

# РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПО МЕТОДИКЕ УП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ DAKOTA И МЕТОДА VOX

*М. А. Десятникова, Ю. Е. Дудник, Г. Г. Иванова*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведутся работы по расчетно-теоретическому сопровождению физических экспериментов: создаются и развиваются модели вещества, ведется работа по модернизации конструкции рассматриваемых систем с целью улучшения их характеристик и обеспечения более надежной работы, ведется работа по восстановлению условий нагружения в экспериментах. При выполнении данных работ активно используется методика УП [1], предназначенная для численного решения уравнений механики сплошной среды в одномерном приближении с учетом эффектов, сопровождающих поведение конденсированных сред при воздействии ударных и тепловых нагрузок.

При решении задач обработки экспериментальных данных (калибровки и подбора параметров моделей, геометрии систем) часто возникает необходимость поиска минимума некоторой функции, позволяющей оценить близость расчетных и экспериментальных данных. Решение данной задачи вручную, как правило, сопряжено с большими временными затратами. Для проведения разнообразных серий расчетов по обработке экспериментальных данных в автоматическом режиме была разработана оптимизационная версия методики УП.

В настоящее время область применения оптимизационного комплекса:

– отработка и калибровка параметров моделей вещества (целью расчетов является определение оптимального набора значений параметров функций веществ, таких как уравнение состояния, коэффициент теплопроводности, кинетика разрушения, модель компактирования, модель упругопластического деформирования и т. д.),

– модернизации геометрии систем с целью улучшения их характеристик и обеспечения более надежной работы,

– восстановление условий нагружения экспериментов (целью расчетов является определение постоянного значения граничного условия, набора значений в табличной зависимости граничного условия или параметров формулы, определяющей нагрузку на границе).

Целью всех оптимизационных расчетов является определение минимума оценочной функции (задача определения максимума оценочной функции сводится к задаче определения минимума оценочной функции противоположного знака). В результате проведения анализа основных типов экспериментальных

данных, в настоящее время реализована возможность расчета следующих видов оценочной функции:

– минимум отклонения скалярной величины от экспериментально зафиксированного значения: например, определение минимума отклонения между расчетным и экспериментальным значением толщины первого откольного слоя;

– минимум (максимум) скалярной величины: например, определение минимума (максимума) времени прихода возмущения на определенный радиус системы;

– минимум отклонения (или вектора отклонений) расчетной табличной зависимости от экспериментальной. В этот вид вычисления оценочной функции входит, например, определение минимума отклонения расчетной и экспериментальной зависимостей скорости движения свободной поверхности, давления от времени в некоторой точке образца, распределения плотности в некоторый момент времени;

– минимум суперпозиции функций: данный вид вычисления оценочной функции необходим, например, для задачи определения параметров кинетических моделей разрушения, используя одновременно данные по значению толщин первых откольных слоев и по зарегистрированным скоростям движения свободной поверхности.

В настоящее время при проведении оптимизационных расчетов реализована возможность поиска минимума оценочной функции с помощью следующих методов оптимизации:

– комплекс-метода VOX [2] – не градиентный метод в основе которого лежит определение набора случайных точек из множества определения (комплекса) с дальнейшей заменой точек с текущими наибольшими значениями функций (минимизируемой) с помощью алгоритмов, использующих координаты центра комплекса и координаты «наихудшей» точки;

– программ свободной библиотеки DAKOTA [3] как в последовательном, так и в параллельном режиме (с возможностью определения доверительных интервалов изменения оптимальных значений параметров).

Общая структура и последовательность выполнения оптимизационного расчета с помощью метода оптимизации VOX продемонстрирована на рис. 1.

