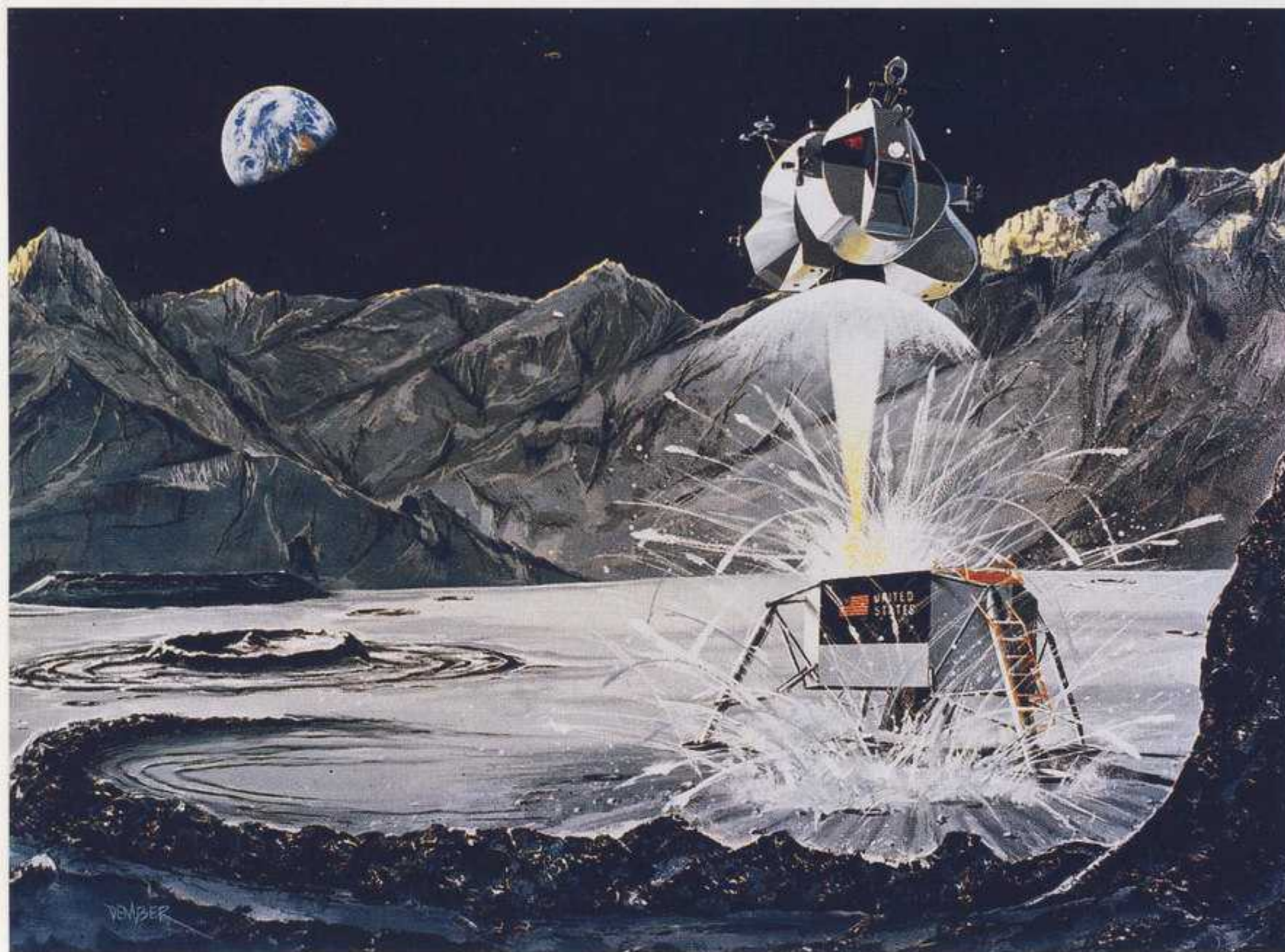


Výletní loď pro Měsíc

Před padesáti léty se dostal do vesmíru lunární modul



Lunární modul se stal ikonickou součástí programu Apollo

Lunární výsadkový modul byl velmi specifickou součástí programu Apollo. Když se lunární plány začaly rozjíždět, nikdo netušil, jak má podobné zařízení vypadat, jaké by mohlo mít parametry a vlastně ani to, zdali bude potřeba. Zatímco NASA začal řešit technologii raketových motorů, vlastních nosičů nebo lodí Apollo a podepisoval kontrakty s příslušnými dodavateli, u lunárního modulu stále váhal. Řešila se totiž otázka celkové koncepce přistání na Měsíci. Dlouho preferovaná technika tzv. přímého letu totiž s výsadkovým modulem nepočítala. Předpokládala přistání celého kompletu na Měsíci a odtud pak návrat na Zemi. Tedy bez rozdělování na mateřskou loď a výsadkový modul na lunární oběžné dráze, přistání samostatného modulu a jeho návrat k lodi. Přímý let má výhodu v tom, že odpadá náročné (a v té době nezvládnuté) setkání kosmických těles u Měsíce, jeho zásadní nevýhodou je ovšem vyšší hmotnost lodí. Pro jeho realizaci by bylo