудование: механическая система сканирования; система управления электроприводами; пульт ручного управления; ультразвуковой низкочастотный дефектоскоп УСД-60Н; малогабаритный импульсный бетатрон МИБ-9; регистратор излучений – линейный преобразователь; ПК управления и регистрации ультразвукового контроля; ПК управления и регистрации радиоскопического контроля; система видеонаблюдения.



*Блок-схема автоматизации комплекса дефектоскопии сложнопрофильных изделий из ВКМ*

Дефектоскоп УСД-60НА предназначен для УЗ дефектоскопии изделий из композитных, полимерных и других материалов с большим затуханием ультразвука на предмет выявления расслоений, непроклея, внутренних дефектов структуры, пористости, трещин и прочих дефектов.

Малогабаритный бетатрон с импульсным питанием является источником высокоэнергетического тормозного излучения и используется в области радиационного неразрушающего контроля.

Бетатрон МИБ-9 рекомендуется применять для контроля толстостенных сварных соединений, линейных заготовок и строительных конструкций; для радиографии с получением теневого изображения объекта контроля на рентгеновской пленке, а также как источник излучения в составе радиационных интроскопов или радиометрических систем.

Отличительными особенностями бетатрона по сравнению с другими ускорителями на такие энергии являются регулировка энергии излучения в широких пределах, а также его транспортабельность и возможность работы в нестационарных условиях.

Для комплекса разработан уникальный линейный регистратор излучения. Детектирующая система построена на основе комбинированных детекторов, представляющих собой сборку сцинтиллятор–фотодиод. Первичное преобразование в световые кванты производится в сцинтилляторе, затем световой поток вызывает проводимость в фотодиоде. Такая проводимость регистрируется как ток разряда в прецизионных микросхемах интеграторов, связанных входами с дельта-сигма АЦП большой разрядности (20...24 бит). Далее из оцифрованных данных с детекторов формируется пакет для передачи в вычислительный модуль. В детектирующей системе можно выделить несколько блоков: измерительный сбора данных и передачи информации.

Конструктивно комбинированные детекторы представляют собой модули, объединяющие, как правило, несколько таких детекторов, от 8 до 64. Материал сцинтиллятора  $\text{CaWO}_4$ .

Сканирующий многоэлементный детектор обладает значительными преимуществами перед детекторами, работающими в широком пучке излучения. Значительное снижение влияния рассеянного рентгеновского излучения и значительный динамический диапазон приёмников излучения позволяют существенно расширить границы применения рентгеновских комплексов в части повышения предельной толщины контролируемых объектов и контрастной чувствительности контроля. Однако существующие технологии производства отдельных компонентов системы на основе многоэлементных детекторов предполагают наличие значительного числа электрических сочленений. Кроме того, высокочувствительные элементы системы, такие как интегрирующие АЦП, доступны только в коммерческом исполнении и выбор их ограничен. Линейный рентгеновский преобразователь, использующий в качестве приемника излучения комбинированные детекторы, нечувствителен к воздействию влаги, конденсирующейся на оптических элементах при изменении температуры, поскольку отсутствует воздушный слой между детектором и приемником.

Ультразвуковая система применяется в составе аппаратуры дефектоскопического комплекса для обследования объектов их сканированием УЗ теневым бесконтактным методом контроля с документированием результатов в электронном виде и возможностью переноса на бумажный носитель. Особенностью УЗ системы является бесконтактный ввод и прием УЗ колебаний. Ультразвуковая система в составе комплекса применяется для контроля сплошности скрепления наполнителя с корпусом на цилиндрических участках сложнопрофильных изделий.

Для реализации УЗ метода в автоматизированном комплексе было разработано специальное программное обеспечение. После установки всех необходимых параметров пользователь может выполнять контроль изделия в автоматическом режиме, с записью его полного С-скана. На полученном результате система может

автоматически локализовать единичные дефекты в соответствии с заданными параметрами для их объединения и подсчитать как общую площадь всех дефектов, так и каждого в отдельности и построить дефектограмму изделия. На основании анализа полученных результатов оператор делает заключение о годности изделия по каждому режиму контроля и по изделию в целом. По завершению анализа формируется протокол-заключение с таблицей локализованных дефектов, площадей единичных дефектов и их суммарной площади.

Радиоскопический метод контроля основан на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем дефектоскопический анализ полученного изображения проводится в процессе контроля. Сохраняя такие достоинства радиографического контроля, как возможность определения характера и формы выявленного дефекта, метод радиодефектоскопии позволяет исследовать контролируемый объект непосредственно при его просвечивании, что приводит к сокращению времени контроля. Работа радиоскопического комплекса основана на обследовании объекта с помощью высокоэнергетического рентгеновского излучения, локализации дефектов по проекционным изображениям, выдачи мест расположения дефектов на объекте контроля, отображении данных контроля и сохранение изображений на диске управляющего компьютера.

Объект досмотра располагается на специальном устройстве для перемещения его относительно веерного пучка излучения, при этом объект контроля может совершать вращательное движение. Получаемое проекционное изображение отображается на экране монитора управляющего компьютера.

Конструкция радиоскопического комплекса даёт возможность работать с ним в стационарных условиях цеха контроля. Для обеспечения юстировки коллимированного пучка высокоэнергетического рентгеновского излучения относительно линейки детекторов излучатель смонтирован на модуле юстировки, позволяющем осуществлять четырехосевое движение излучателя: смещение и наклон по трем осям. При этом две оси дистанционно управляемые, а две ручные.

Таким образом, радиоскопический комплекс на основе бетатрона МИБ-9, позволяющего развивать энергию ускоренных электронов в диапазоне от 4,5 до 9 МэВ с шагом регулирования энергии 0,5, и детектирующей системы на основе комбинированных детекторов, может выполнять высококачественные снимки как в процессе контроля сложнопрофильных крупногабаритных изделий, так и изделий небольшого размера.

Сканирующий радиоскопический метод, реализуемый посредством автоматизированного комплекса контроля, используется для контроля монолитности наполнителя и сплошности скрепления его с корпусом в труднодоступных участках изделия, а также для уточнения характера и формы выявленного дефекта.

Контрастную чувствительность оценивают по имитатору дефекта, который устанавливается на контролируемом объекте со стороны излучателя и должен

просматриваться на максимальной толщине контролируемого участка в направлении просвечивания.

Программное обеспечение автоматизированного комплекса контроля даёт возможность обрабатывать изображения в режиме просвечивания с применением различных фильтров цветокоррекции для улучшения визуализации сомнительных участков изделий.

Разработанный и внедренный в ФГУП «ФЦДТ «Союз» автоматизированный комплекс дефектоскопии сложнопрофильных заполненных изделий из ВКМ обеспечивает оперативную и информативную диагностику качества заполненных сложнопрофильных изделий. При УЗ контроле более чем на 50% исключен ручной труд, в три раза снижена возможность влияния человеческого фактора, введен автоматизированный подсчет площадей выявленных дефектных участков, электронное протоколирование результатов. При радиоскопическом контроле полностью исключено использование рентгеновской пленки за счет применения линейной детекторной системы, позволяющей сканировать крупногабаритное изделие целиком, что стало одним из факторов сокращения времени контроля с 8 ч до 30 мин, введены программные фильтры для улучшения визуализации сомнительных участков изображений, а также повышен уровень радиационной и экологической безопасности благодаря исключению метода контроля с использованием радиоактивного источника.

#### **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА ОДНОРОДНОСТЬ ПОЛУЧАЕМОЙ СМЕСИ В БАРАБАННОМ СМЕСИТЕЛЕ**

Т.С. Светлова, С.А. Светлов

*Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО*

*«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,*

*г. Бийск Алтайского края*

В настоящее время смеси сыпучих материалов приготавливают в смесителях периодического или непрерывного действия, в основном гравитационных, лопастных, барабанных и пневматических.

При изучении процесса смешивания сыпучих и жидких сред рассматриваются: кинетика смешивания компонентов; гидродинамика потоков сыпучей среды внутри смесителя; динамика силового воздействия на смешиваемые компоненты; анализируются качественные показатели смеси; моделируется процесс её приготовления. Качество получаемой смеси обычно определяют как по равномерности распределения частиц, так и по однородности, т.е. по процентному содержанию компонентов в пробах, взятых в любой точке. В качестве критерия оценки наибольшее распространение получил коэффициент неоднородности [1].

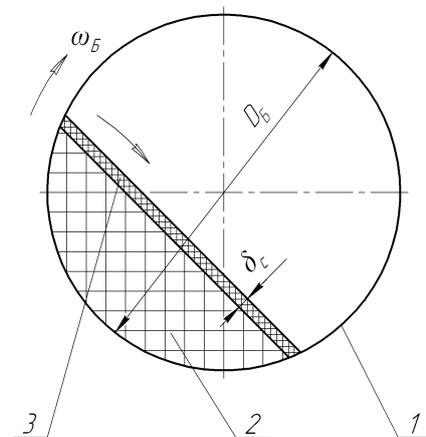
Механизм смешивания энергонасыщенных материалов определяется, главным образом, конструкцией смесителя и принципом его действия. Так, барабанные смесители [1, 2] широко применяются для приготовления как сыпучих, так и вязких составов. Отличаются они формой корпуса и его расположением по отношению к оси вращения.

Основными параметрами, характеризующими процесс смешивания сыпучих материалов в барабанном смесителе, являются: скорость вращения корпуса, степень заполнения его материалом и качество получаемой смеси. Ввиду того, что параметров, влияющих на процесс смешивания, достаточно много, учесть их все невозможно ввиду возрастающей громоздкости математического описания.

Для процессов смешивания в барабанных горизонтальных смесителях время взаимодействия слоёв смеси оказывается довольно малым по сравнению с перемешиванием всего объёма, что даёт возможность принять условие кратковременного взаимодействия слоёв материала [3]. Частицы слоя материала ссыпаются с внутренней поверхности барабана и попадают в массу неперемешанного материала.

В связи с этим полагаем, что при перемещении материала и ссыпании его по поверхности неподвижного слоя в зону контакта попадает объём смеси, имеющей среднее значение коэффициента неоднородности. Ввиду малости времени разового смешивания компонентов (время одного оборота барабана), по сравнению со всем временем приготовления смеси, и незначительности изменения при этом общего коэффициента неоднородности можно считать, что перемешивание материалов в плоскости вращения барабана идеальное, т.е. смешиваемые частицы равномерно распределяются по сечению слоя. На рисунке 1 показана схема взаимодействия слоёв материала между собой и с цилиндрической стенкой барабана.

Рисунок 1 – Схема взаимодействия слоёв материала в барабанном смесителе: 1 – барабан; 2, 3 – неподвижный и подвижный слои материала



С учётом выражения для массы смеси в барабане скорость процесса смешивания компонентов можно определить из уравнения

$$v_{\text{Нл}} = \frac{2 \cdot \delta_{\text{Н}} \cdot \omega_{\text{А}} \cdot (V_{C_{\text{Нл}}} - V_{C_{\text{Нв}}})}{\pi \varphi D_{\text{А}}}, \quad (1)$$

где  $\delta_{\text{С}}$  – толщина слоя материала, м;  $v_{\text{А}}$  – угловая скорость вращения барабана, м/с;  $V_{C_{\text{Нл}}}$ ,  $V_{C_{\text{Нв}}}$  – коэффициент неоднородности смеси на входе и выходе из подвижного слоя материала соответственно, %;  $\varphi$  – коэффициент заполнения барабана материалом;  $D_{\text{А}}$  – диаметр барабана, м.

Так как отношение толщины слоя материала к его длине, ширине и радиусу барабана является небольшим, то слой можно считать плоским и неограниченным. В соответствии с кратковременным взаимодействием толщина слоя материала зависит от скорости вращения барабана и сыпучести материала и определяется уравнением:

$$\delta_{\bar{N}} = \zeta_{\bar{I}} \cdot v_{\bar{A}} \cdot \tau_{\bar{K}}, \quad (2)$$

где  $\zeta_{\bar{I}}$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость смешивания компонентов, определяемый из граничных условий, имеющих место на подвижной поверхности материала;  $v_{\bar{A}}$  – скорость вращения барабана, м/с;  $\tau_{\bar{K}}$  – время контакта подвижного и неподвижного слоёв материала, с.

