

## Оптимизационен анализ на технико-експлоатационните характеристики на пенетраторен акселерометър за сеизмологични изследвания на планетата Марс

*Гаро Мардиросян, Дора Неделчева,  
Томас Здравев\**

*Институт за космически изследвания, БАН  
\* Лаборатория по слънчево-земни въздействия, БАН*

Както и при всички подобни изследвания, и тук експлоатационните възможности и характеристики на използваната апаратура определят в крайна сметка качеството на получените резултати и ефективното изпълнение на научната програма.

Предложените научни задачи за изследване на повърхността и вътрешния строеж на планетата Марс чрез пенетраторен акселерометър [1] могат да се формулират най-общо така:

1. Възстановяване на скоростта, геометричните и времевите параметри на траекторията при удара на пенетратора в грунта и проникването му в него. Получените данни позволяват определяне на профила на основните физико-механични параметри на марсианския грунт в дълбочина. Очаква се и решаване на чисто технически и технологични проблеми, свързани с усъвършенстване конструкцията на пенетратора и методиката на използването му.

2. Регистрация на вторичното сеизмично поле в близката зона, свързано с механичните нарушения в средата и релаксацията на топлинната аномалия. Получените данни служат за изучаване свойствата на средата.

3. Регистрация на микросеизми от естествен произход, както и на изкуствено създадени. Въз основа на получените данни се определят честотно-времените характеристики на средата като част от общата характеристика на повърхностния марсиански слой.

4. Регистрация на евентуални близки марсотресения вследствие на вътрешнопланетни причини и тектонски сили или от падане на по-големи метеорити, а също и от изкуствени източници на сеизмични вълни. Получените сведения служат за изучаване динамиката на планетата, за уточ-

няване границата между кората и мантията, за изясняване геоложката история на Марс и т. н.

Последната формулирана задача съвсем не е последна по значимост. Но за съжаление, имайки предвид повтаряемостта на марсианските макро-сейзмични събития, както и продължителността на „живота“ на пенетратора, вероятността от регистрация на естествени марсотресения е почти нулева. Остава обаче възможността от създаване на изкуствени марсотресения.

Естествено формулирането на тези научни задачи беше тясно обвързано с основните технико-експлоатационни характеристики и възможности, очертани от предварителната разработка на пенетраторния акселерометър [2]. От друга страна, оптимизирането на тези характеристики и параметри в процеса на по-нататъшната разработка гарантира качествено изпълнение на научната програма, както дава възможност и за допълването ѝ с цел получаване и на друга научна и технологична информация.

В [3] е описан подход за оптимизиране на експлоатационните характеристики на пенетраторния акселерометър. В същата работа са представени и получените първи ориентировъчни резултати за някои от основните експлоатационни характеристики на самия пенетратор: пътят  $H$ , който ще измине проникващата му част, дълбочината  $\dot{H}$ , до която ще достигне, и времето  $t$  за проникването. Това е направено въз основа на най-вероятните физико-механични свойства на грунта и някои конструктивни параметри на пенетратора.

Сега стойностите за  $H$ ,  $\dot{H}$  и  $t$  са прецизирани, като при моделирането са взети повече на брой и с по-представителен диапазон параметри на марсианския грунт, при това не само за реголит. Това са преди всичко коефициентът на триене  $\mu$ , обемното тегло  $\rho_0$ , ъгълът на вътрешно триене  $\theta$  и кохезията  $c$ . Някои фактори, за които нямаме представителни данни и чието влияние е слабо, са пренебрегнати.

За база на оптимизационния анализ са взети основните уравнения от теорията за проникване на твърдо тяло (в случая конусообразно с ъгъл при върха  $\beta=60^\circ$ ) в грунта [4]. Уравнението, описващо силата на реакцията по нормалата  $F$  и по тангентата  $Q$  по дадено сечение от проникващата част, е

$$(1) \quad F+Q=(1+\mu_0 \cot \beta) \int_0^H 2 \pi \operatorname{tg}^2 \beta (p-p_a) x dx,$$