zapotřebí vyslat k Měsíci kolem 85 t, ve verzi s výsadkovým modulem ovšem stačilo zhruba 45 t. NASA se dlouho nemohl rozhodnout pro správnou koncepci, a tak když zvolil variantu s dedikovaným modulem, kontrakty na vývoj ostatních částí systému byly už přibližně rok zadány. Kritická komponenta tak vstupovala do soukolí programu s výrazným zpožděním.

Vítězi nejlehčí

V červenci 1962 oslovil NASA jedenáct firem, zdali by neměly zájem ucházet se o dodávku lunárního

modulu. Do uzávěrky v září reagovalo devět. Dne 7. listopadu 1962 bylo oznámeno, že kontrakt získává Grumman Aircraft.

V čem bylo kouzlo návrhu této firmy? V rámci interního výzkumu se už v padesátých letech zaobírala teoretickou podobou lehkého lunárního výsadkového plavidla a poslední dva roky před udělením kontraktu práce zintenzivnila. A dospěla k názoru, že z hledis-



Joseph Shea z NASA drží v ruce prvotní představu kosmické agentury o lunárním modulu, jenž byl zmenšenou lodí Apollo s podvozkem

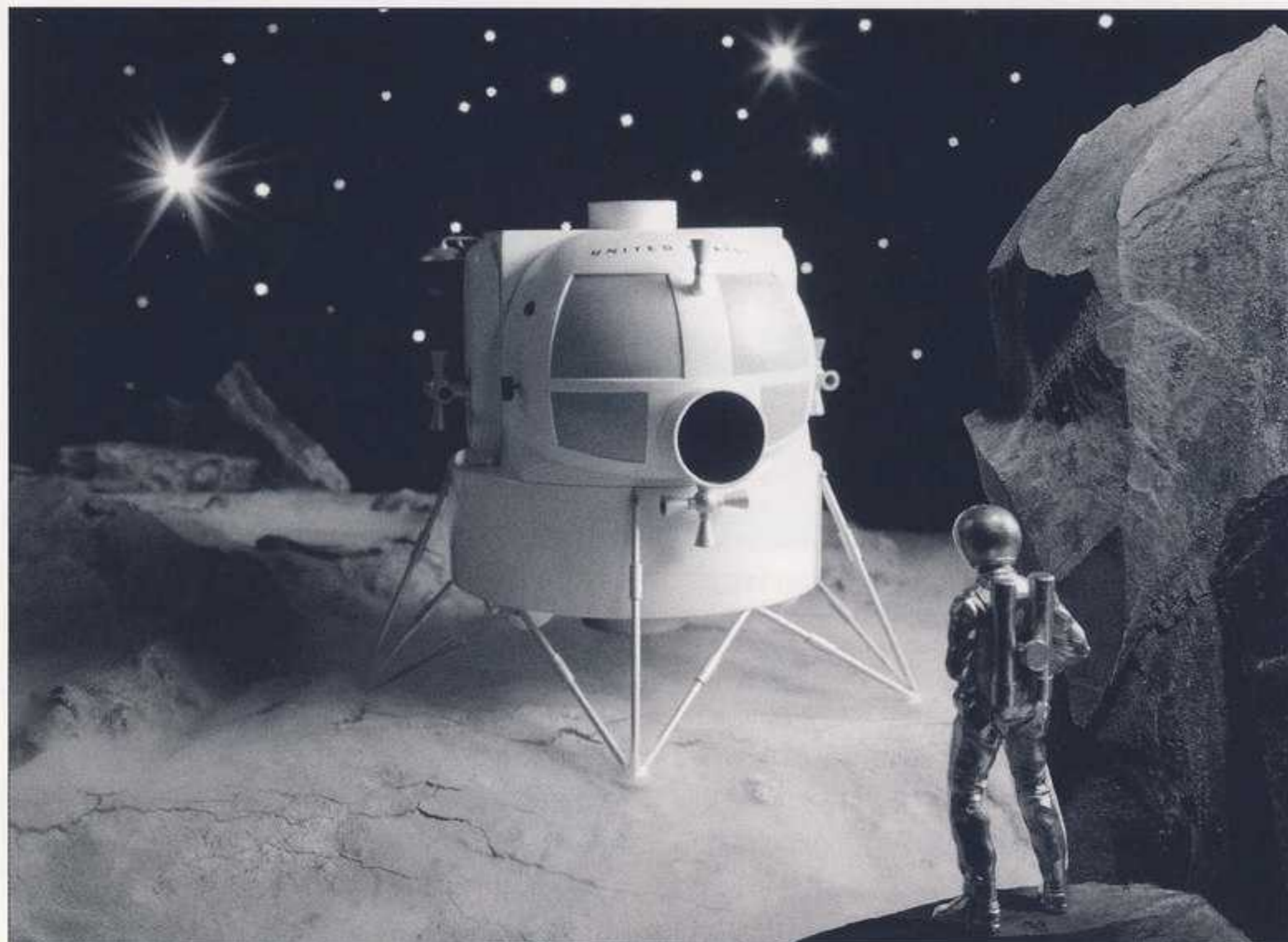
„Díky za legrační kosmickou loď. Rozhodně létá lépe, než vypadá.“ James McDivitt, velitel mise Apollo 9