На первом этапе происходит создание файла начальных данных для оптимизации *file\_optim*, содержащего информацию о типе и методе оптимизации,

об общих параметрах выбранного метода оптимизации, о начальных и дополнительных параметрах для выбранного типа оптимизации, об именах файлов с подстановками задач для счетной методики УП, о выбранном виде и параметрах расчета оценочной функции. На втором этапе происходит запуск задачи оптимизации: в ведущей программе оптимизационной процедуры осуществляется чтение файла начальных данных, формирование дополнительных файлов: *file\_optim\_in* (двоичный файл со значениями оптимизационных параметров), *file\_optim\_info* (текстовый файл, содержащий параметры выбранного типа оптимизации) и запуск счетной методики УП. На этапе расчета начальных данных в счетной методике УП происходит их корректировка в соответствии с файлами *file\_optim\_info*, *file\_tdf\_optim\_in*. По завершению расчета задачи происходит формирова-

ние дополнительных файлов с результатами расчета, необходимыми для определения оценочной функции. Далее в рамках ведущей программы оптимизационной процедуры проводится расчет оценочной функции и передача полученного значения в комплекс BOX. В комплексе BOX осуществляется проверка сходимости полученного решения и получение новых значений варьируемых параметров (с дальнейшей передачей полученных значений в ведущую программу оптимизационной процедуры) или выход из программы по одному из критериев завершения счета и формирование отчетной выдачи.

Общая структура и последовательность выполнения оптимизационного расчета с помощью программ свободной библиотеки DAKOTA продемонстрирована на рис. 2.



Рис. 1. Общая структура и последовательность выполнения оптимизационного расчета с помощью метода BOX



Рис. 2. Общая структура и последовательность выполнения оптимизационного расчета с помощью программ свободной библиотеки DAKOTA

Особенностью выполнения расчета является то, что ведущая программа оптимизационной процедуры осуществляет только чтение файла начальных данных, формирование дополнительных файлов для счетной методики УП и библиотеки DAKOTA и запуск программы DAKOTA с драйвером УП-DAKOTA. Драйвер программы DAKOTA осуществляет формирование файлов со значениями оптимизационных параметров, запуск счетной методики УП и определение на основе полученных результатов расчета величины оценочной функции для ее передачи одной из программ оптимизации библиотеки DAKOTA.

В качестве тестовых примеров, демонстрирующих работоспособность программ связи счетной методики УП с методами оптимизации, в рамках данной работы рассмотрим задачу оптимизации параметров кинетической модели разрушения ДРК-L [4] для свинца на основе опытов по нагружению образцов взрывчатим веществом [5], задачу восстановления таблицы давления, заданного на левой границе системы, по известной скорости движения правой границы системы и задачу оптимизации размера слоя мгновенной детонации для описания движения границ области.

### Оптимизация параметров кинетической модели откольного разрушения и компактирования ДРК-L

Оптимизация модели откольного разрушения и компактирования ДРК-L [4] предусматривает воз-

можность определения параметров модели, при которых наблюдается наилучшее согласие расчетных и экспериментальных толщин первого откольного слоя. В работе [5] приведены результаты экспериментов, в которых определены толщины отколов, образовавшихся в свинцовых пластинах, нагруженных взрывчатим веществом (ВВ).

В оптимизационных расчетах проводилась вариация шести параметров модели ДРК-L –  $R_{\min}$ ,  $N$ ,  $C_1$ ,  $\omega_{кр}$ ,  $\sigma_0$ ,  $\mu_0$ . Диапазон изменения оптимизируемых параметров приведен в табл. 1. В качестве оценочной функции использовалось среднее абсолютное отклонение между расчетными и экспериментальными величинами толщин первого откольного слоя.

В табл. 2, 3 представлены результаты оптимизационных расчетов, проведенных по методике УП с использованием программ свободной библиотеки DAKOTA и метода BOX. Первая оптимизационная серия была проведена с применением не градиентного метода оптимизации *coliny direct* библиотеки DAKOTA, вторая – с использованием метода наименьших квадратов *n2sol* библиотеки DAKOTA, третья – с использованием метода BOX. В табл. 2 приведено сравнение экспериментально зафиксированных толщин первого откольного слоя для каждого опыта с расчетными величинами, полученными с использованием найденных программой оптимизации значений параметров модели ДРК-L. В табл. 3 представлены полученные в результате оптимизации параметры модели ДРК-L.