а уравнението за движението на пенетратора с маса  $m$  е

$$(2) \quad m \ddot{H} = -(F+Q).$$

Съвместното решение на (1) и (2) дава линейното уравнение

$$(3) \quad y' + \varphi_1(H)y = \varphi_2(H).$$

При вече приети геометрия и конструкция на пенетратора коефициентите  $\varphi_1(H)$  и  $\varphi_2(H)$  зависят главно от параметрите на марсианския грунт и от статистичен коефициент  $b$ , получен от полинома, изразяващ апроксимационната формула на динамичната крива на свиване на грунта

$$(4) \quad p_* = 5,5 \cdot 10^4 (1-b)^4 + 4,7 \cdot 10^2 (1-b) + 3,$$

където  $p_*$  е налягането на съответния етап на проникване. В началния момент  $p_* = p_a + \rho_0 v_0^2 \operatorname{tg}^2 \beta$ , а в следващите е  $p_* = p_a + \rho_0 \dot{H} \operatorname{tg}^2 \beta$ . Решавайки постъпково чрез числен метод (4), определяме  $b$ , докато скоростта на проникване  $\dot{H}$  стане нула.

Този модел ни дава възможност, варирайки с най-вероятните комбинации между минималните, средните и максималните стойности на физико-механичните параметри на марсианския грунт [5], да определим проникването  $H$ , времето  $t$  за проникване и ударното съпротивление  $\dot{H}$ . Тук е взето предвид, че при малки отклонения спрямо нормалата в точката на падане ( $\alpha < \pm 20^\circ$ ) и при сравнително малки  $\dot{H}$  разликата между дълбочината на проникване  $\bar{H}$  и изминатия път  $H$  е пренебрежимо малка:  $\bar{H} \approx H$ .

В табл. 1 са дадени минималните, максималните и приетите средни стойности на физико-механичните параметри на марсианския грунт, използвани при изчисленията.

При моделирането на процеса особено голямо значение има скоростта на падане на пенетратора върху грунта, т. е. началната скорост на проникване  $v_0$ . На фиг. 1 е показана зависимостта  $H=f(v_0)$  при приети средни стойности за  $\mu$ ,  $\rho_0$ ,  $\theta$  и  $c$  и за три различни стойности на  $v_0$ .

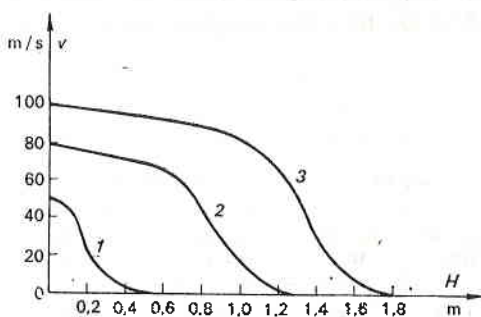
Зависимостта на времето на проникване  $t$  от началната скорост  $v_0$  при три различни гранични комбинации от стойности на  $\mu$ ,  $\rho_0$ ,  $\theta$  и  $c$  е показана на фиг. 2.

Ударното съпротивление, което ще понесе пенетраторът, съответно и апаратурата, монтирана в него,  $\dot{H}=f(H)$  за трите гранични комбинации от стойности на  $\mu$ ,  $\rho_0$ ,  $\theta$  и  $c$  и при  $v_0=80$  m/s, е показано на фиг. 3.

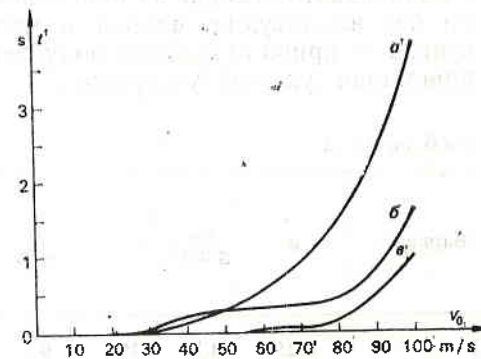
Очевидно е, че обект на анализа са технико-експлоатационни параметри, които са взаимно противоречиви. От една страна, проникването на по-голяма дълбочина  $H$  на пенетратора изисква по-голяма начална скорост на проникване  $v_0$ . Но тази по-голяма скорост обуславя по-голямо ударно

Таблица 1

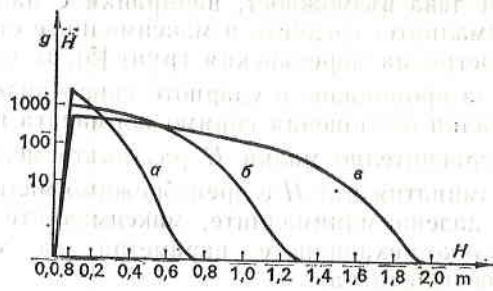
Параметър	Максимална стойност	Минимална стойност	Приета средна стойност
Коефициент на триене $\mu$	0,25	0,05	0,12
Плътност $\rho_0$ , g/cm <sup>3</sup>	1,8	1,0	1,5
Ъгъл на вътрешно триене $\theta$ , °	35	10	25
Кохезия $c$ , kPa	5	0,5	1,9