ka hmotnosti bude nejlepším řešením dvoustupňový modul: jeden stupeň bude určen pro přistání a druhému stupni sloužícímu pro návrat na oběžnou dráhu zároveň poslouží jako odpalovací rampa. Všichni ostatní konkurenti vycházeli z jedноступňového referenčního lunárního modulu, který obvykle prezentoval NASA. Ten byl zobrazován coby menší loď Apollo: válcovitá servisní sekce pro přistání i start, nahoře kuželovitá loď á la Apollo a to celé vybaveno přistávacím podvozkem. Toto řešení sice bylo jednoduché, ale zároveň vycházelo hmotnostně nejhůře. Dvoustupňová koncepce byla bezkonkurenčně nejlehčí. Kontrakt s firmou Grumman za 350 milionů dolarů zněl na výrobu 15 operačních modulů, 10 testovacích označovaných jako LTA (LEM Test Article) a dvou simulátorů. Oficiální název zařízení zněl LEM (Lunar Excursion Module). V červnu 1966 došlo na popud PR oddělení NASA k jeho přejmenování na LM (Lunar Module). Slovíčko „Excursion“ totiž nemá jen význam „expediční“, ale též „zájezdový“ či „výletní“ a někoho napadlo, že označení modulu jako „výletního“ by mohlo celý program letu na Měsíc znevažovat.

Přistání na barové stoličce

Návrh firmy Grumman počítal s pěticí podvozkových vzpěr pro co nejvyšší stabilitu v neznámém terénu. Měl také dva stykací uzly: jeden nahoře, druhý vpředu (měl zároveň sloužit pro výstup na Měsíc). To proto, aby posádka LEM mohla být v případě setkávání s mateřskou lodí aktivní - astronauti měli mít na přední stykací uzel výborný výhled a mohli bezpečně dovést loď k setkání. Kokpit pak byl silně futuristický. Vyznačoval se nejen čtveřicí velkých oken, díky nimž měli mít astronauti výhled „jako z vrtulníku“, ale třeba i dvojicí sedadel na jedné noze (proto si rychle získaly přezdívku „barové stoličky“). Z typických znaků realizované verze pak neměl LEM žebřík: přímo před výstupním průlezem dokonce neměla být ani přistávací vzpěra. Astronauti měli na Měsíc sestupovat na laně s uzly a po něm se zase šplhat nahoru.

Firma Grumman ale rychle zjistila, že vítězný návrh má do použitelného opravdu daleko. Nikdo jí to nemůže mít za zlé - ani NASA nevěděl, jak se na Měsíc dostat. Až detailní analýzy a zkoušky jednotlivých systémů odhalovaly „kostlivce ve skříni“. Z projektu zmizela původní velkorysost a začal nekonečný boj o vtěsnání se do hmotnostních limitů. Nejprve to bylo jednoduché: zmizela rozměrná a těžká okna, barové stoličky taky. Astronauti tak během přistání i startu z Měsíce stáli: kvůli pohodlí



Koláž z počátku roku 1963 zachycuje podobu LEMu, s níž Grumman vyhrál konkurz NASA

a správné poloze byly na podlaze proužky suchého zipu, které jim dovolily zafixovat se „ve stoje“ už ve stavu beztíže. Zmizel druhý (přední) stykový uzel, při spojování s mateřskou lodí tak mohl lunární modul hrát jen pasivní roli. Jinak co se oken týká: oba astronauti získali malé trojúhelníkové, další pak bylo ve stropě LEMu - umožňovalo alespoň orientačně sledovat setkávací manévry.