Таблица 1

Параметры оптимизационных расчетов

Оптимизируемый параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
$R_{\min}$ (см)	$10^{-9}$	$10^{-5}$
$N$ , (1/см <sup>3</sup> )	$10^4$	$10^{10}$
$C_1$	0,8	1,2
$\omega_{кр}$	0,2	0,45
$\sigma_0$ , (МН/м)	400	880
$\mu_0$ , ( $10^{-3}$ Па·с)	3	300

Таблица 2

Результаты оптимизации

$\Delta_{Обр}$ , см	$\Delta_{ВВ}$ , см	$\Delta_{Отк\_Э}$ , см	DAKOTA				BOX	
			Метод оптимизации – <i>colinydirect</i>		Метод оптимизации – <i>n2sol</i>		$\Delta_{Отк\_P}$ , см	$\delta$ , %
			$\Delta_{Отк\_P}$ , см	$\delta$ , %	$\Delta_{Отк\_P}$ , см	$\delta$ , %		
2,5	10	0,130±0,02	0,1345	3,46	0,1305	0,38	0,1295	0,38
	5,1	0,110±0,02	0,1065	3,18	0,1035	5,91	0,1065	3,18
	3,81	0,105±0,02	0,1045	0,48	0,1025	2,38	0,1045	0,48
	2,5	0,100±0,02	0,1075	7,5	0,1055	5,5	0,1045	4,5
	1,27	0,120±0,01	0,1295	7,92	0,1300	8,33	0,1215	1,25
1,2	1,9	0,075±0,02	0,0545	27,33	0,0555	26	0,0555	26
	1,27	0,080±0,01	0,0795	0,625	0,0805	0,625	0,0795	0,625

Параметры модели ДРК-L, полученные в результате оптимизации

	$R_{\min}$ , см	$N_0$ , 1/см <sup>3</sup>	$C_1$	$\sigma_0$ , МН/м	$\mu_{0L}$ , $10^{-3} \cdot \text{Па} \cdot \text{с}$	$\omega_{\text{крит}}$
DAKOTA, <i>coliny direct</i>	$1,396 \cdot 10^{-7}$	$0,979071 \cdot 10^5$	1,022075	463,017	3,9	0,4
DAKOTA, <i>n2sol</i>	$1,3869 \cdot 10^{-7}$	$10^5$	1,009648	453,58	3,9	0,4
BOX	$1,7537 \cdot 10^{-7}$	$2,482648 \cdot 10^4$	1,1356862	635,38	10,6	0,3736

Анализ табл. 2 показывает, что с помощью полученных процедур оптимизации значений параметров модели ДРК-L удалось с хорошей точностью описать результаты исследуемых экспериментов – отклонение расчетных и экспериментальных значений толщин откольного слоя находятся в пределах экспериментальной погрешности и среднее относительное отклонение между экспериментальными и расчетными значениями величин первых откольных слоев для первой серии оптимизации составляет ~7,21 %, для второй серии оптимизации ~7,02 %, для третьей серии оптимизации ~5,2 %.

### Восстановление таблицы граничного давления

В качестве тестовых задач рассмотрен процесс деформирования цилиндрических оболочек из тантала толщиной  $\Delta_1 = 0,092$  см и  $\Delta_2 = 0,063$  см под действием давления, заданного на внутренней границе. В результате оптимизационных расчетов необходимо восстановить таблицу давления, заданного слева, по известной скорости движения правой границы оболочки. Математическая постановка расчета включает только учет газодинамики. Предполагается, что параметры уравнения состояния для тантала известны.

Для получения «эталонной» скорости движения правой границы использовалась табличная зависимость граничного условия, график которой продемонстрирован на рис. 3.

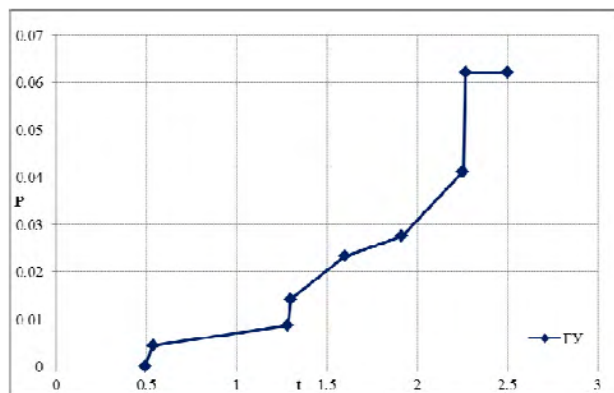
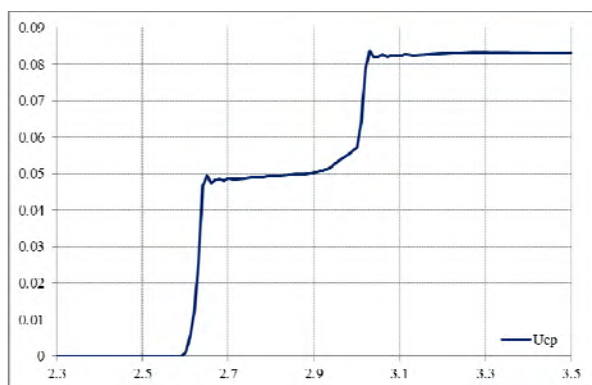