Фиг. 1. Графики на зависимостта  $H=f(v_0)$  при различни стойности на  $v_0$   
1 — 50 m/s; 2 — 80 m/s; 3 — 100 m/s



Фиг. 2. Графики на зависимостта  $t=f(v_0)$  при различни комбинации от гранични и средни стойности на  $\mu$ ,  $\rho_0$ ,  $\theta$  и  $c$   
a — минимални; b — средни; c — максимални



Фиг. 3. Графики на зависимостта  $\ddot{H}=f(H)$  при различни комбинации от гранични и средни стойности на  $\mu$ ,  $\rho_0$ ,  $\theta$  и  $c$   
*a* — максимални; *b* — средни; *c* — минимални  
 (ускорението е в относителни единици — *g*)

ускорение  $\ddot{H}$ , което пък се ограничава от удароустойчивостта на апаратурата. От друга страна обаче, по-силният удар ще предизвика генериране на сеизмични вълни с по-голям амплитуден диапазон, което ще даде възможност за по-ефективна амплитудна и честотна регистрация на отразените вълни. По-голямото време за проникване  $t$  пък гарантира регистрации с по-голяма разделителна способност по време на процеса на проникване.

От графиката на фиг. 1 (крива 2) се вижда, че при пристигане средни стойности на физико-механичните характеристики на марсианския грунт и  $v_0=80$  m/s проникването е от порядъка на  $H=1,2$  m. Това е достатъчно за цялостното потъване на пенетратора в грунта. При  $v_0=50$  m/s (крива 1) дълбочината също на практика е достатъчна, но само при средни стойности на  $\mu$ ,  $\rho_0$ ,  $\theta$  и  $c$ , докато при стойности над средните  $H$  е недостатъчна. От табл. 2 се вижда, че за по-малки  $v_0$ , например  $v_0=30$  m/s, в повечето случаи пенетраторът не би се забил достатъчно надълбоко, а най-вероятно е изобщо да не се забие. В такъв случай, от една страна, той остава под влияние на смущаващото действие на вятъра и носените от него частици, а от друга — не гарантира добър механичен контакт с грунта. А добрият механичен контакт с грунта на сеизмоприемника, в случая на пенетратора, е най-важното условие за приемането и регистрацията на сеизмичните вълни без амплитудни, фазови и честотни изкривявания. При  $v_0=100$  m/s (фиг. 1 — крива 3) също се получава добра  $H$ , но тази скорост води до неприемливи ударни ускорения.

Таблица 2

Вариант	$\mu$	$\rho_0$ , g/cm <sup>3</sup>	$\theta$ , °	$c$ , kPa	$H$ , m		$\ddot{H}$ , m/s <sup>2</sup>	
					$v_0=30$ m/s	$v_0=80$ m/s	$v_0=30$ m/s	$v_0=80$ m/s
I	0,25	1,8	10	0,5	1,07	1,58	$2,7 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^6$
II	0,05	1,0	35	5,0	0,55	0,88	$3,9 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^6$
III	0,05	1,0	10	5,0	0,35	1,36	$6,1 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^6$
IV	0,05	1,0	35	0,5	0,39	0,47	$7,2 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^6$
V	0,05	1,0	22	2,0	0,59	1,1	$3,9 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$
VI	0,12	1,5	25	1,9	0,35	1,0	$8,3 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^6$



Температурата на околната среда е много важен параметър, от който зависи правилното функциониране на апаратурата и особено на пиезоелектричния преобразувател на акселерометъра. Поради много малката топлопроводимост на повърхностния слой на Марс ( $1,6 \cdot 10^{-4}$  cal/grad. cm. s) достигащото до  $40^\circ\text{C}$  денонощно изменение на температурата влияе само на най-горния 4–5-сантиметров слой, а сезонното изменение — на не повече от 1 м. Следователно забит и работещ на  $H > 0,4 \div 0,6$  м, пенетраторът няма да бъде изложен на денонощните температурни разлики. Също така няма да бъде изложен и на сезонните температурни изменения, тъй като продължителността на „живота“ му е значително по-малка от продължителността на един марсиански сезон [6].