Zmizela jedna z podvozkových noh a objevil se žebřík s devíti příčkami pro sestup na lunární povrch. Zkoušky na maketě v měřítku 1:1 ukázaly, že sestup a následný výstup po laně je silně nepraktický a fyzicky náročný.

Výzva jménem motor

Změny se dočkal i přistávací stupeň (Descent Stage). Původně měl kruhový půdorys a nesl šest nádrží na pohonné látky, nově získal přibližně osmiúhelníkový tvar a jen čtyři nádrže. Tím se sice ušetřila hmotnost (nádrže plus související potrubí a další přístroje), ale zároveň zhoršila stabilita.

Srdcem stupně byl výkyvně uložený motor: toto řešení dovolovalo reagovat na změnu těžiště při postupné spotřebě pohonných látek (těch bylo možné natankovat až 8200 kg, což představovalo přes polovinu hmotnosti celého modulu). Stabilitu a změnu orientace jinak zajišťovaly řídicí trysky na vzletovém stupni LEMu. Právě motor se stal skutečnou technikou a technologickou výzvou, protože měl mít v širokém rozpětí redukovatelný tah. Dosud nikdy nikdo nic podobného nedělal - všechny raketové motory znaly jen režim „plný výkon“.

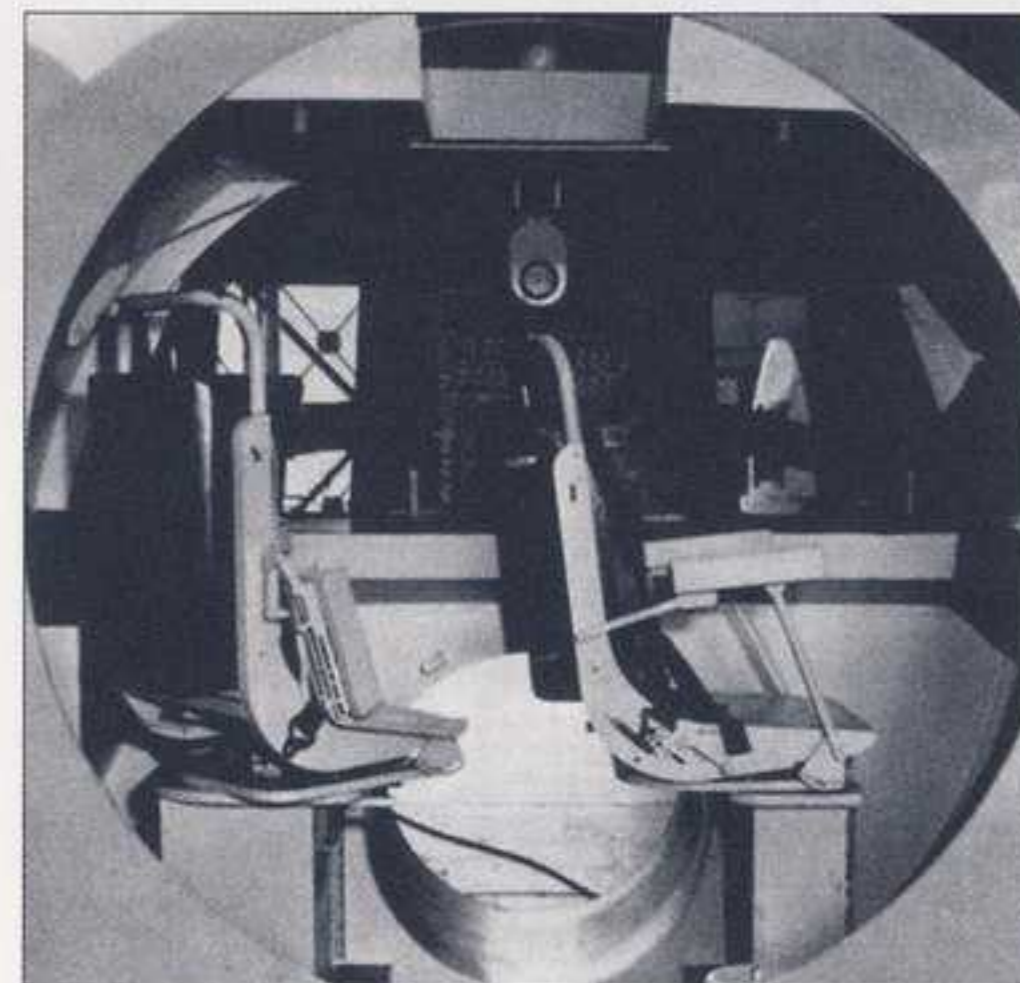
Na jeho vývoj proto Grumman v květnu 1963 najal dvě firmy, a to Rocketdyne Company a STL (Space Technology Laboratories). Regulaci tahu řešila prvně jmenovaná firma přidáváním hélia do spalovací komory, druhá pak regulačními ventily (podobně jako se sešlapuje plynový pedál u automobilu). Obě řešení měla výhody a nevýhody a dlouho nebylo jasné, které nakonec bude zvoleno. Grumman preferoval návrh od Rocketdyne, NASA se ale nakonec rozhodl pro motor od STL. Ta se také nakonec v lednu 1965 stala dodavatelem jednotky označované jako DPS