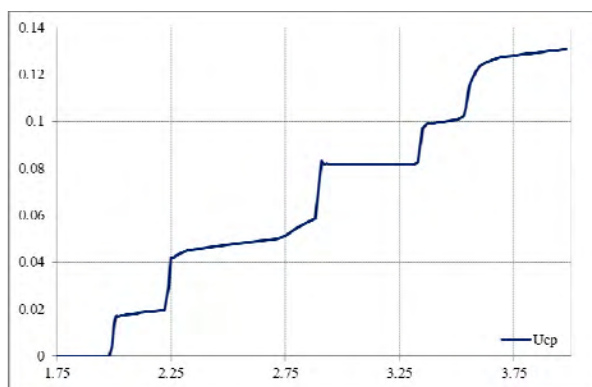
Рис. 3. Эталонная табличная зависимость граничного условия

На рис. 4 представлены графики скорости движения свободной поверхности, получаемые в расчетах по нагружению цилиндрических оболочек

разных толщин. Следует отметить, что при одинаковых нагружающих условиях в рассматриваемых образцах волновая конфигурация решения сильно различна.



а



б

Рис. 4. Эталонные скорости движения свободной поверхности при нагружении: а – оболочки толщиной  $\Delta_1 = 0,092$  см, б – оболочки толщиной  $\Delta_2 = 0,063$  см

Для поиска минимума отклонения результатов расчета от эталонных значений использовался метод наименьших квадратов *n2sol* библиотеки DAKOTA. Решение данной задачи с использованием библиотеки DAKOTA обусловлено возможностью нахождения не только конкретных значений искомых параметров, при которых наблюдается наилучшее согласие экспериментальных и расчетных данных, но и доверительного интервала изменения каждого из них.

Для оценки зависимости решения от начальных данных проведено два оптимизационных расчета по

восстановлению таблицы граничного давления при нагружении образца толщиной 0,092 см, начальные данные для которых приведены в табл. 4.

В табл. 5 и 6 приведены результаты двух серий оптимизационных расчетов по восстановлению таблицы граничного давления при нагружении оболочки толщиной 0,092 см: расчетные и «эталонные» значения оптимизируемых параметров, доверительный интервал вариации расчетных значений и абсолютное отклонение результата оптимизационного расчета от «эталонного». Анализ таблиц показывает, что найденные значения табличной зависимости гранич-

ного условия с достаточно хорошей точностью согласуются с «эталонными» значениями в независимости от выбранного начального приближения. Наибольшие отклонения между «эталонными» и расчетными значениями получены для второго, третьего и четвертого параметров. Однако неточность в задании данных параметров не отразилась на расчетной скорости движения свободной поверхности. Оценочная функция для первого расчета составила  $7,69 \cdot 10^{-9}$ , для второго –  $3,72 \cdot 10^{-7}$ .

Таблица 4

Начальные данные оптимизационных расчетов по восстановлению таблицы граничного давления при нагружении образца толщиной 0,092 см

№ о.п	Минимальное значение	Максимальное значение	Начальное значение № 1	Начальное значение № 2
1	0	0,0001	0,0	0,0
2	0	0,062088	0,003	0,003
3	0	0,062088	0,007	0,006
4	0	0,062088	0,01	0,01
5	0	0,062088	0,02	0,017
6	0	0,062088	0,024	0,02
7	0	0,062088	0,039	0,03
8	0,052	0,064	0,055	0,046
9	0,052	0,064	0,06	0,05