С учётом подстановки уравнения (2) в уравнение (1) можно получить выражение для определения скорости процесса смешивания компонентов:

$$v_{\bar{M}} = \frac{\zeta_{\bar{I}} \cdot \omega_{\bar{A}}^2 \cdot \tau_{\bar{E}} (V_{C_{\bar{M}}} - V_{C_{\bar{H}}})}{\pi r}. \quad (3)$$

Используя уравнение (3) можно рассчитать скорость процесса конвективно-диффузионного смешивания компонентов смеси и определить время достижения необходимой однородности и качества получаемого продукта при заданных условиях процесса и кинетических параметрах. Анализ уравнения (3) показывает существенное влияние скорости вращения барабана на кинетику процесса смешивания, однако оно неоднозначно, поскольку на процесс смешивания компонентов существенно влияют степень заполнения барабана материалом и физико-механические свойства смеси.

На рисунке 2 представлена расчётная зависимость скорости процесса смешивания компонентов от скорости вращения барабана при заданных значениях внутреннего диаметра барабана, толщины слоя материала, степени заполнения барабана сыпучим материалом.

Скорость протекания процесса смешивания компонентов необходимо уточнить исходя из полученных экспериментальных данных при смешивании заданных составов энергонасыщенных материалов.

Зная скорость процесса смешивания и время работы смесителя можно рассчитать коэффициент неоднородности смеси в любой момент времени  $V_C = v_{\text{CM}} \cdot \tau$ , где  $\tau$  – время смешивания компонентов смеси, с.

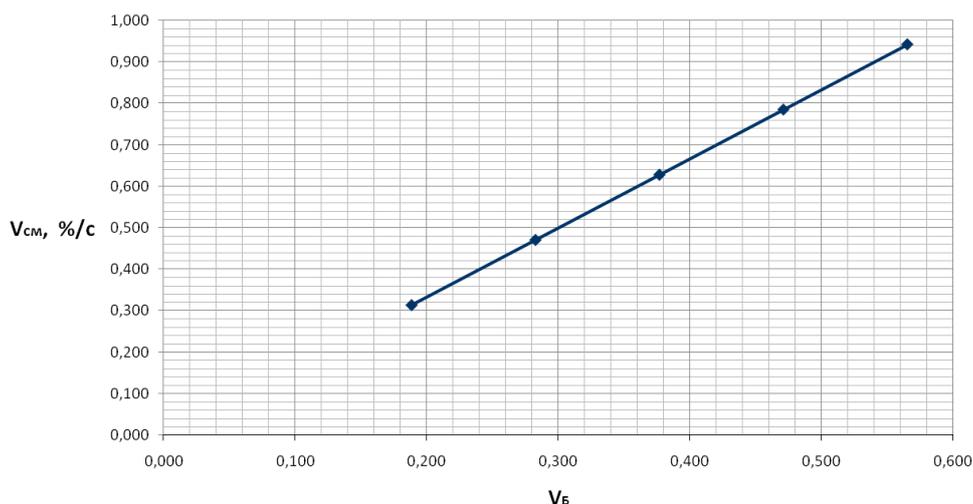


Рисунок 2 – Зависимость скорости процесса смешивания от скорости вращения барабана

## Выводы

1. В результате анализа процесса смешивания сыпучих материалов в барабанном горизонтальном смесителе получены уравнения, которые позволяют определить скорость процесса и качество смеси исходя из режимных параметров процесса и свойств смеси.

2. Построены кинетические зависимости процесса смешивания материалов при изменении условий его проведения.

3. Разработана конструкция экспериментальной установки для исследования кинетики процесса смешивания сыпучих энергонасыщенных материалов в барабанном смесителе с горизонтальной осью вращения и дополнительными смесительными элементами.

## Список литературы

1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
2. Богданов В.В., Торнер Р.В., Красовский В.Н. и др. Смешение полимеров. – Л.: Химия, 1979. – 192 с.
3. Светлов С.А. Смешение сыпучих и жидких веществ в барабанных смесителях // Современные проблемы технической химии: Материалы докладов Всерос. научно-техн. и метод. конф. Секции 5–7. – Казань: КГТУ, 2009. – С. 33–38.

## СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ДАВЛЕНИЯ

А.В. Никитова, А.В. Никитов

АО «Корпорация «Московский институт теплотехники», г. Москва

Испытательный технологический комплекс (ИТК) предназначен для исследования и экспериментальной отработки новейших топливных составов. Для стабилизации и регулирования давления в камере сгорания (КС) ИТК при выполнении огневых

стендовых испытаний необходимо создать программное обеспечение (ПО), которое должно решать следующие задачи:

- автоматическую диагностику оборудования системы перед запуском и выдачу информации о готовности;
- автоматическую установку электрической рулевой машинки (ЭРМ) в нулевое положение;
- получение, обработку и фильтрацию сигналов от объекта управления (ОУ);
- формирование и выдачу управляющих воздействий на объект управления посредством ЭРМ;
- регулирование и стабилизацию давления в КС по сигналам обратной связи от датчиков;
- регистрацию, сбор и сохранение телеметрических данных;
- определение аварийных ситуаций и безопасное завершение работ в случае аварии.

При определении состава и структуры системы была проведена объектная декомпозиция. В состав стендовой системы стабилизации давления (ССД) входят (рисунок 1): пульт контроля и управления на базе ПЭВМ; управляющий аппаратно-программный комплекс ССД.



Рисунок 1 – Схема стендовой системы стабилизации давления

Главной особенностью ОУ является принципиальная неустойчивость процесса горения высокоэнергетических композиций (ВЭК), что влечёт необходимость постоянной выдачи управляющих сигналов на ЭРМ с оперативностью, достаточной для стабильной работы.

Отладка и отработка на реальном ОУ невозможны по причине физических особенностей самого объекта. Ранее в подобных случаях применялось программное моделирование в виде подготовительного режима, что исключает возможность комплексной проверки системы на этапе отладки.

Поэтому впервые для подобных систем была создана полная физическая модель, обеспечивающая поведение, аналогичное реальному процессу горения ВЭК в КС.

Такой подход к моделированию обеспечивает:

- контроль правильности алгоритма и корректности его программной реализации;
- полную диагностику аппаратуры;
- проведение комплексных проверок.

Система и ПО были построены на принципах модульной распределенной и многоуровневой системы управления.

При разработке ПО была проведена укрупненная алгоритмическая декомпозиция системы.

В целом система имеет верхний операторский уровень, представленный пультом контроля и управления, и исполнительный уровень – совокупность управляющего комплекса ССД и моделирующего комплекса КС (рисунок 2). Каждый уровень решает свои конкретные функциональные задачи.

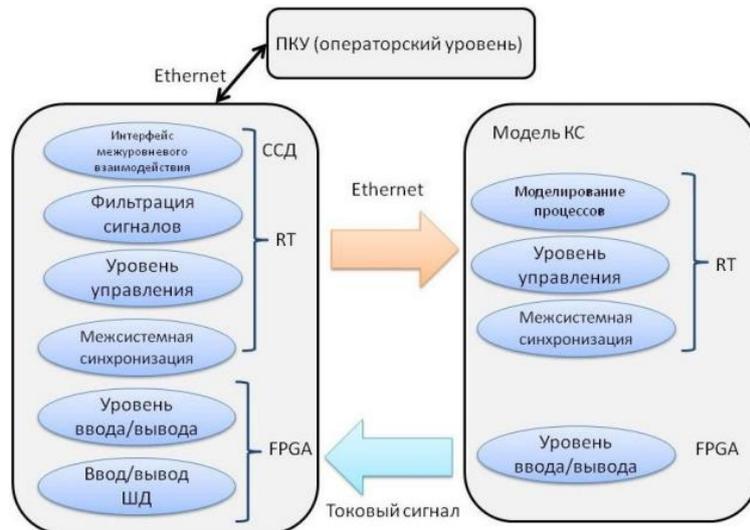


Рисунок 2 – Архитектура системы стабилизации давления

Разрабатываемая система является экспериментальной и должна обеспечивать гибкие настройки и изменения под разные условия эксперимента с возможностью реконфигурации при эксплуатации.

Аппаратное обеспечение ССД должно обеспечивать:

- реализуемость поставленных задач в короткие сроки;
- возможность постоянного управления в режиме реального времени;
- параллельное решение многих задач.

Для вычислительных задач наиболее оптимальным решением является контроллер, а для задач управления – FPGA. В итоге было выбрано комбинированное решение на основе единой аппаратной платформы, построенной на базе контроллера реального времени и программируемой логической интегральной схемы FPGA.

Применения FPGA сделало возможным решение параллельных задач с поддержанием необходимой оперативности.

При проектировании ПО для управляющего комплекса ССД и моделирующего комплекса КС была выполнена двухэтапная алгоритмическая декомпозиция.

При выполнении 1-го этапа было решено создать три основные группы ПО и разделить основные задачи между ними следующим образом.

***Программное обеспечение управляющего контроллера ССД:***

- выполняет диагностические процедуры аппаратных средств и элементов ОУ;
- контролирует состояние ОУ и обрабатывает аварийные ситуации;
- реализует различные режимы работы (основная работа и холодный пуск);
- обеспечивает взаимодействие с АСУ ИТК;
- считывает управляющие воздействия в режиме реального времени;
- обеспечивает синхронное взаимодействие со смежными системами.

***Программное обеспечение моделирующего комплекса КС*** выполняет:

- моделирование процессов в КС в реальном времени;
- формирование и выдачу сигналов, имитирующих работу КС;
- синхронное взаимодействие с ССД.

***Программное обеспечение пульта контроля и управления*** обеспечивает:

- организацию человеко-машинного интерфейса;
- динамическую загрузку новых данных;
- сбор и сохранение данных в ходе работы.

При выполнении 2-го этапа декомпозиции задач ПО управляющего комплекса ССД и моделирующего комплекса КС было решено разделить каждое из них на следующие части: ПО контроллера реального времени (RT) и ПО FPGA.

На контроллер реального времени возлагаются основные управляющие и расчётные функции, а на FPGA – функции взаимодействия с периферийными модулями.

Таким образом, в итоге двухэтапной декомпозиции перечень основных задач ПО был переработан в многоплановый иерархический список большого количества более мелких задач.

Функционирование ПО в течение такта управления организовано следующим образом (рисунок 3).

Управляющий комплекс ССД на уровне FPGA каждые 2 мс параллельно выполняет следующие задачи:

- чтение значения входных сигналов и передачу их на уровень RT-контроллера, а также на выход для записи в телеметрию;
- выдачу выходных сигналов;
- опрос датчиков давления и передачу собранного массива данных на уровень RT-контроллера;

– изменение положения органов управления КС при необходимости.