(Descent Propulsion System). Tah bylo možné redukovat od 4,7 kN do 45,04 kN. Používalo se pracovní rozmezí 10 až 65 a pak 92,5 až 100 procent tahu. To proto, že při hodnotách od 65 do 92,5 procent docházelo k nebezpečnému opotřebování trysky. Mimochodem, na ni byl jeden speciální požadavek: pokud by při přistání přišla do kontaktu s lunárním povrchem, musela se zdeformovat nebo rovnou prasknout. Jinými slovy nesměla být pevná tak, aby náraz přenesla na vlastní motor a potažmo na celý palivový systém. Důvodem bylo použití samozápalné pohonné směsi, která by při poškození potrubí mohla zahořet a způsobit katastrofu. Tato vlastnost

přišla vhod při letu Apollo 15, kdy ke kontaktu skutečně došlo. DPS vážil 179 kg, měl délku 230 cm a maximální průměr 150 cm.

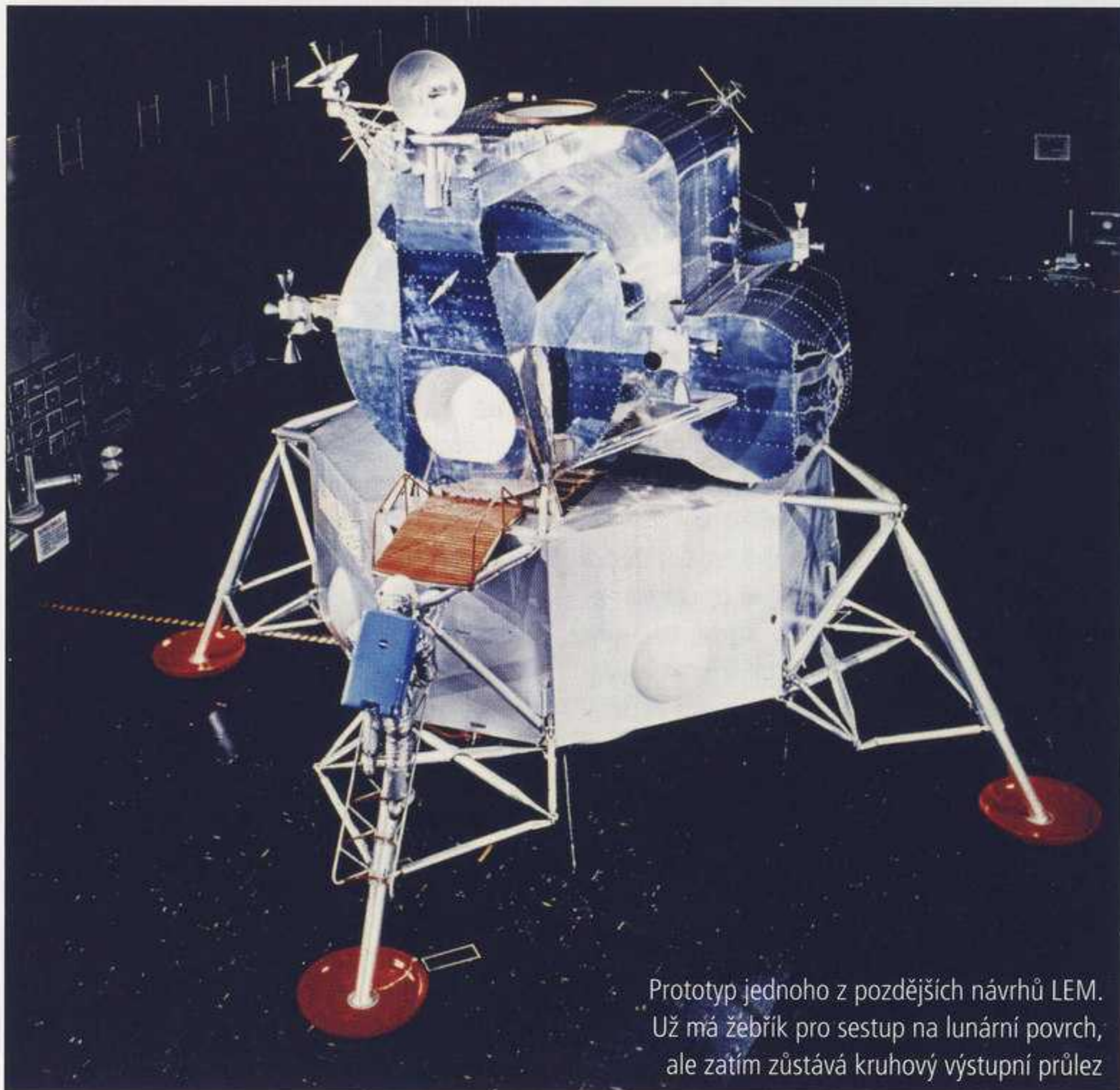
Pohonné hmoty tvořil oxid dusičitý a směs aerozine-50 (skládala se z 50 % asymetrického dimethylhydrazinu a 50 % monomethylhydrazinu). Ta byla extrémně toxická a extrémně korozivní. Díky tomu nebylo motor možné testovat bez nevratného poškození, takže premiérového zážehu se dočkal vždy až u Měsíce. Maximální důraz byl proto kladen na jednoduchost a spolehlivost. Motor proto neměl klasická turbočerpadla, ale pohonné látky se do něj přiváděly prostým přetlakem (vytvářeným héliem) z nádrží.