Таблица 5

Результат первого оптимизационного расчета по восстановлению таблицы граничного давления при нагружении оболочки толщиной 0,092 см

№	$P_{\text{эталон}}$	Результат оптимизации		Доверительный интервал	
		$P_{\text{оптим}}$	$\Delta P$	$P_{\text{min}}$	$P_{\text{max}}$
1	0	4,92E-08	4,92E-08	-1,42E-5	1,43E-05
2	0,004533	0,003658	0,000875	3,62E-03	3,70E-03
3	0,008654	0,009632	0,000978	9,37E-03	9,89E-03
4	0,014286	0,013397	0,000889	1,29E-02	1,39E-02
5	0,023352	0,023368	1,6E-05	2,33E-02	2,34E-02
6	0,02761	0,027549	6,1E-05	2,75E-02	2,76E-02
7	0,041209	0,041044	0,000165	4,10E-02	4,11E-02
8	0,062088	0,062196	0,000108	6,21E-02	6,23E-02
9	0,062088	0,062088	0	6,19E-02	6,21E-02
$\Delta P_{\text{max}} = 1,58\%$ ; $\Delta P_{\text{cp}} = 0,55\%$				$\Delta P_{\text{max}} = 1,61\%$ ; $\Delta P_{\text{cp}} = 0,42\%$	

Таблица 6

Результат второго оптимизационного расчета по восстановлению таблицы граничного давления при нагружении оболочки толщиной 0,092 см

№	$P_{\text{эталон}}$	Результат оптимизации		Доверительный интервал	
		$P_{\text{оптим}}$	$\Delta P$	$P_{\text{min}}$	$P_{\text{max}}$
1	0	3,01E-06	3,01E-06	-3,04E-4	3,10E-04
2	0,004533	0,00574	0,00121	5,45E-03	6,04E-03
3	0,008654	0,006682	0,001972	6,34E-03	7,02E-03
4	0,014286	0,015385	0,0011	1,29E-02	1,78E-02
5	0,023352	0,023209	0,000143	2,24E-02	2,41E-02
6	0,02761	0,028145	0,00054	2,78E-02	2,85E-02
7	0,041209	0,040372	0,000837	3,94E-02	4,13E-02
8	0,062088	0,062934	0,00085	6,15E-02	6,44E-02
9	0,062088	0,062261	0,00017	6,16E-02	6,27E-02
$\Delta P_{\text{max}} = 3,18\%$ ; $\Delta P_{\text{cp}} = 1,22\%$				$\Delta P_{\text{max}} = 7,89\%$ ; $\Delta P_{\text{cp}} = 2,7\%$	



Следует отметить, что найденные программной оптимизации значения параметров по начальному приближению № 1 получены с достаточно хорошей точностью, так как отклонения максимально допустимого от минимально допустимого значения для параметров не превышает 1,61 % (среднее отклонение 0,42 %). Однако в оптимизационном расчете № 2 получены достаточно широкие доверительные интервалы для вариации параметров: при использовании начального приближения № 2 среднее отклонение максимально допустимого оптимального значения от минимально допустимого значения 2,7 %, максимальное значение данного отклонения – 7,89 %.

На рис. 5а продемонстрированы графики функций табличной зависимости граничного условия, полученные в результате оптимизации, в сравнении с «эталонной». На рис. 5б – скорость движения свободной поверхности в результирующих оптимизационных расчетах в сравнении с «эталонной».

В табл. 7 приведены результаты оптимизационного расчета по нагружению образца толщиной 0,063 см: расчетные и «эталонные» значения оптимизируемых параметров, доверительный интервал вариации расчетных значений и абсолютное отклонение результата оптимизационного расчета от «эталонного».

Анализ табл. 7 показывает, что найденные программной оптимизации значения в табличной зависимости нагружающего давления с хорошей точностью согласуются с «эталонными» значениями. Оценочная функция для данного расчета составила  $1,335 \cdot 10^{-6}$ . Следует отметить, что найденные программной оптимизации значения параметров получены с хорошей точностью, так как отклонения максимально допустимого от минимально допустимого значения параметров оптимизации не превышает 1,29 % (среднее отклонение 0,58 %), «эталонные» значения параметров входят в доверительные интервалы.