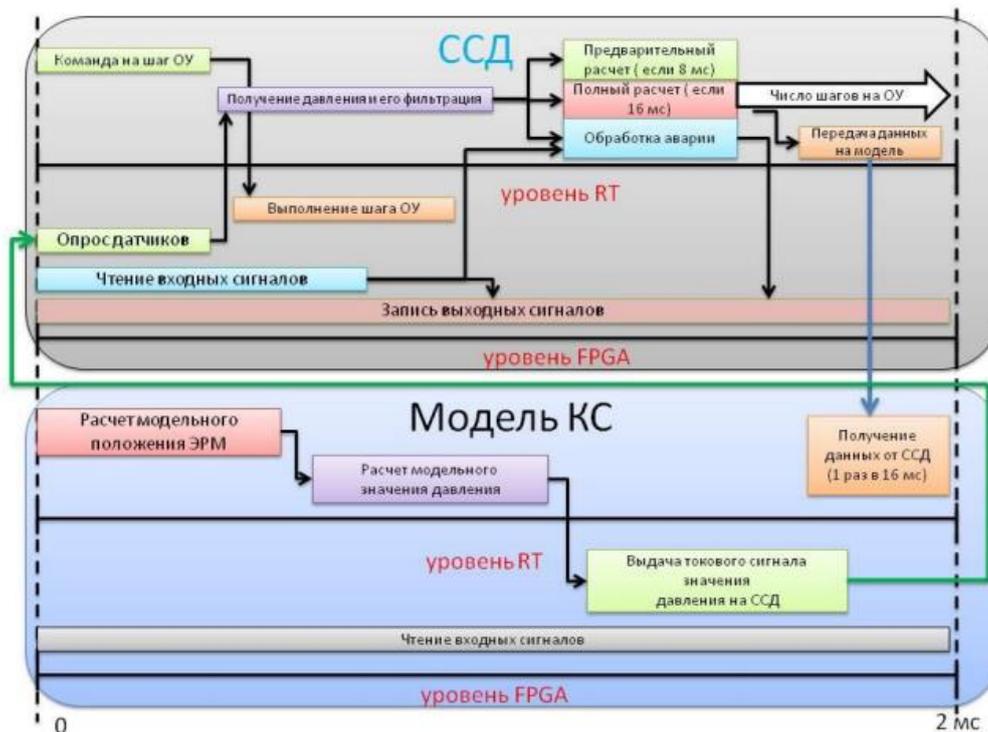


Рисунок 3 – Основной цикл работы систем

На уровне RT-контроллера в режиме реального времени и с заданной оперативностью выполняются следующие задачи:

- фильтрация данных по давлению для получения актуальных данных;
- выдача команды для органов управления КС на уровень FPGA;
- анализ системы на аварийные ситуации и при необходимости их отработка;
- один раз за каждые 8 мс проведение предварительного расчета алгоритма;
- один раз за каждые 16 мс полный расчет алгоритма, и при необходимости синхронная выдача данных на модель КС.

Моделирующий комплекс КС каждые 2 мс выполняет на уровне FPGA параллельно следующие задачи:

- чтение входных сигналов;
- выдачу токового сигнала значения давления на ССД.

На уровне RT-контроллера в реальном времени каждые 2 мс выполняются: расчет модельного положения ЭРМ и модельного значения давления и выдача его на уровень FPGA; раз в 16 мс – синхронное получение данных от ССД.

Для обеспечения синхронизации работы управляющего комплекса ССД и моделирующего комплекса КС на обоих комплексах выполняется специфическая последовательность действий. Она подробно рассматривается для 2мс-го такта, на котором происходит передача данных (рисунок 4).

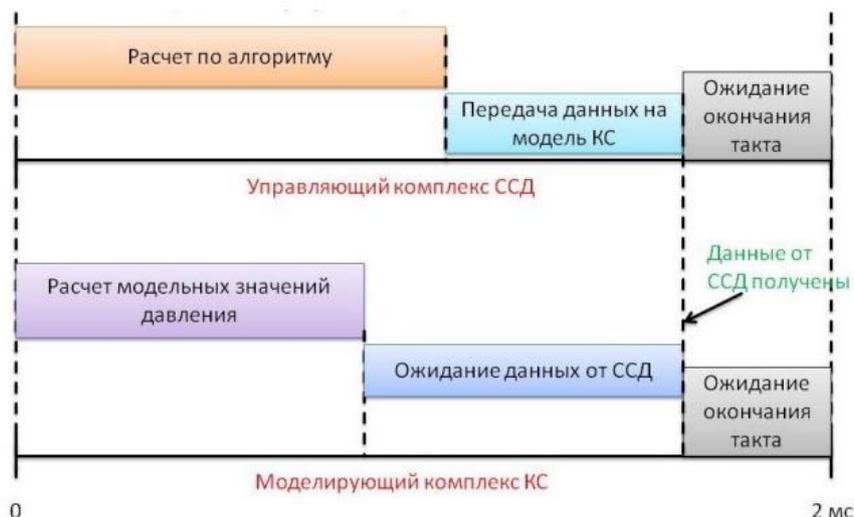


Рисунок 4 – Выполнение синхронизации

На управляющем комплексе ССД выполняются: расчет по алгоритму; передача данных на модель КС; ожидание окончания такта, на моделирующем комплексе КС – расчет модельных значений давления; ожидание данных от ССД; завершение цикла ожидания при получении данных от ССД; ожидание окончания такта.

Данные передаются по сетевому интерфейсу ethernet, который не является детерминированным. Синхронизация достигается благодаря оптимальному выбору момента времени передачи данных и малому размеру передаваемых данных.

Основное преимущество FPGA состоит в том, что его использование позволило достичь большей оперативности, реального распараллеливания основных работ, моментальной реакции системы на изменение входных параметров за счет большей частоты опроса, чем это возможно на контроллере RT. В итоге нагрузка на контроллер реального времени была уменьшена, что привело к более рациональному использованию его ресурсов и дало возможность выдержать все заданные временные интервалы.

При разработке системы применяемый комплексный подход к созданию АСУ и ПО был модернизирован и дополнен следующими основными принципами:

- применение параллельного программирования и операционных систем реального времени;
- циклическая итерационная разработка;
- использование физической модели.

Система стабилизации давления была полностью отработана и протестирована на физической модели КС. К настоящему моменту было успешно проведено четыре испытания, завершившихся с положительными результатами.

Далее приведены результаты, полученные в ходе 3-го испытания (рисунок 5). На графике наблюдается совпадение показаний реализовавшегося в ходе испытания давления с ожидаемыми.

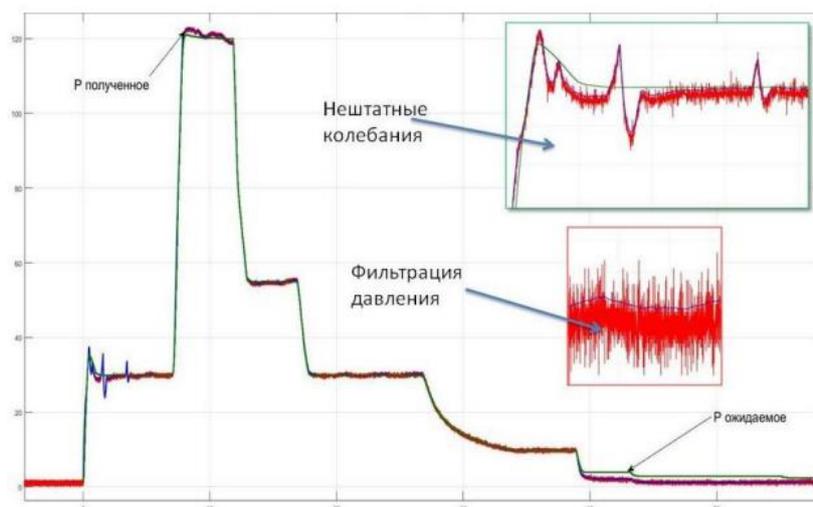


Рисунок 5 – Практические результаты

В ходе данного опыта была реализована глубина регулирования 12 (от 10 до 120 атм), что представляет собой значительное достижение.

Благодаря использованию физического моделирования КС было серьёзно сокращено время на подготовку и проведение комплексных проверок перед испытаниями. Стало возможным в течение одного дня провести загрузку новых данных, отладку и комплексную проверку системы на объекте эксплуатации, а также само испытание.

Подводя итоги практических испытаний, нужно отметить, что были успешно отработаны режимы функционирования КС, не достижимые ранее по причине конструкторских и аппаратных ограничений.

Созданная система обладает высоким модернизационным потенциалом. Ближайший шаг в модернизации системы заключается в возможности проводить расчёт каждые 2 мс, т.е. величина перемещения органов управления будет формироваться на каждый отдельный шаг органов управления.

Система стабилизации давления позволяет проводить отработку различных программ функционирования и различных режимов на модели КС, что, в свою очередь, является основой для реализации отдельного научного направления.

В ходе выполнения работ были достигнуты следующие результаты:

- реализован механизм достоверной и надёжной установки ЭРМ в ноль с исключением эффекта дребезга ламелей;
- реализован способ фильтрации значений давления в целях стабильного и надежного управления КС;
- разработано новейшее программное обеспечение для нового направления экспериментальных исследований;
- повышена эффективность подготовки и проведения испытаний, сокращены до 1 дня сроки подготовительных работ и испытаний;

– значительно снижены сроки и стоимость испытательных работ.

### Список литературы

1. Руководство пользователя на контроллер NI cRIO–9038, [http://www.ni.com/pdf/manuals/375696d\\_03.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/375696d_03.pdf).
2. Руководство по настройке на контроллер NI cRIO–9038, <http://www.ni.com/pdf/manuals/375696d.pdf>.
3. Руководство пользователя на драйвер шагового двигателя P70530, <http://www.ni.com/pdf/manuals/P70530manual.pdf>.
4. Руководство пользователя на модуль АЦП NI9218, [http://www.ni.com/pdf/manuals/376918a\\_02.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/376918a_02.pdf).
5. Руководство по эксплуатации на датчик БД Сенсорс DMP 331К, <http://www.bdsensors.ru/pdf/doc/dmp331>
6. Емельянов А.В., Шилин А.Н. Шаговые двигатели: Учебное пособие. – Волгоград: Волг.ГТУ, 2005.
7. Брендан Б. Распределенные системы. Паттерны проектирования.– Питер, 2019.

### СТАНЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЦКП «СКИФ»

И.А. Рубцов<sup>1,4</sup>, К.А. Тен<sup>1</sup>, Э.Р. Прууэл<sup>1</sup>, А.О. Кашкаров<sup>1</sup>, А.С. Аракчеев<sup>2</sup>, Б.П. Толочко<sup>3</sup>, А.И. Анчаров<sup>3</sup>, Я.В. Зубавичус<sup>4</sup>, Я.В. Ракшун<sup>2,4</sup>, В.М. Аульченко<sup>2</sup>, Л.И. Шехтман<sup>2</sup>, В.В. Жуланов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

<sup>2</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск

<sup>3</sup>Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск

<sup>4</sup>Институт катализа им. Г.К. Бореского СО РАН, г. Новосибирск

В рамках реализации проекта Центра коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ») предполагается строительство шести экспериментальных станций 1-й очереди, одной из которых является станция 1–3 «Быстропротекающие процессы».

Она состоит из трёх секций: «Динамические процессы», «Плазма», «Экстремально высокие температуры» и предназначена для решения широкого круга исследовательских и технологических задач, процессы в которых протекают за десятки нано- и микросекунд, методами скоростной рентгеновской дифракции и радиографии. В рамках концепции станции лежит комплексный подход к исследованию структуры различных объектов на основе экспериментальных методик, использующих пучки синхротронного излучения высокой яркости.

На станции предполагается реализовать методики дифрактометрии и рентгенографии в режиме высокого временного разрешения: малоугловое рентгеновское рассеяние, рентгенография, и дифрактометрия In Situ и Operando, с интервалом между кадрами до 2,8 нс и экспозицией порядка 50 пс.

Круг актуальных экспериментальных задач станции включает в себя исследование процесса детонации; воздействия взрыва, ударных волн, лазерного излучения, плазмы и направленного потока частиц на разнообразные вещества и материалы. Методики позволяют отслеживать динамику изменения структуры детонационного и ударно-волнового фронта, формирование наночастиц, а также исследовать фазовый состав и локальную структуру вещества при экстремальных воздействиях.