Podvozkové nohy nesly voštinové deformační zóny, které měly za úkol absorbovat energii dopadu: motor

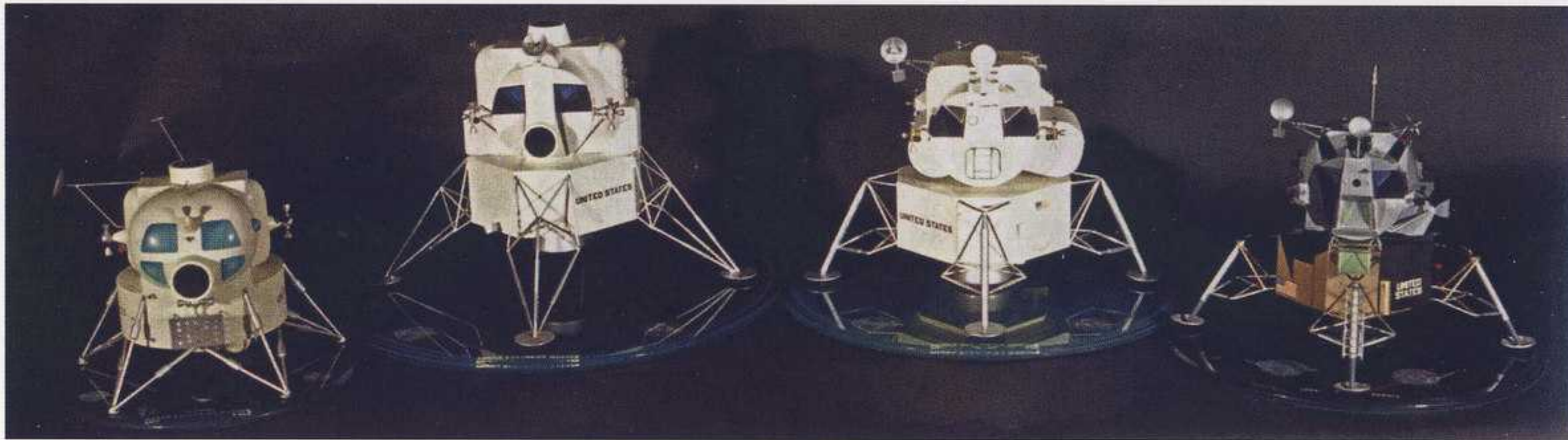


Původní návrh kabiny modulu počítal s velkými okny a křesly pro astronauty

DPS se vypínal po dotyku jedné ze tří kontaktních tyčí dlouhých 170 cm s povrchem. Z této výšky se tak snášel „volným pádem“. Tyče byly umístěny na podvozkových nohách - kromě přední se žebříkem, protože