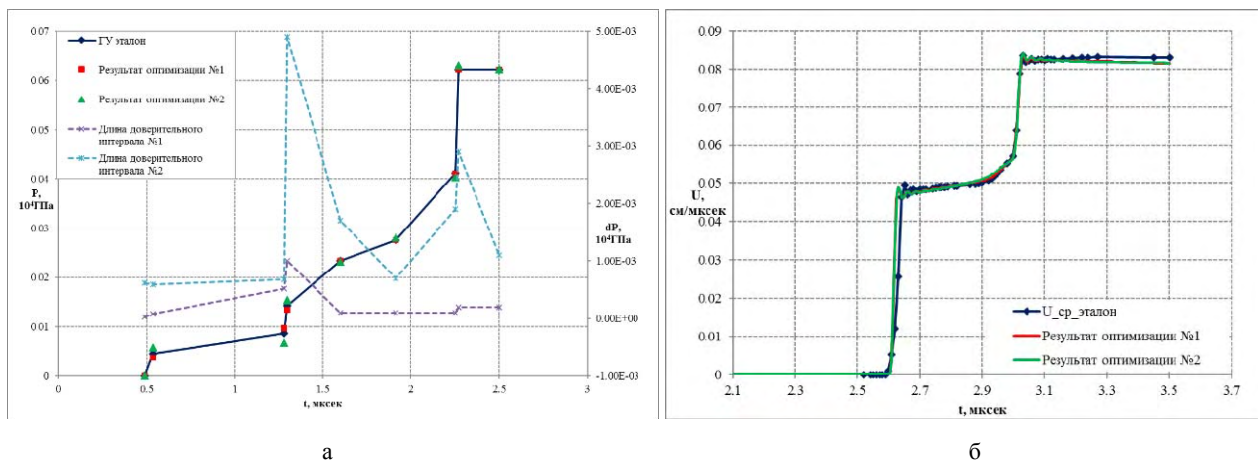


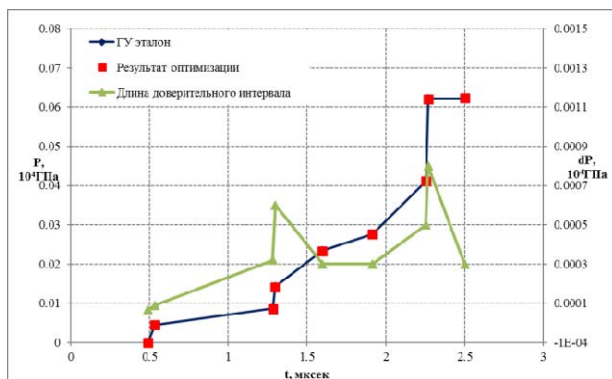
Рис. 5. Результаты оптимизационного расчета по восстановлению таблицы граничного давления при нагружении оболочки толщиной 0,092 см: а – табличная зависимость граничного условия, б – скорость движения свободной поверхности при нагружении оболочки

Таблица 7

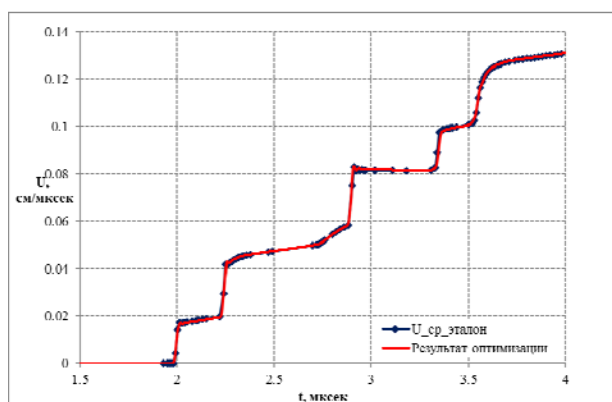
Результат оптимизационного расчета по нагружению образца толщиной 0,063 см