#### **СМЕШИВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ В ПЛАНЕТАРНОМ СМЕСИТЕЛЕ**

Н.С. Козлов, С.А. Светлов, А.В. Почеревин

*Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,*

*г. Бийск Алтайского края*

Научно обоснованный выбор конструкции смесителя для смешения конкретных материалов должен начинаться с изучения их физико-механических свойств и условий приготовления смеси [1]. Существуют гравитационные, центробежные, барабанные, вибрационные, червячно-лопастные, лопастные, пневматические смесители и др. [2], в то же время часто требуются универсальные смесители, легко перестраиваемые на переработку различных сред с различным массовым соотношением и физико-механическими свойствами компонентов, что, в первую очередь, целесообразно с экономической точки зрения. Кроме этого, все перечисленные выше смесители имеют общий недостаток – низкое качество смеси при работе с материалами и средами, значительно различающимися по плотности и вязкости, особенно при перемешивании материалов, склонных к адгезии и когезии.

На основе анализа процесса смешивания высоковязких сред разработана конструкция лабораторной установки, содержащей планетарный смеситель с лопастными мешалками, вращающимися в цилиндрической ёмкости. Планетарный смеситель [3] с вертикально расположенными мешалками и может применяться для перемешивания и смешивания сыпучих материалов различного гранулометрического состава и жидковязких компонентов. Данная установка позволяет провести ряд исследований по изучению процесса смешивания жидких и сыпучих веществ, с возможностью регулирования и изменения основных параметров процесса, к которым можно отнести:

- конструктивные особенности смесителя и режимы его работы (степень заполнения корпуса материалом, скорость и характер циркуляции его внутри корпуса смесителя, расположение и количество перемешивающих устройств, скорость вращения этих устройств, поддерживаемый температурный режим в смесителе и т.д.);
- физико-механические характеристики смеси компонентов (соотношение компонентов, их гранулометрический состав, плотность, коэффициенты внутреннего и внешнего трения, адгезия, когезия, влажность и т.д.).

Лабораторная установка для изучения процесса смешивания сыпучих и жидких компонентов (рисунок 1) состоит из лопастного смесителя с приводом, термостата и блока контрольно-измерительных приборов. Основными элементами смесителя являются камера смешивания компонентов, редуктор, перемешивающие устройства с лопастными мешалками и привод. В корпусе камеры смешивания имеется резьбовое отверстие под термопару для контроля рабочей температуры смеси. Требуемый температурный режим поддерживается термостатом, из которого горячая вода подается непосредственно в теплообменную рубашку камеры смешивания. Контроль и управление процессом смешивания осуществляется тахометрами, вольтметром, амперметром, регулятором, мостом, потенциометром и частотными преобразователями. Температура теплоносителя контролируется термометром сопротивления и электронным мостом. Сигнал с термопары фиксируется потенциометром.

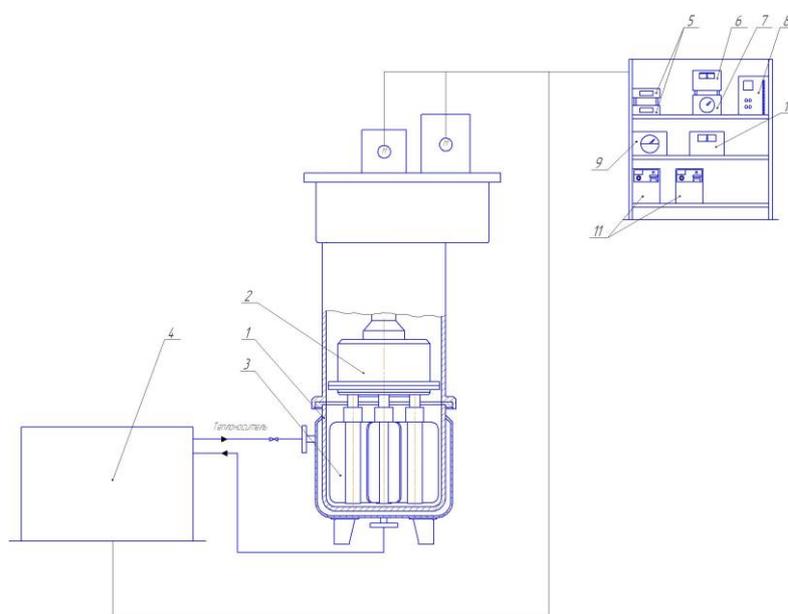


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки для приготовления смесей: 1 – камера смешивания; 2 – редуктор; 3 – лопастная мешалка; 4 – термостат; 5 – тахометр; 6 – вольтметр; 7 – амперметр; 8 – регулятор; 9 – электронный мост; 10 – потенциометр; 11 – частотный преобразователь

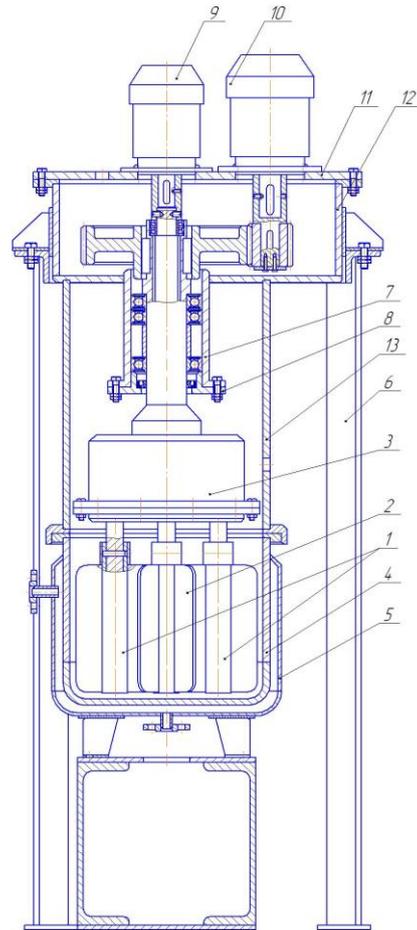
Компоненты в камере смешивания перемешиваются при помощи трёх вертикально расположенных лопастных мешалок, каждая из которых вращается относительно своей оси, и все мешалки вместе с редуктором вращаются относительно оси камеры смешивания. Скорость вращения мешалок и редуктора регулируется частотными преобразователями. Частота вращения вала измеряется тахометром. Для определения мощности, потребляемой электродвигателями при перемешивании смеси компонентов, используются вольтметр и амперметр, позволяющие измерить напряжение и силу тока в цепи. Для автоматизации технологического процесса используется регулятор.

На рисунке 2 представлена схема планетарного лопастного смесителя.

---

Рисунок 2 – Схема планетарного лопастного смесителя: 1, 2 – мешалка; 3 – редуктор; 4 – камера смешивания; 5 – рубашка; 6 – рама; 7 – опора; 8 – крышка; 9, 10 – электродвигатель; 11 – крышка; 12 – корпус привода; 13 – труба

---



Мешалки 1 и 2, расположенные внутри камеры смешивания 4, являются основными рабочими элементами. Боковые быстроходные мешалки 1, вращающиеся в два раза быстрее тихоходной мешалки 2, являются двухлопастными. Центральная тихоходная мешалка 2 имеет четыре лопасти. Подобный выбор конструкции мешалок необходим для предотвращения их заклинивания и для обеспечения требуемого сопряжения между ними. В качестве перемешивающих устройств могут использоваться мешалки различной конструкции, с прямыми, изогнутыми или наклонными лопастями. Планетарный редуктор 3 предназначен для передачи вращения от приводного механизма к мешалкам и перемещения мешалок вокруг оси камеры смешивания. Корпус камеры смешивания 4 оборудован теплообменной рубашкой 5, в которую подаётся теплоноситель для смешивания компонентов при заданной температуре теплоносителя.

Взаимное вращение мешалок друг относительно друга и перемещение их относительно оси камеры смешивания обеспечивает эффективное и быстрое смешивание различных компонентов смеси во всём рабочем пространстве камеры, отсутствие застойных зон. Редуктор установлен в подшипниках, которые размещаются в подшипниковой опоре и упираются в крышку. Фланец, приваренный к трубе, имеет центрирующий пояс, для обеспечения соосного соединения с камерой смешивания. Корпус привода содержит лапы для установки его на раму. Крышка закрывает

приводной механизм и является опорой для размещения электродвигателей.

Данный смеситель может применяться для приготовления паст в производстве смесевых ракетных твёрдых топлив. Паста представляет собой высококонцентрированную суспензию с высоким содержанием твёрдой дисперсной фазы. В качестве жидкой среды используется раствор полимера (смесь синтетического каучука с пластификатором, в качестве которого применяют индустриальное, трансформаторное, вазелиновое масла, в некоторых случаях нитроглицерин), а в качестве твёрдой фазы (наполнителя) – смесь, состоящую из поверхностно-активных веществ (ПАВ), антиоксидантов (ингибиторы отверждения) и энергетических добавок (металлические порошки) [4].

Адсорбируясь на поверхности твёрдых частиц наполнителя, ПАВ изменяют процессы на границе раздела фаз. С одной стороны, меняется интенсивность коагуляционного контакта между частицами наполнителя, с другой – взаимодействие поверхности наполнителя с полимерным связующим. Как правило, содержание ПАВ колеблется от 0,1 до 0,3 %, что снижает вязкость топливной массы на один порядок. Так как твёрдая фаза представлена в виде сыпучего материала, это обуславливает достаточно большую поверхность для тепло- и массообмена и соответственно высокую интенсивность теплопередачи.

Основная цель процесса смешивания – получение однородной смеси высокого качества. Для её приготовления используется раствор полимера – очень вязкая, густая жидкость с большой плотностью, поэтому смешивание с наполнителем при обычных условиях не даёт желаемых результатов. Известно, что чем выше температура раствора полимера, тем ниже его вязкость и плотность. С одной стороны, это позволяет более равномерно распределить компоненты наполнителя по всему объёму смеси, а с другой, снизить потери мощности на преодоление сопротивления со стороны перемешиваемой среды. В связи с этим процесс целесообразнее проводить при нагревании. Поэтому камера смешивания аппарата оснащается теплообменной рубашкой, в которую подаётся горячий теплоноситель (вода). Определение требуемого температурного режима и наиболее оптимальных условий проведения процесса смешивания, а также размеров смесителя, является одной из задач исследования. Уравнение теплового баланса процесса смешивания компонентов будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{M}{\tau} c_1 (t_{1К} - t_{1Н}) + Q_i = KF\Delta t_{cp} = Gc_2 (t_{2Н} - t_{2К}),$$

где  $M$  – масса смеси в аппарате, кг;  $\tau$  – время нагрева смеси, с;  $c_1, c_2$  – средняя удельная теплоёмкость смеси и воды, Дж/(кг·К);  $t_{1Н}, t_{1К}$  – температура смеси в начальный момент подачи теплоносителя в рубашку и при установившемся режиме теплообмена, К;  $Q_i$  – тепловые потери, Вт;  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{cp}$  – средняя разность температур горячего и холодного теплоносителя, К;  $G$  – расход теплоносителя,

подаваемого в рубашку, кг/с;  $t_{2f}$ ,  $t_{2\hat{e}}$  – температура теплоносителя, на входе в рубашку и на выходе из неё, К.

Таким образом, планетарный лопастной смеситель может применяться для смешивания различных составов, содержащих как высоковязкие жидкие компоненты, так и высокодисперсные сыпучие материалы, обеспечивает однородность смеси вследствие интенсивного смешивания компонентов и отсутствие застойных зон в рабочем объеме камеры смешивания.

### **Список литературы**

1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
2. Богданов В.В., Торнер Р.В., Красовский В.Н. и др. Смешение полимеров. – Л.: Химия, 1979. – 192 с.
3. Почеревин А.В., Светлов С.А. Исследование влияния параметров процесса смешивания на однородность приготавливаемых смесей в планетарном смесителе // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием. – Бийск: АлтГТУ, 2016. – С. 32–36.
4. Дементьева, Д.И., Кононов И.С., Мамашев Р.Г. и др. Введение в технологию энергонасыщенных материалов. – Бийск: АлтГТУ, 2009. – 254 с.