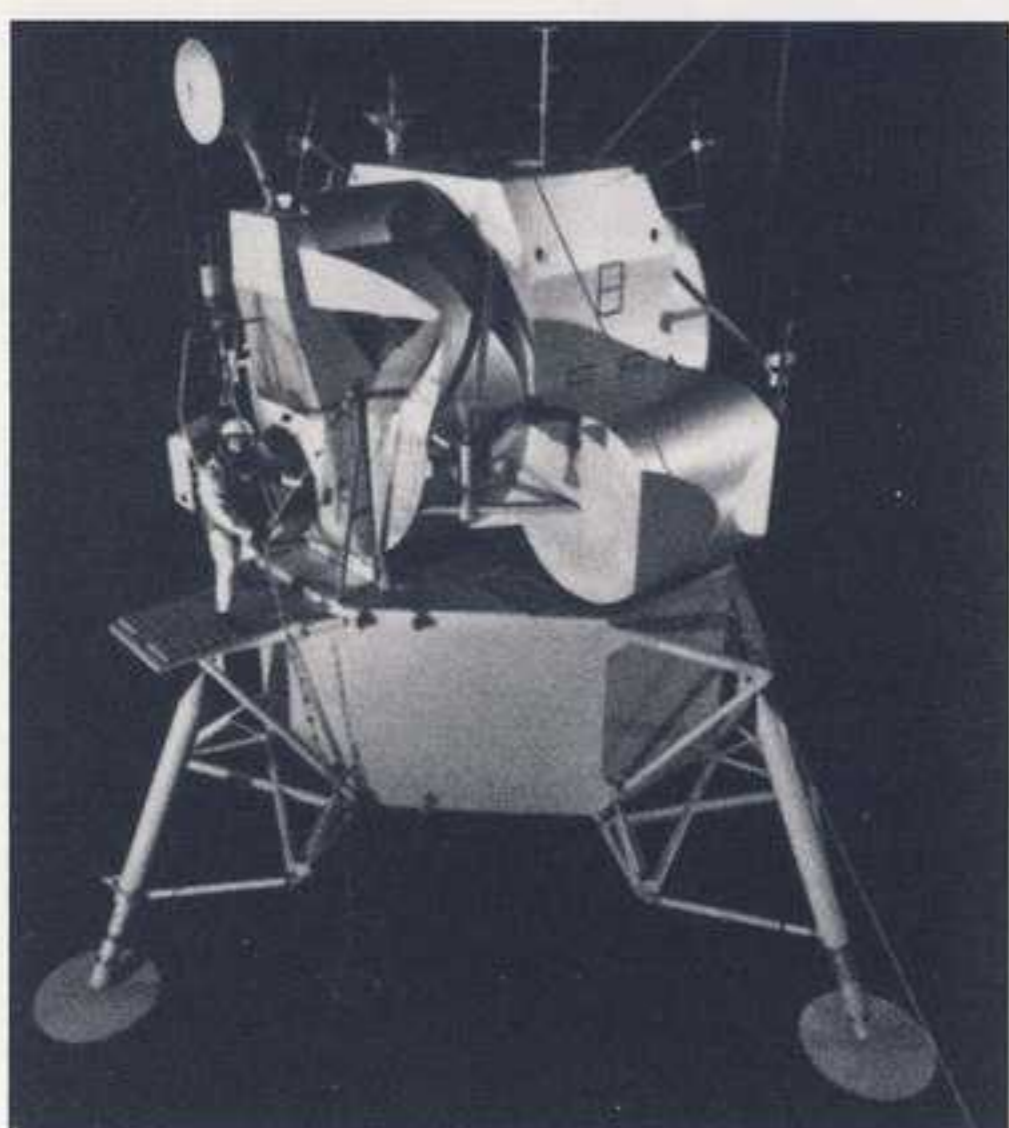
Prototyp jednoho z pozdějších návrhů LEM. Už má žebřík pro sestup na lunární povrch, ale zatím zůstává kruhový výstupní průlez



Postupná geneze podoby lunárního modulu od prvního návrhu (vlevo) až po nakonec realizovanou verzi

tyče se při přistání různě ohýbaly a panovala obava, že by mohly způsobit poškození skafandru vystupujících astronautů. Podvozek byl dimenzován tak, že lunární modul na Zemi neunesl, dokonce by jej neunesl ani plně natankován na Měsíci.

Tepelnou ochranu zajišťovalo 16 vrstev pozlacené mylarové hliníkové fólie, která tak LEMu umožnila typický zlatý vzhled. energii dodávaly (po dobu pobytu na Měsíci i vzletovému stupni) čtyři (u misi Apollo 15 až 17 jich bylo pět) stříbro-zinkové baterie, každá o hmotnosti 61 kg.