№	Эталон	Результат оптимизации		Доверительный интервал	
		$P_{\text{оптим}}$	$\Delta P$	$P_{\text{min}}$	$P_{\text{max}}$
1	0	4,66E-06	4,66E-06	-2,91E-05	3,84E-05
2	0,004533	0,004511	2,2E-05	4,47E-03	4,56E-03
3	0,008654	0,008574	8E-05	8,41E-03	8,73E-03
4	0,014286	0,01419	9,6E-05	1,39E-02	1,45E-02
5	0,023352	0,023347	5E-06	2,32E-02	2,35E-02
6	0,02761	0,027629	1,9E-05	2,75E-02	2,78E-02
7	0,041209	0,041121	8,8E-05	4,09E-02	4,14E-02
8	0,062088	0,062	8,8E-05	6,16E-02	6,24E-02
9	0,062088	0,062238	0,00015	6,20E-02	6,23E-02
		$\Delta P_{\text{max}} = 0,24 \%$ ; $\Delta P_{\text{cp}} = 0,098 \%$		$\Delta P_{\text{max}} = 1,29 \%$ ; $\Delta P_{\text{cp}} = 0,58 \%$	

На рис. 6а продемонстрированы графики функций табличной зависимости граничного условия, полученные в результате оптимизации, в сравнении с «эталонной». На рис. 6б – скорость движения свободной поверхности в результирующих оптимизационных расчетах в сравнении с «эталонной».



а



б

Рис. 6. Результаты оптимизационного расчета по восстановлению таблицы граничного давления при нагружении оболочки толщиной 0,063 см: а – табличная зависимость граничного условия, б – скорость движения свободной поверхности при нагружении оболочки

Анализ проведенных оптимизационных расчетов по нагружению цилиндрических оболочек разной толщины показывает, что для получения наилучших результатов расчета необходимо корректно выбирать параметры оптимизации в соответствии с имеющимися экспериментальными данными. Скорость движения свободной поверхности оболочки меньшей толщины позволила в хорошей степени точности восстановить исходную таблицу нагружающих граничных условий. Возникающие в рассматриваемой оболочке волны успевали достигнуть и отразиться от ее свободной поверхности, что отражено в самой скорости ее движения. В свою очередь, скорость движения свободной поверхности оболочки большей толщины не отражала всех скачков давления в исходной таблице граничных условий. Восстановить нагружающую таблицу с хорошей точностью удалось только при условии, что ее начальное приближение близко к «эталонному». Это обусловлено

тем, что экспериментальная кривая могла быть описана с практически одинаковой степенью точности при различных значениях части параметров в таблице граничных условий.

### Оптимизация размера слоя мгновенной детонации

Типовая схема большого ряда экспериментальных устройств, предназначенных для исследования термодинамических и прочностных свойств материалов продемонстрирована на рис. 7. Расчетная геометрия данного типа устройств представляет собой набор следующих областей: область I – воздушный зазор; область II – оболочка из исследуемого материала, взрывчатое вещество (ВВ) и слой мгновенной детонации (СМД), который представляет собой слой мгновенно прореагировавшего ВВ относительно небольшой толщины, и применяется для моделирования инициирования детонации ВВ. При газодинамической обработке экспериментальных устройств рассмотренного типа регистрируется положение границ исследуемой оболочки (область II) во времени (зависимости движения внутреннего  $R_1(t)$  и внешнего  $R_2(t)$  радиусов от времени).

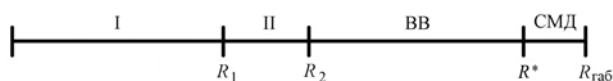


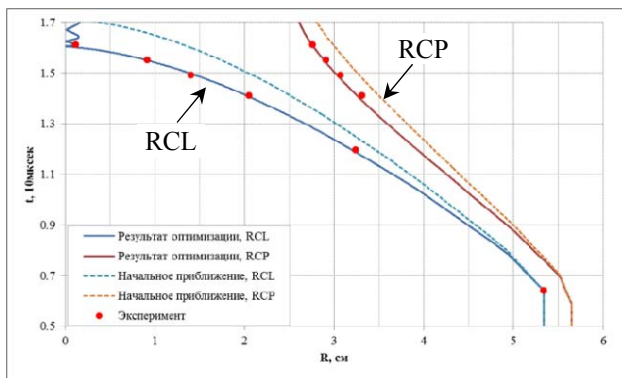
Рис. 7. Типовая схема моделируемого устройства

Рассмотрим задачу оптимизации толщины слоя мгновенной детонации на основании результатов газодинамической обработки экспериментального устройства по исследованию прочностных свойств стали. Толщина исследуемой оболочки 0,31 см, величина воздушного зазора 5,34 см, габариты рассматриваемой системы 11,1 см. Целью оптимизационных расчетов является определение значения одного параметра: внутреннего радиуса области СМД –  $R^*$ , при котором достигается наилучшее согласие расчетных кривых с экспериментальными зависимостями  $R_1(t)$  и  $R_2(t)$ , при условии, что минимальное значение толщины СМД 0,05 см, максимальное – 1,6 см, радиус внешней границы области СМД  $R_{таб}$  зафиксирован.