### **ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОТРАБОТКИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ И ЗАРЯДОВ РЕГУЛИРУЕМЫХ РДТТ**

А.В. Федорычев, И.Р. Мишкин, Д.В. Жестерев  
ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «Союз»,  
г. Дзержинский Московской области

Для сокращения сроков, объемов и стоимости наземной отработки зарядов твердотопливных регулируемых двигательных установок (ТРДУ) и повышения информативности испытаний создан испытательный технологический комплекс (ИТК) для отработки твердых топлив и составных частей регулируемых РДТТ (зарядов твердого топлива, регулятора расхода продуктов сгорания, теплозащитных материалов, алгоритмов управления и др.), а также исследования характеристик горения твердых топлив в широком интервале давлений и скоростей изменения давления на переходных режимах. Возможна реализация режимов с колебаниями давления в камере сгорания.

Основные составные части комплекса: установка испытательная и автоматизированная система управления технологическим процессом подготовки и проведения испытаний.

Управление процессом работы установки осуществляется путем изменения площади критического сечения сопла и может быть реализовано как по разомкнутой

схеме, так и по замкнутой (с обратной связью по давлению). Конструкция установки предусматривает возможность изменения характерной длины камеры сгорания в широком интервале значений, в том числе тех, при которых в двигателе развивается низкочастотная неустойчивость процесса горения, что необходимо для исследования взаимосвязи условий появления низкочастотной неустойчивости с рецептурными и конструктивными факторами. Установка оснащена регулятором режимов работы, который состоит из электрического привода и регулятора критического сечения сопла.

Автоматизированная система управления технологическим процессом подготовки и проведения испытаний состоит из подсистем управления запуском, сбора и регистрации информации, автоматического регулирования давления и обеспечения безопасности испытания.

#### **ИМПУЛЬСНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ**

Е.И. Пальчиков<sup>1,2</sup>, А.В. Долгих<sup>1,2</sup>, В.В. Клыпин<sup>1,2</sup>, А.М. Рябчун<sup>1,2</sup>, М.С. Самойленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*

При исследовании движения материала и его распределения в пространстве рентгеновская методика в ряде случаев оказывается единственной, позволяющей получить достоверную информацию об объекте. Рентгеновская импульсная методика даёт возможность контролировать вещества и изделия при динамическом нагружении (ударе, взрыве, пластической и упругой деформации), исследовать быстропротекающие процессы (детонация, впрыскивание топлива в камеру сгорания, кавитация), проводить дефектоскопию в нестационарных и полевых условиях, в условиях непрерывного интенсивного производства и т.п. С помощью импульсной радиографии и кинорадиографии также можно изучать динамику многофазных сред с получением количественных данных по концентрациям компонентов среды в условиях, когда эти среды находятся в экстремальных условиях по давлению, температуре, кинетической энергии в окружении прочных непрозрачных оболочек.

В настоящей работе приведен обзор импульсных портативных рентгеновских аппаратов, созданных в ИГиЛ СО РАН для регистрации быстропротекающих однократных, в том числе взрывных, процессов [1]. Аппараты могут быть использованы как для однократной многокадровой синхронной съёмки, так и для импульсной многокадровой скоростной рентгеновской киносъёмки.

**Аппарат для однократной многокадровой синхронной съёмки ПИР-200М [2]** (рисунок 1) предназначен для импульсной рентгеновской съёмки однократных быстропротекающих процессов и быстро движущихся объектов в условиях полигона и

промышленной площадки без каких-либо требований к коммуникациям (электричество, вода, сжатый воздух и т.д.).

---

*Рисунок 1 – Общий вид аппарата ПИР-200М*

---

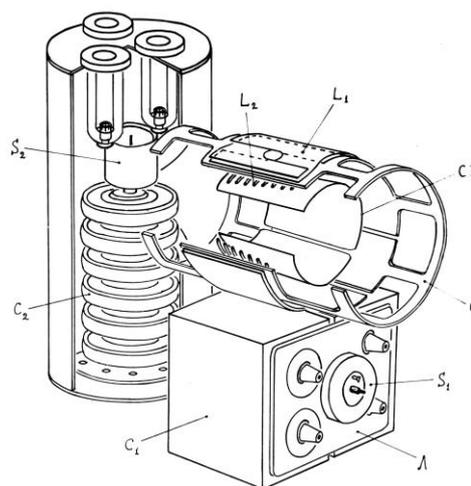


Основой аппарата являются безжелезный трансформатор Тесла с сосредоточенными емкостями, неоднородная формирующая линия на керамических конденсаторах и высоковольтных кабелях. Во вторичном контуре аппарата применена масляная изоляция. Рентгеновское излучение наносекундной длительности генерируется в вакуумных отпаянных трубках с взрывной эмиссией. Конструкция аппарата предусматривает параллельное подключение от одной до трех выносных рентгеновских трубок. Это позволяет проводить ортогональную и стереосъемку, малоракурсную томографию, а также синхронную съемку протяженных либо разнесенных в пространстве объектов (рисунок 2).

---

*Рисунок 2 – Компоновка аппарата ПИР-200М*

---



Численное моделирование процессов в импульсном рентгеновском аппарате показывает, что для заданных добротностей контуров в трансформаторе Тесла на первой полуволне колебаний есть оптимальная величина коэффициента связи с наилучшим КПД, которую можно рассчитать и к которой необходимо стремиться при

разработке трансформатора [3]. ПИР-200М имеет следующие параметры, близкие к оптимальным:

$$F_1 = 186,4 \text{ кГц}, \quad F_2 = 212 \text{ кГц}, \quad k = 0,726,$$

$$C_1 = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}, \quad C_2 = 1576 \text{ пФ}, \quad U_{10} = 10 \text{ кВ},$$

$$Q_1 = 8, \quad Q_2 = 30,$$

где  $F_1, F_2$  – частоты независимо настроенных первичного и вторичного контуров соответственно;  $C_1, C_2$  – их емкости (рисунок 2);  $Q_1, Q_2$  – их добротности;  $k$  – коэффициент связи контуров;  $U_{10}$  – напряжение зарядки емкостей первичного контура.

Аппарат заключен в сплошной экранированный корпус, что снижает уровень внешних помех. Степень защиты аппарата соответствует IP65 по ГОСТ 14254-96. В излучающих головках допускается использование импульсных рентгеновских трубок типа ИМА5-320Д, ИМА6-Д, ИРТП2-240, ИРТП3-Д (рисунок 3).



Рисунок 3 – Рентгеновские трубки, применяемые в аппарате ПИР-200М

Объекты съемки могут двигаться со скоростями до 10 км/с, при этом динамическое размытие снимков не превысит разрешающей способности детекторов. Выносные рентгеновские трубки позволяют размещать сам аппарат в зоне, защищенной от ударных волн и осколков.

Управление рентгеновским аппаратом осуществляется с выносного пульта управления. Запуск производится тремя способами: вручную, нажатием кнопки на пульте; по сигналу электрическим импульсом амплитудой от 5 до 300 В; контактным датчиком (при замыкании контактов) с возможностью установки задержки на пульте от 3 до 999 мкс с шагом 1 мкс. Цепи пуска гальванически развязаны от земли.

Режим работы рентгеновского аппарата – генерация одиночного импульса тормозного излучения по команде запуска

Напряжение зарядки аппарата ПИР-200М ~220 В, 50 Гц. Потребляемая мощность не более 50 Вт. Аппарат имеет встроенный аккумулятор 12 В 3,2 Ач, позволяющий работать автономно (до 100 рентгеновских вспышек и до 4 ч в ждущем режиме).

Характеристики аппарата ПИР-200М:

- количество излучающих головок от 1 до 3 шт. Размер блока излучателя: длина 307 мм, диаметр 72 мм. Длина кабеля от 2 до 10 м;
- длительность рентгеновского импульса по полувывоте 40 нс в случае трубки типа ИМА6-Д и 80 нс в случае трубки типа ИМА5-320Д;



В них применены: быстрый трансформатор Тесла с малым числом витков и магнитным полем, сформированным с помощью скин-экранов 3 и 4 и ферритовых сердечников; незаряжаемая вторичная обмотка 2; оптимизированная малоиндуктивная разрядная цепь, работающая на диодную трубку с разрядником-обострителем *S*. В аппаратах применяется масляная изоляция. В отличие от аппаратов с газовой изоляцией [5] (Аргумент, Сарма), данные рентгенокинематографические аппараты допускают более высокую частоту работы благодаря лучшему теплоотводу и меньшему времени релаксации разрядника-обострителя, а также имеют возможность запуска от синхроимпульса (в отличие от дефектоскопических аппаратов Сарма).

Этот аппарат допускает сборку с двумя типами разрядников – Р-48 на 100 кВ и Р-43 на 150 кВ, с двумя типами рентгеновских трубок – ИМА6-Д, ИМА2-150Д и трубкой ИМА3-150Э с выпуском электронного пучка в атмосферу. Максимальная энергия квантов – 100 кэВ и 150 кэВ. Длительность вспышки 10 нс, частота повторения рентгеновских импульсов от одиночных вспышек по команде до 400 Гц (рисунок 5).

Возможные применения: рентгеновская скоростная киносъёмка динамических процессов, исследование внутренней структуры объекта при горении пиротехнических составов, спортивная медицина, дефектоскопия.



Рисунок 5 – Портативный ИРА с напряжением 150 кВ с регулированием частоты от одиночных вспышек по команде до 400 Гц

#### Характеристики малогабаритных частотных аппаратов

Х характеристика	ЧИМРА-100	РИСК-СК-150
<i>D</i> внешнего электрода, мм	80	94
<i>D</i> высоковольтного электрода, мм	60	70
<i>D</i> внутреннего электрода, мм	5	5
Ёмкость, пФ	33	36
Длина цепи, мм	50	56
Рабочее напряжение, кВ	100	150
Доза за одну вспышку на расстоянии 1 м, мР	0,05	0,1
Рентгеновские трубки	ИМА6-Д	ИМА2-150Д

Параметры аппарата РИСК-СК-150:  $F_1 = 2,4 \text{ кГц}$ ,  $F_2 = 1,8...2,0 \text{ кГц}$ ,  $k = 0,75$ ,  $C_1 = 16,4 \text{ пФ}$ ,  $C_2 = 36,2 \text{ пФ}$ ,  $U_{10} = 10 \text{ кВ}$ ,  $L_1 = 250 \text{ мкГн}$ ,  $L_2 = 213 \text{ мкГн}$ , где  $F_1$ ,  $F_2$  – частоты независимо настроенных первичного и вторичного контуров соответственно;  $C_1$ ,  $C_2$  – их емкости;  $L_1$ ,  $L_2$  – их индуктивности;  $k$  – коэффициент связи контуров;  $U_{10}$  – напряжение зарядки емкостей первичного контура.

Максимальная просвечиваемая толщина:

в режиме киносъёмки – сталь 2 мм, дюралюминий 15 мм.

в режиме накопления дозы – сталь 7,8 мм, дюралюминий 50 мм.

Работа аппарата осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц либо от внешнего аккумулятора. Режимы работы излучателя: одиночные вспышки, периодические вспышки с частотой до 400 Гц. Масса аппарата 10 кг, пульта 0,5 кг.

### **Выводы**

1. Импульсные переносные рентгеновские аппараты ПИР-200М, разработанные в ИГиЛ СО РАН, обладая автономностью и необходимыми для регистрации дозовыми и временными характеристиками, позволяют проводить динамическую радиографию на необорудованных полигонах, баллистических трассах, взрывных стендах и промышленных площадках.

2. Аппараты типа РИСК допускают высокую частоту работы благодаря лучшему теплоотводу и меньшему времени релаксации разрядника-обострителя и могут применяться для исследования внутренней динамики процесса горения высокоэнергетических композиций.

3. Применение импульсных рентгеновских источников для регистрации динамических процессов в высокоэнергетических композициях даёт возможность изучать процессы, недоступные для наблюдения другими способами.

### **Список литературы**

1. Пальчиков Е.И. Портативные импульсные рентгеновские установки для регистрации быстропротекающих процессов. Часть III. Обзор устройств разработки ИГиЛ СО РАН // Южно-Сибирский научный вестник. – 2018. – № 4. – С. 275–286.