Времето за проникване  $t$  зависи сравнително силно от грунтовете условия. Докато отношението между съответните дълбочини  $H_{\text{min}}$  и  $H_{\text{max}}$  за двата гранични случая на грунтови условия е  $H_{\text{max}}/H_{\text{min}} \approx 2,5$ , то за  $t$  то е  $t_{\text{max}}/t_{\text{min}} \approx 4$ . Но едно средно време от порядъка  $t = 1 \div 2$  s би дало възможност за регистрация с една добра разделителна способност по време.

Най-противоречив и най-деликатен е въпросът с ударното ускорение  $\dot{H}$ . От фиг. 3 и табл. 2 се вижда силната зависимост и на  $\dot{H}$  от грунтовете условия. Вижда се още, че при максимални стойности на  $\mu$ ,  $\rho_0$ ,  $\theta$  и  $c$  най-неблагоприятната за случая освен недопустимото ускорение на границата на неприемливостта е дълбочината на проникване  $H$ . Разбира се, такава най-неблагоприятна комбинация, от всички грунтови параметри е малко вероятна. Тя се намалява още повече при увеличаване броя на пенетраторите на 2 или 3.

Основният извод, както и трябваше да се очаква, е, че освен очевидно силното влияние на началната скорост на проникване много голямо значение имат и физико-механичните характеристики на марсианския грунт върху основните експлоатационни характеристики на пенетраторния акселерометър. Именно непознаването на по-конкретни стойности на тези характеристики на грунта в мястото на пенетрация ограничава по-детайлното и по-прецизно моделиране на процеса. Ограничения идват и от все още неокончателните стойности на габаритно-масовите характеристики и от параметрите на орбитата на изкуствен спътник на Марс, от която ще бъде спуснат пенетраторът.

В заключение смятаме, че една начална скорост на проникване от порядъка на  $v_0 = 60$  m/s, обуславяща дълбочина на проникване от порядъка на  $H = 0,7$  м, време за това проникване от порядъка  $t = 0,8 \div 2,5$  s и ударно ускорение от порядъка 900 g, е приемлива база за по-нататъшното продължаване на разработката.

## Литература

1. Материали Международного совещания по проекту „Марс-94“. М., ИКИ АН СССР, февраль 1989.
2. Мардиросян, Г., В. Фрейд. Трехкомпонентный пенетраторный акселерометр для исследования Марса. — Аэрокосмически изследвания в България, 8, 1990, с. 39.
3. Margossian, G., D. Kolagov, V. Fremd, A. Gvozdev, L. Hudzinski. The Performance of a Penetrator Accelerometer for Mars Exploration — Approach and Initial Results. — In: XVIII Plenary Meeting — COSPAR, Hague, 1990.
4. Сагамонян, А. Проникание. М., Моск. университет, 1974.
5. Цытович, Н. Механика грунтов. М., Стройиздат, 1966.

6. М а р д и р о с я н, Г., Д. К о л а р о в, Д. И н д ж е в а, Д. Н е д е л ч е в а.  
Сравнителен анализ на експлоатационните възможности на апаратурен комплекс  
за изследване вътрешния строеж на планетата Марс с използване на марсо-  
ход и пентратор. — Докл. Втора национална конференция „Аерокосмос и  
екология“. Шумен, 1990.

Постъпила на 24. IX. 1991 г.

### Optimization technical and operation analysis of a penetrator accelerometer for seismological exploration of the planet Mars

*Garo Mardirossian, Dora Nedelcheva, Tomas  
Zdravev*

(S u m m a r y)

In some previous works of the authors the technical characteristics of a penetrating accelerometer obtained in the initial development phase have already been presented. Basic modes and operation algorithms of the penetrating accelerometer have also been proposed. However, a more detailed and concrete specification of the accelerometer operation characteristics calls for further study of the penetrator technical and operation characteristics.

In this work, the basic scientific problems of the Martian surface and inner structure exploration using a penetrating accelerometer are specified. Following the objectives of the proposed scientific program an optimization analysis has been conducted for determination of the accelerometer technical and operation characteristics, namely: sensitivity coefficient of the receiver-transducer unit; parameters of the electronic unit; modes, algorithms, etc. The results are based on the most important penetrator characteristics obtained by theoretical methods, such as: shock acceleration at contact with the Martian ground, depth of penetration and penetration period. The modelling is based on the penetrator's most probable values: mass, shock dynamics characteristics and ground physical and mechanical parameters.