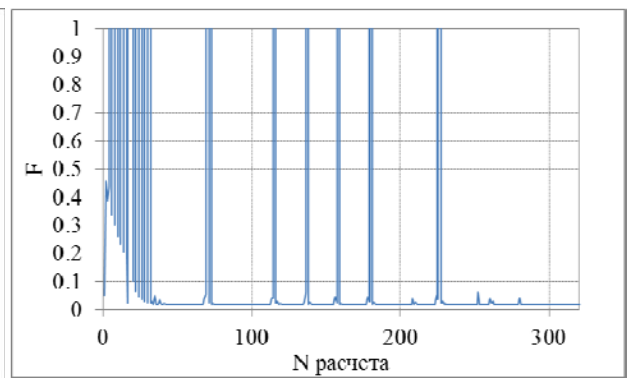
В качестве оценочной функции использовалось среднеквадратичное отклонение между расчетными и экспериментальными табличными зависимостями движения внутренней и внешней границ области II:

$$F = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1, n} \left[ \left( \frac{Rcl(t_i) - R_1(t_i)}{R_1(t_i)} \right)^2 + \left( \frac{Rcp(t_i) - R_2(t_i)}{R_2(t_i)} \right)^2 \right]}$$

где  $Rcl(t_i)$ ,  $Rcp(t_i)$  – расчетное значение внутреннего и внешнего радиуса области в момент времени



а



б

Рис. 8. Результаты оптимизационного расчета: а – расчётная  $R-t$  диаграмма движения второй области в сравнении с экспериментальными данными, б – оценочная функция

$t = t_i$ ,  $i = 1, n$ ;  $n$  – количество точек в экспериментальных зависимостях  $R_1(t)$  и  $R_2(t)$ .

На рис. 8 представлены результаты оптимизационного расчета, проведенного по методике УП с использованием метода ВОХ: на рис. 8а приведены расчетные  $R-t$  диаграммы движения оболочки в сравнении с экспериментальными данными, на рис. 8б – поведение оценочной функции  $F$  в зависимости от номера расчета по методике УП. Оптимальная толщина СМД составила 0,579479 см ( $R^* = 10,5280521$ ), минимальное значение оценочной функции  $F = 0,001613268$ . Таким образом, задача оптимизации ширины слоя мгновенной детонации по экспериментальным данным движения границ оболочки решена с хорошей точностью.

### Заключение

В рамках данной работы приведено описание оптимизационной версии счетной методики УП и продемонстрированы примеры ее использования.

Оптимизационная версия счетной методики УП, безусловно, облегчит проведение методической отработки разрабатываемых газодинамических систем, моделей вещества, путем проведения разнообразных серий оптимизационных расчетов в автоматическом режиме.

### Литература

1. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И., Софронов В. Н. Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 1982. Вып. 3. С. 11–14.
2. Box M. T. New method of constrained optimization and comparison with other methods // The Computer Journal. 1965.
3. Adams B. M., Dalbey K. R., Eldred M. S., Gay D. M., Swiler L. P. DAKOTA, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis. Version 6.6 User's Manual. [Electronic resource] Mode of access: <http://www.cs.sandia.gov/Dakota>.
4. Десятникова М. А., Игнатова О. Н., Раевский В. А. Динамическая модель откольного разрушения в жидкостях и твердых телах // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Теоретическая и прикладная физика. 2016. Вып. 4. С. 46–54.
5. Breed B. R., Mader C. L., Venable D. Technique for the determination of dynamic-tensile-strength characteristics // Journal of Applied Physics. 1967. Vol. 38, N 8. P. 3271–3279.