2. Palchikov E.I., Dolgikh A.V., Klypin V.V. et al. Pulse X-ray device for stereo imaging and few-projection tomography of explosive and fast processes. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference series, Vol. 894 (2017) 012069. doi:10.1088/1742-6596/894/1/012069. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/894/1/012069/pdf>

3. Пальчиков Е.И., Рябчун А.М. Анализ работы трансформатора Тесла на первой полуволне выходного напряжения с учетом омических потерь // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – Вып. 6. – С. 121–125.

4. Palchikov E.I., Dolgikh A.V., Klypin V.V. et al.. Developing a new high-power flash X-ray apparatus with harmonized magnetic and electrical fields. ТРН-2018. Institute of Physics Publishing. IOP Conf. Series // Journal of Physics: Conf. Series 1128 (2018) 012117. doi:10.1088/1742-6596/1128/1/012117. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1128/1/012117/pdf>.

5. Авилов Э.А., Балтаков Ф.Н., Завьялов Н.В. и др. Портативные импульсные рентгеновские аппараты с газовой изоляцией // Труды РФЯЦ – ВНИИЭФ. – 2003. – Вып. 5. – С.190 – 195.

### **СОПЛОВОЙ УПРАВЛЯЮЩИЙ БЛОК МНОГОКРАТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

## ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОТРАБОТКИ НАПОЛНИТЕЛЕЙ РЕГУЛИРУЕМЫХ РДТТ

К.А. Бражников, В.М. Федотенко

АО «Корпорация «Московский институт теплотехники», г. Москва

Сопловой управляющий блок (СУБ) входит в состав испытательного технологического комплекса (ИТК) и обеспечивает регулирование расхода и давления газа (рисунок 1).

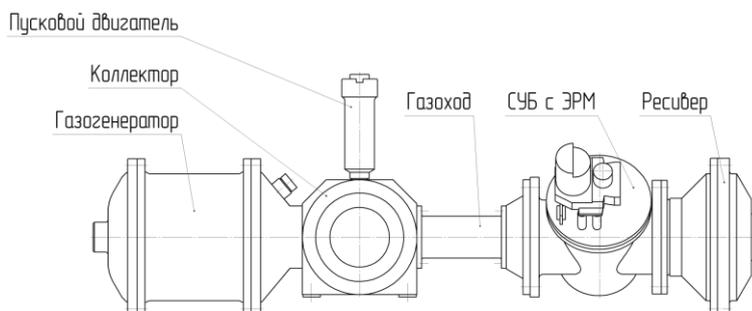


Рисунок 1 – Схема ИТК для отработки наполнителей регулируемых РДТТ

Существующие на момент начала разработки данного блока аналоги, несмотря на свою высокую работоспособность и надежность, характеризуются сложностью сборки и переборки. Также не был решен вопрос о возможности их многократного использования.

Цель настоящей работы – создание СУБ для многократного применения (до 10) при максимально возможном повторном использовании его составных частей.

Были поставлены следующие задачи:

- поиск технических решений, обеспечивающих многократность работы и простоту переборки СУБ и способствующих повышению технологичности и сокращению сроков изготовления в условиях единичного производства СУБ;
- экспериментальное подтверждение возможности многократного использования деталей критического сечения и элементов кинематики из молибдено-вольфрамового сплава МВ-2-МП и ниобиевого сплава Н65В2Мц(М);
- разработка последовательности переборки СУБ;
- проведение переборки и дефектации СУБ.

Требования, предъявляемые к разрабатываемому СУБ: общее число испытаний – до 10; время одного испытания – до 100 с; максимальное давление в полости СУБ – 13 МПа; максимальная температура – до 2300 К.

Сопловой управляющий блок представляет собой корпус с размещенными внутри элементами кинематики – заслонкой, карданом и валом (рисунок 2).

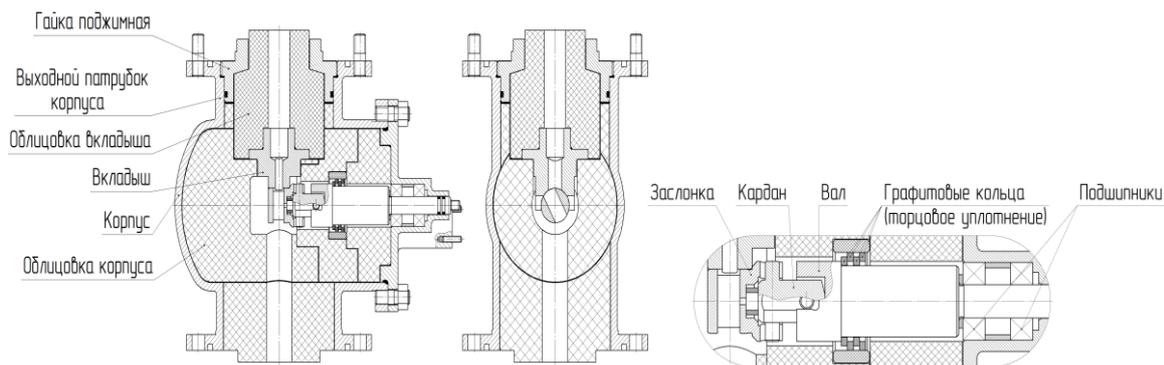


Рисунок 2 – Конструкция СУБ ИТК

Корпус состоит из обечайки, входного и выходного патрубков. В выходной патрубок установлен вкладыш критического сечения. Вкладыш и заслонка образуют регулируемую пару СУБ. Вал установлен в подшипники качения, на нём расположен узел торцевого уплотнения, состоящий из последовательно установленных графитовых колец, для уменьшения подвода тепла в зону установки подшипников.

Кардан обеспечивает компенсацию несоосности заслонки и вала, обусловленную неточностью изготовления и сборки.

Регулирование СУБ осуществляется следующим образом: по команде системы управления с помощью электромеханической рулевой машины (ЭРМ) поворачивается вал, а следовательно, и кинематически связанная с ним заслонка. Её положение относительно сопряженного с ней вкладыша определяет проходное сечение и соответственно требуемый расход газа.

Исходя из требования обеспечения многократности работы и простоты переборки в данной конструкции модифицированы:

- узел уплотнения облицовки вкладыша (рисунок 3, а) заменой клеевого соединения на уплотнительное кольцо, что позволяет легко проводить демонтаж вкладыша для замены облицовки;
- узел торцевого уплотнения (рисунок 3, б), состоящего из графитовых колец, введением дополнительной внешней графитовой втулки, препятствующей деструкции посадочного места колец;
- сборная конструкция кардана (рисунок 3, в), состоящей из корпуса с запрессованными в него штифтами, заменена цельной деталью, что исключает необходимость создания оснастки для запрессовки.

Последовательность переборки СУБ показана на рисунке 4. От корпуса отстыковывается крышка с ЭРМ, из неё извлекается вал с подшипниками и графитовыми кольцами, затем из корпуса – кардан и заслонка, из выходного патрубка корпуса – вкладыш с облицовкой и уплотнительным кольцом. После каждого испытания производится замена подшипников, графитовых колец, облицовки вкладыша и уплотнительного кольца, при этом наиболее дорогостоящие элементы (детали критического сечения и кинематики) используются повторно.

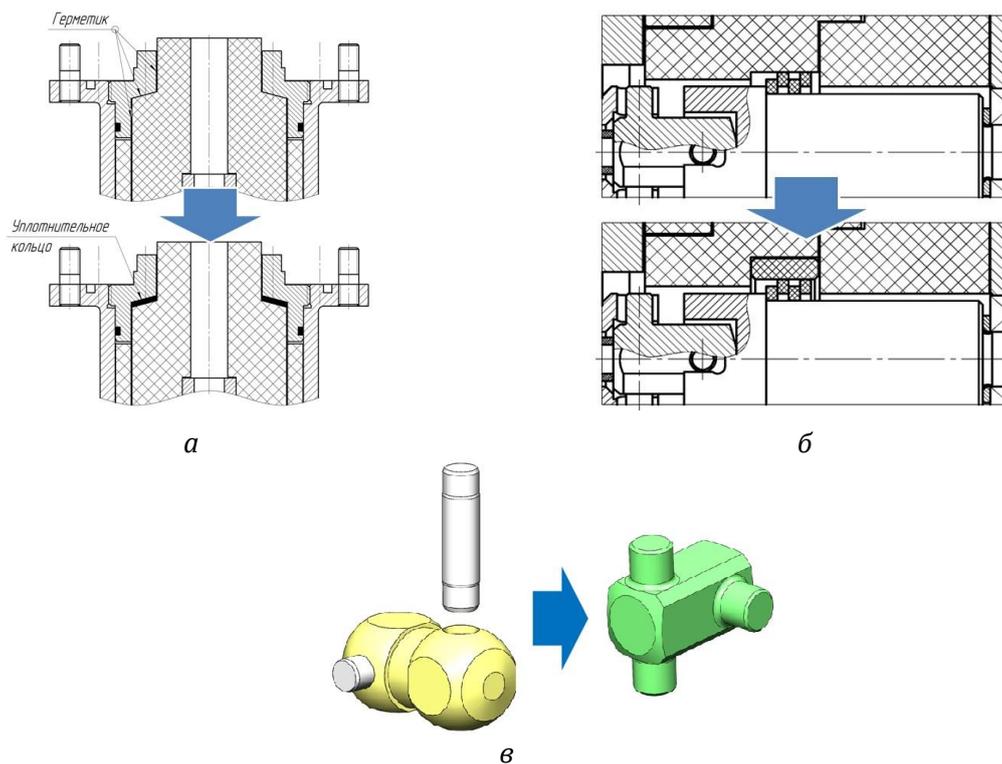


Рисунок 3 – Модификация узла уплотнения облицовки вкладыша (а), торцового уплотнения (б) и кардана (в)

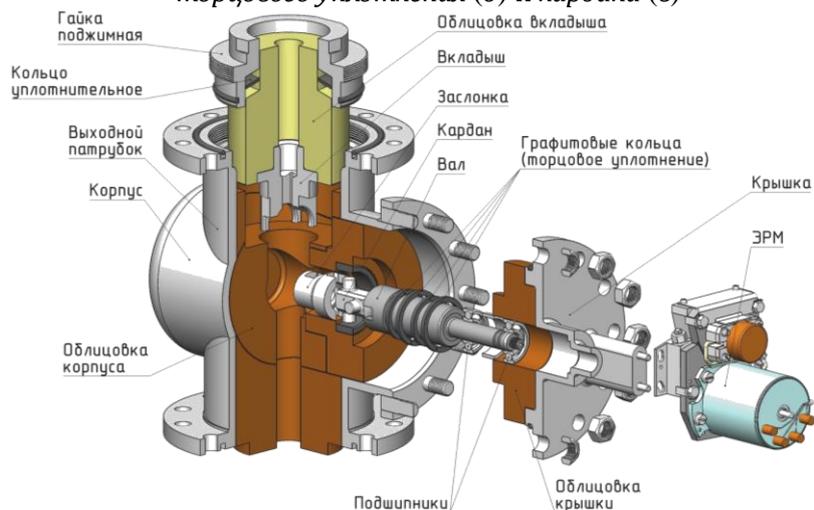


Рисунок 4 – Последовательность переборки СУБ

Проведено экспериментальное подтверждение возможности многократного использования деталей из молибдено-вольфрамового сплава МВ-2-МП и ниобиевого сплава Н65В2Мц(М), а также определены их механические свойства в условиях циклического нагружения. Циклограммы нагружения учитывали максимальное число испытаний, скорости нагрева соответствуют 500 °С/с (рисунок 5).

Полученные результаты (см. таблицу) показали, что свойства материала МВ-2-МП снижаются незначительно, свойства материала Н65В2Мц не снижаются.

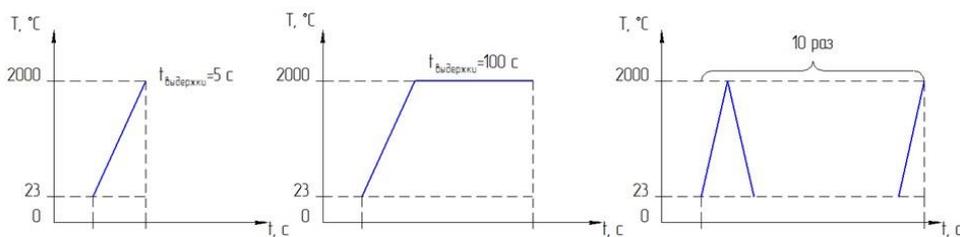


Рисунок 5 – Циклограммы нагружения

**Механические свойства материалов МВ-2-МП и Н65В2Мц(М) в условиях циклического нагружения**

Материал	Предел прочности, МПа		
	1 цикл выдержка 5 с	1 цикл выдержка 100 с	10 циклов
МВ-2-МП	0,3	0,32	0,28
Н65В2Мц(М)	0,52	0,55	0,53

После проведения испытаний, переборки и дефектации СУБ было выявлено:

– все детали многократного использования находились в исправном и работоспособном состоянии и после очистки успешно применялись в последующих испытаниях;

– деформаций деталей критического сечения и кинематики СУБ нет, размеры деталей соответствуют КД;

унос и деструкция эрозионно-стойких материалов облицовки корпусных элементов находятся в допустимых пределах и не нарушают работоспособность СУБ.

**Выводы**

1. Подтверждена возможность создания СУБ, способных работать в условиях многократного использования и включения; правильность выбора технических решений в части обеспечения возможности многократного использования и переборки СУБ и работоспособность разработанного СУБ при испытаниях как с проведением переборки, так и без неё проведения.

2. Определены механические свойства молибдено-вольфрамового сплава МВ-2-МП и ниобиевого сплава Н65В2Мц(М) в условиях циклического нагружения, проведенные работы свидетельствуют о правильности выбора конструкционных материалов.

3. Разработан сопловой управляющий блок для многократного использования, позволяющий снизить стоимость создания испытательного комплекса, проведения испытаний, отработки элементов ТРДУ, в том числе и отработки самих СУБ (до 10 раз).

**ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ ПОЛЕТА НЕУПРАВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА СТАРТА И УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ТЯГИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НАПОЛНИТЕЛЯ**

А.А. Трубников, Е.И. Титова, А.В. Землевский, Д.В. Богданов

Федеральный центр двойных технологий «С оюз», г. Дзержинский Московской области

Одной из основных задач при разработке энергетических двигательных установок (ЭДУ), снаряжающихся твердым высокоэнергетическим наполнителем (ВЭН), является оценка дальности полета [1]. Точный расчет траектории полета ЭДУ – достаточно сложный и трудоемкий процесс, включающий в себя решение системы нестационарных дифференциальных уравнений. В данную систему уравнений входят выражения, описывающие поступательное и вращательное движения изделия, а также изменение массы в единицу времени на активном участке работы ЭДУ [2]. Наибольшая сложность при этом заключается в нахождении коэффициентов аэродинамических сил в зависимости от высоты, скорости полета и формы ЭДУ (определяются экспериментально или по специальным таблицам). Поэтому на стадиях предварительного проектирования (техническое предложение) оценочные расчеты проводят по упрощенной методике, не учитывающей влияние на динамику полета изделия аэродинамических сил и вращения [3].

В настоящей работе представлен алгоритм построения приближенной методики расчета параметров траектории полета неуправляемых ЭДУ малой дальности с учетом внутренней баллистики, приведены результаты комбинированного внутри- и внешнебаллистического моделирования и оценки влияния начального угла наклона траектории или угла старта и изменения удельного (секундного) импульса тяги на дальность полета ЭДУ.

### **Методика расчета**

В качестве исходных данных при расчете внутри- и внешнебаллистических параметров задаются геометрические размеры корпуса, топливного элемента (длина, диаметр, диаметр канала и др.) и соплового блока (диаметры критического и выходного сечений сопла), плотность  $\rho_m$  и коэффициенты в степенном законе скорости горения ВЭН (единичная скорость горения  $u_l$  и показатель степени  $\nu$ ), температура  $T_p$ , газовая постоянная  $R_\mu$  и показатель адиабаты  $k$  продуктов сгорания (ПС), угол старта  $\theta_0$ , начальная скорость полета ЭДУ  $V$  принимается равной 0.

При расчете внутрибаллистических параметров принимаются следующие допущения: ВЭН горит параллельными слоями (эквидистантное горение); отсутствует эрозионное горение, параметры потока продуктов сгорания принимаются равными от сечения, приходящегося на переднее дно, до предсоплового сечения.

В качестве внешнебаллистических допущений принимаются: отсутствие лобового сопротивления воздуха (полет в пустоте), вращения, управляющих моментов и кривизны Земли; постоянство величины и направления ускорения свободного падения ( $g = 9,8065 \text{ м/с}^2$ , гравитационное поле Земли плоскопараллельное) [1], малость углов атаки и скольжения ( $\alpha, \beta$  равны  $0^\circ$ ).

Баллистическая траектория полета ЭДУ делится на активный участок – движение изделия с работающим двигателем; пассивный – движение ЭДУ происходит по

инерции за счет накопленной на активном участке кинетической (скорость полета) и потенциальной (высота) энергий [4].

При движении ЭДУ на активном участке баллистической траектории (до момента полного выгорания ВЭН) в первую очередь определяется площадь поверхности горения  $S_{гор}$  в зависимости от величины сгоревшего свода  $e$ . Для топливных элементов (ТЭ) с простой по форме геометрией (канально-цилиндрический, торцевой, всестороннего горения и др.) площадь поверхности горения определяется аналитически, для ТЭ, имеющих развитую форму канала (канально-щелевой, звездообразный и др.), с использованием современных программных комплексов трехмерного моделирования, например, как описано в статье [5].

Далее рассчитываются внутриваллистические параметры: значения давлений в камере сгорания  $p$ , критическом  $p_{кр}$  и выходном  $p_a$  сечениях сопла; скорости истечения ПС на срезе сопла  $W_a$ , секундно-массовый расход  $G$ , тяга  $R$  и текущая масса изделия  $m$ :

$$p = \left( \frac{S_{\text{вд}} u_1 \rho_m \sqrt{\chi R_\mu T_p}}{\varphi_c A(k) S_{\text{вд}}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}}, \quad p_{\text{вд}} = p \left( \frac{2k}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad p_a = p_{\text{вд}} \pi(\lambda),$$

$$W_a = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R_\mu T_p \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad G = \rho_\delta S_{\text{вд}} u_1 \left( \frac{p}{p_i} \right)^\nu, \quad R = GW_a + S_a (p_a - p_i), \quad m = m_0 - Gt,$$

где  $A(k) = \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$ ,  $\chi$ ,  $\varphi_c$  – коэффициенты потерь на теплоотдачу и расхода сопла соответственно;  $S_{кр}$ ,  $S_a$  – площадь критического и выходного сечения сопла;  $\pi(\lambda)$  – газодинамическая функция давления, определяемая по таблицам газодинамических функций [6] исходя из соотношения  $q(\lambda) = S_{\text{вд}} / S_a$ ;  $p_n$  – давление окружающей среды при нормальных условиях (101325 Па);  $m_0$  – начальная масса ЭДУ (сумма масс корпуса, ТЭ и полезной нагрузки);  $t$  – шаг по времени.

После проведения внутриваллистического расчета по указанным выше формулам, следуют внешнебаллистические выражения в следующей последовательности:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{R}{m} - g \sin \theta; \quad \frac{d\theta}{dt} = -\frac{gt}{V} \cos \theta; \quad \frac{dx}{dt} = V \cos \theta; \quad \frac{dy}{dt} = V \sin \theta,$$

где  $x$ ,  $y$  – текущие значения дальности и высоты полета ЭДУ.

После полного выгорания ТЭ следует цикл расчета внешнебаллистических параметров на пассивном участке траектории полета до момента падения ЭДУ ( $y = 0$ )

по следующим формулам:  $\frac{dV}{dt} = -g \sin \theta$ ,  $\frac{d\theta}{dt} = -\frac{gt}{V} \cos \theta$ ,  $\frac{dx}{dt} = V \cos \theta$ ,  $\frac{dy}{dt} = V \sin \theta$ .

## Результаты расчетов

В качестве объекта исследования рассматривалась модельная ЭДУ калибром 163 мм, длиной 1470 мм с начальной стартовой массой 70 кг, массой ТЭ 35 кг без полезной нагрузки. Удельный импульс тяги ТЭ 208 с.

Для определения максимальной дальности полета проведены комбинированные расчеты внутри- и внешнебаллистических параметров в программе, разработанной на основе приведенной в работе методике при  $Q_0=45^\circ$ ,  $55^\circ$  и  $65^\circ$ , так как именно в этом диапазоне достигается максимальная дальность [7] (см. таблицу).

Максимальная дальность полета ЭДУ  $x = 153091,58$  м достигается при  $\theta_0 = 55^\circ$ , минимальная  $x = 132173,52$  м – при  $\theta_0 = 45^\circ$ , прирост дальности составляет 20918,41 м, или 13,66 %. При увеличении угла старта возрастает максимальная высота и время полета, уменьшается угол наклона траектории в точке падения, скорости полета изделия в конце активного и пассивного участков незначительно отличаются друг от друга (в пределах  $(\pm 1,30)\%$ ). При  $\theta_0 = 65^\circ$  дальность полета снижается на 9611,55 м, или на 6 % по сравнению с  $\theta_0 = 55^\circ$ .

#### Результаты расчета параметров полета модельной ЭДУ

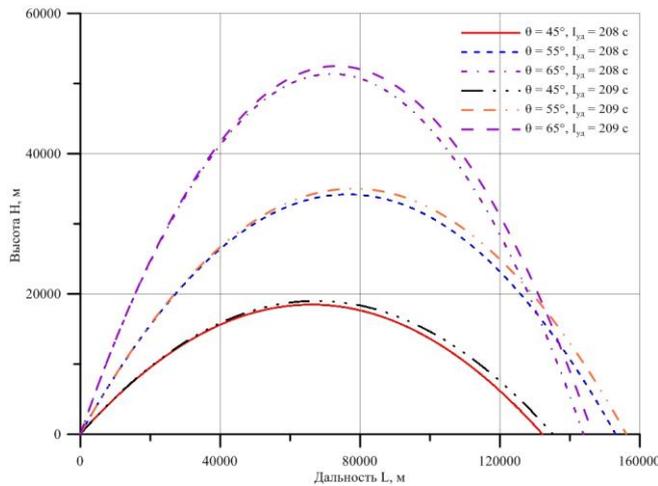
$\theta_0$	Активный участок	Пассивный участок	
		$y_{max}^*$	$y = 0^{**}$
$45^\circ$	$x = 2354,86$ м	$x = 66057,46$ м	$x = 132173,52$ м
	$y = 1323,87$ м	$y = 18468,19$ м	$y = 0$ м
	$V = 1223,67$ м/с	$V = 1077,50$ м/с	$V = 1234,24$ м/с
	$\theta = 28,29^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = -29,19^\circ$
	$T = 5,0$ с	$T = 64,12$ с	$T = 125,48$ с
$55^\circ$	$x = 1995,72$ м	$x = 76527,61$ м	$x = 153091,58$ м
	$y = 1790,32$ м	$y = 34174,91$ м	$y = 0$ м
	$V = 1215,22$ м/с	$V = 917,26$ м/с	$V = 1229,58$ м/с
	$\theta = 40,99^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = -41,76^\circ$
	$T = 5,00$ с	$T = 86,25$ с	$T = 169,73$ с
$65^\circ$	$x = 1524,44$ м	$x = 71941,58$ м	$x = 143906,07$ м
	$y = 2184,68$ м	$y = 51351,81$ м	$y = 0$ м
	$V = 1208,03$ м/с	$V = 703,33$ м/с	$V = 1225,64$ м/с
	$\theta = 54,39^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = -54,98^\circ$
	$T = 5,00$ с	$T = 105,12$ с	$T = 207,44$ с

Примечание. \*, \*\* – параметры в точке максимальной высоты и в точке падения.

Для исследования влияния роста удельного импульса тяги ВЭН на дальность полета ЭДУ проведены расчеты по приведенной методике (удельный импульс тяги ВЭН  $I_{уд} = 208$  с повышаем на 1 с). Известно, что величина  $I_{уд}$  пропорциональна силе ВЭН, т.е.  $I_{\text{вэ}} \sim \sqrt{R_\mu T_p}$  [8]. Силу ВЭН  $\sqrt{R_\mu T_p}$  увеличим пропорционально на коэффициент, соответствующий повышению удельного импульса на 1 с, т.е.:

$$\left(\sqrt{R_\mu T_p}\right)_{I_{\text{вэ}}=209\text{ н}} = \frac{I_{\text{вэ}}=209\text{ н}}{I_{\text{вэ}}=208\text{ н}} \left(\sqrt{R_\mu T_p}\right)_{I_{\text{вэ}}=208\text{ н}} \cdot$$

На рисунке приведены баллистические кривые высота – дальность полета при  $\theta_0=45^\circ, 55^\circ$  и  $60^\circ$  ЭДУ, снаряженных ВЭН с  $I_{уд} = 208$  и  $209$  с.



*Баллистические кривые высота – дальность полета ЭДУ*

Из рисунка видно небольшое приращение дальности и максимальной высоты полета для ЭДУ вследствие увеличения удельного импульса тяги на 1 с. Для  $\theta_0 = 45^\circ$  приращение дальности составило 2994,11 м, или 2,22 %, для  $\theta_0 = 55^\circ$  – 3077,61 м, или 1,97 %, для  $\theta_0 = 65^\circ$  – 2651,90 м, или 1,81 %. Среднее приращение составило 2907,87 м, или 2 %.

### Выводы

1. Максимальная дальность полета неуправляемой ЭДУ достигается при  $\theta_0 = 55^\circ$ .
2. Приращение удельного импульса тяги на 1 с обеспечивает прирост дальности полета в абсолютных цифрах  $\approx 3$  км, в относительных – 2 %.

### Список литературы

1. Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н., Богодистов С.С. Внешняя баллистика: Учебник для студентов вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с.
2. Грумондз В.Т, Яковлев Г.А.. Алгоритмы аэрогидробаллистического проектирования. – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 304 с.
3. Павлюк Ю.С. Баллистическое проектирование ракет: Учебное пособие для вузов.– Челябинск: ЧГТУ, 1996. – 92 с.
4. Пенцак И.Н. Теория полета и конструкция баллистических ракет. – М.: Машиностроение, 1974. – 344 с.
5. Трубникова А.А., Попов В.О., Алексеева Н.А. Методика расчета площади поверхности горения энергетических двигательных установок // Ползуновский вестник. – 2018. – № 4. – С. 145–149.
6. Иров Ю.Д. и др. Газодинамические функции. – М.: Машиностроение, 1965. – 400 с.
7. Фомин В.М., Звезгинцев В.И., Мажуль И.И. и др. Анализ эффективности использования комбинированной силовой установки для разгона малоразмерных ракет,

стартовых с поверхности Земли // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т. 51. – № 6. – С. 21–30.

8. Абугов Д.И., Бобылев В.М. Теория и расчет ракетных двигателей твердого топлива. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>I. НАНОТЕХНОЛОГИИ</b> . . . . .	3
<i>Беляев В.Н., Козлюк А.Ю., Андреев А.С., Глазев Д.Ю.</i> Экспериментальное исследование процесса проточного хромирования с ультрадисперсным алмазом . . . . .	3
<i>Соловьёва К.Н., Петров Е.А., Бычин Н.В.</i> Энергетические характеристики аммиачной селитры с нанокремнеземным горючим . . . . .	6
<i>Морозова О.Н., Павленко А.А., Антонникова А.А., Казанцев И.В.</i> Автономное устройство получения энергии с использованием водорода . . . . .	9
<i>Яценко Д.А.</i> Возможности метода рентгеновской дифракции для исследования ультрадисперсных систем и нанопорошков . . . . .	11
<i>Рыжов И.С., Морозова Т.А., Потемкин Г.А.</i> Исследование кинетики окисления аморфного бора . . . . .	12
<i>Жарков М.Н., Кучуров И.В., Добрынин О.С., Фоменков И.В., Злотин С.Г., Муравьев Н.В., Моногаров К.А., Мееров Д.Б., Пивкина А.Н.</i> Применение сверхкритического CO <sub>2</sub> для получения перспективных ультрадисперсных высокоэнергетических композиционных материалов . . . . .	17
<i>Пустовалов А.В., Струговцов Д.В., Лобанова Г.Л., Шиян Л.Н.</i> Получение нанопорошков Fe методом электрического взрыва проводника . . . . .	22
<i>Лобанова Г.Л., Струговцов Д.В., Шиян Л.Н., Юрмазова Т.А.</i> Исследование закономерностей формирования наноразмерных частиц, образующихся при электрической эрозии железа в водных и органических средах . . . . .	28
<i>Асмедьянова А.Д., Бауман Ю.И., Мишаков И.В., Серкова А.Н., Ведягин А.А.</i> Синтез углеродного наноматериала на самоорганизующихся катализаторах Ni–M . . . . .	34
<i>Ларичев Ю.В., Коскин А.П.</i> Изучение особенностей сульфирования углеродных нанотрубок и нановолокон . . . . .	38
<i>Маматкулов М.И.</i> Динамические явления в структуре наночастиц Pd-Au: квантово-химическое исследование поверхностной сегрегации палладия при адсорбции CO . . . . .	40
<i>Корнев Я.И., Лобанова Г.Л., Сапрыкин Ф.Е.</i> Электроразрядный метод синтеза наноразмерных частиц в жидких средах . . . . .	44
<i>Первиков А.В., Торпков Н.Е., Мужецакая С.Ю.</i> Металлопорошковые композиции на основе нано- и микрочастиц хромоникелевых сталей для формирования коррозионно- и жаростойких деталей сложной формы . . . . .	50
<i>Сулиз К.В., Первиков А.В., Казанцев С.О., Ложкомоев А.С.</i> Синтез и структура наночастиц Al-Cu, Al-Ag, Al-Zn, формирующихся в условиях электрического взрыва двух проволок . . . . .	55
<b>II. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ</b> . . . . .	59
<i>Кондрашов Д.А., Ефимов В.Г., Галахов А.Н., Финажин А.В., Охотникова А.Н.</i> Определение скорости горения высокоэнергетических материалов в процессе огневых стендовых испытаний . . . . .	59

<i>Кулявцева С.В., Громов А.М., Егорова Л.Г., Рябков С.А.</i> Применение метода конечных элементов для анализа диффузионных процессов в прикорпусной зоне изделия . . . . .	62
<i>Абрамов Д.Г., Кодолов А.В., Попов Ф.А.</i> Интеграционная платформа управления комплексом технологических процессов производства изделий спецхимии . . . . .	71
<i>Соколов А.С., Бубнов Г.А., Драничников И.А.</i> Система измерения параметров воздушных ударных волн . . . . .	75
<i>Хохлов Р.О., Драничников А.И., Бубнов Г.А.</i> Автоматизация измерений скорости горения и стендовых испытаний малогабаритных изделий . . . . .	79
<i>Абрамов Д.Г., Кодолов А.В., Попов Ф.А.</i> Особенности отладки и тестирования по АСУТП производств спецхимии . . . . .	81
<i>Беляев В.А., Сурначев И.Н., Пушкин Д.В., Чеканов М.А., Певченко Б.В., Дочилев Н.Е.</i> Универсальный заряд для снаряжения осколочно-фугасных боеприпасов . . . . .	86
<i>Беляев В.А., Сурначев И.Н., Пушкин Д.В., Чеканов М.А.</i> Повышение мощности взрыва осколочно-фугасных боеприпасов за счет использования системы многоточечного инициирования . . . . .	88
<i>Григоренко А.В.</i> Газохроматографическое исследование смеси толуол – ксилол, а также продукта их нитрации – эвтектической смеси ДНТ – ДНКс . . . . .	89
<i>Демин А.А., Ершов А.М.</i> Защита элементной базы комплекса измерений параметров воздушной ударной волны в условиях полигонных испытаний высокоэнергетических составов . . . . .	93
<i>Тучков Р.В., Щемелин А.В., Анисимов И.И.</i> Экспериментальное исследование и прогнозирование параметров длительной прочности высоконаполненных композитов при действии вибрационных нагрузок . . . . .	97
<i>Качанов В.К., Соколов И.В., Первушин В.В.</i> Разработка ультразвуковых методов определения дефектов в оболочке и несплошности адгезионного соединения оболочки и наполнителя в цилиндрических изделиях из полимерных материалов . . . . .	99
<i>Кузнецов А.Б., Биткин С.А.</i> Проектирование твердотопливного заряда в среде 3d-моделирования сreo parametric . . . . .	105
<i>Минаев Д.В., Первушин В.В., Дормашова С.С.</i> Автоматизированный комплекс дефектоскопии сложнопрофильных изделий с наполнителем из высокоэнергетического конденсированного материала . . . . .	108
<i>Светлова Т.С., Светлов С.А.</i> Влияние параметров процесса на однородность получаемой смеси в барабанном смесителе . . . . .	112
<i>Никитова А.В., Никитов А.В.</i> Создание программного обеспечения для системы стабилизации давления . . . . .	115
<i>Рубцов И.А., Тен К.А., Прууэл Э.Р., Кашкаров А.О., Аракчеев А.С., Толочко Б.П., Анчаров А.И., Зубавичус Я.В., Ракишун Я.В., Аульченко В.М., Шехтман Л.И., Жуланов В.В.</i> Станция исследования быстропротекающих процессов с помощью синхротронного излучения в ЦКП «Скиф» . . . . .	122

...	
<i>Козлов Н.С., Светлов С.А., Почеревин А.В.</i> Смешивание компонентов в планетарном смесителе . . . . .	123
.....	
<i>Федорычев А.В., Мишкин И.Р., Жестерев Д.В.</i> Испытательный технологический комплекс для отработки твердых топлив и зарядов регулируемых РДТТ . . . . .	127
<i>Пальчиков Е.И., Долгих А.В., Клыпин В.В., Рябчун А.М., Самойленко М.С.</i> Импульсные рентгеновские источники для динамических испытаний высокоэнергетических композиций . . . . .	128
.....	
<i>Бражников К.А., Федотенко В.М.</i> Сопловой управляющий блок многократного использования испытательного технологического комплекса для отработки наполнителей регулируемых РДТТ . . . . .	133
.....	
<i>Трубников А.А., Титова Е.И., Землевский А.В., Богданов Д.В.</i> Оценка дальности полета неуправляемой энергетической двигательной установки в зависимости от угла старта и удельного импульса тяги высокоэнергетического наполнителя . . . .	137
.....	

**Научное издание**

**МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ XXI ВЕКА**

*Доклады V Всероссийской научно-практической конференции  
молодых ученых и специалистов  
4–6 сентября 2019 года. Часть I  
(г. Бийск Алтайского края)*

Научный редактор д.т.н. В.А. Шандаков  
Редактор С.А. Огорокова  
Компьютерный набор и вёрстка И.М. Костюченко  
Дизайн обложки К.В. Рябчиков

Подписано в печать 27.08.2019. Формат 60×84 1/8

Усл. п.л. 8,7. Уч.-изд.л. 9,2

Печать – ризография, множительно-копировальный аппарат «Riso EZ570E»

Тираж 130 экз. Заказ 2019-82  
Издательство Алтайского государственного технического университета  
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

Отпечатано в типографии АО «ФНПЦ «Алтай»  
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1