Technik firmy Grumman zavěšený na zařízení, které eliminuje pět šestin gravitace, zkouší sestoupit na „měsíční povrch“ na laně s uzly

Na Měsíc po čtyřech

Základní částí vzletového stupně (Ascent Stage) byla hermetizovaná kabina válcovitého tvaru: měla průměr 234 cm a délku 107 cm. Vzhledem k tomu, že přední a zadní dno válce nebylo úplně rovné (v přední části byla například dvě trojúhelníková okna a průlez pro výstup ven), činil objem hermetizovaného prostoru 6,7 metru krychlového, ale reálně využitelných bylo jen 4,5 m³. Zbytek zabíralo přístrojové vybavení jako třeba systém zajištění životních podmínek, komunikační vybavení a další elektronika. A i z využitelného prostoru „ukrajovalo“ vybavení, například v zadní části modulu umístěné police pro odkládání skafandrů (každý přitom vážil téměř 100 kg). Prostor tak byl opravdu stísněný a právě oblékání skafandrů vyžadovalo pečlivě vpracovanou choreografii. Hliníková konstrukce kabiny sice byla vyztužena příčkami, ale jinak ji tvořila hliníková fólie o síle 0,3 mm. Což je zhruba tolik, jako tři vrstvy kuchyňského alobalu.

Hermetizovaná kabina měla nahoře krátký „tunel“ zakončen stykovacím uzlem pro připojování k lodi Apollo. Druhý vstup byl umožněn skrze průlez čtvercového tvaru (90 krát 90 cm), který měl panty vpravo (při pohledu z modulu). Díky tomuto rozměru se museli astronauti z LEMu dostávat po čtyřech „couváním“. Nejprve přitom musel jít velitel na levé pozici. Při otevření průlezu (dovnitř) se totiž pilot lunárního modulu ocitl „přitlačen“ ke stěně. Ve stísněných prostorách modulu přitom nebyla šance, že by si oba astronauti v neforemných skafandrech prohodili místa. Až když vystoupil velitel, přivřel pilot lunárního modulu průlez, přesunul se na levou pozici, průlez opět otevřel a i on mohl na čtyři a vylézt na plošinku před vstupem do LEMu.

Až klaustrofobní prostory modulu neumožňovaly komfort ani při odpočinku. Při Apollu 11 v rámci povinného klidu si Neil Armstrong lehl k průlezu, na Buzze Aldrina pak zbyla pozice v zadní části modulu na válcovitém krytu motoru APS (Ascent Propulsion System). Na chvilkové odpočinutí možná dobré (nezapomínejme, že astronauti po celou dobu přistání, pobytu na Měsíci i startu jinak stáli), ale na kvalitní spánek rozhodně ne. Zvláště Aldrin byl v pozici jako by chtěl strávit noc na taburetu. Však také oba astronauti právě nekvalitní odpočinek po návratu na Zemi tvrdě zkritizovali. Řešení se nakonec našlo - počínaje Apollem 12 si astronauti vozili dvě hamaky. Ty v modulu zavěsili a v nich se pohodlně vyspali. Odpočinek ve snížené gravitaci a v houpačce síti si pak nemohli vynachválit.

Nejjednodušší motor

Již tak malý prostor hermetizované kabiny ještě zmenšoval zmíněný kryt motoru APS. I v tomto případě šlo o kritickou komponentu, která musela být maximálně spolehlivá: kdyby selhal motor přistávacího stupně DPS, ještě byla šance zažehnout právě APS a pokusit se o nouzový „start“ třeba i v nízké výšce nad Měsícem. Jenže selhání APS znamenalo v technické řeči „ztrátu mise a posádky“.

Motor vyráběla firma Bell Aerospace, přičemž na spolehlivost vsadila všechno. Eliminovala cokoli, co se jakkoliv mohlo pokazit: v motoru tak zůstaly jen čtyři absolutně nezbytné pohyblivé komponenty. Díky samozážehové pohonné hmotě odpadla potřeba zapalovače, plnění přetlakem z nádrží zase odstranilo potřebu turbočerpadel. Chlazení trysky bylo zajištěno ablativně, tedy postupným odpařováním. Což ale vedlo k tomu, že se během letu měnil její profil, a tedy i tah. Ovšem tato komplikace byla akceptována právě s ohledem na spolehlivost řešení.

Velkým problémem se ukázala nestabilita hoření ve spalovací komoře. Ať dělali inženýři Bellu co mohli, nepodařilo se jim tento problém zkrotit. Ještě na počátku roku 1967 se problém vyskytoval, takže NASA se rozhodl oslovit firmu Rocketdyne s žádostí o pomoc. Ta dodala novou vstřikovací hlavu pro rozptyl pohonných látek ve spalovací komoře a motor nakonec úspěšně prošel zkouškami. Dva první vyrobené moduly LM-1 a -2 ovšem měly kompletní motor od Bellu, vstřikovací hlavu od Rocketdyne našla uplatnění počínaje LM-3.

Pohonné látky (shodné jako u přistávacího stupně) byly uloženy ve dvou kulovitých nádržích vně hermetizované kabiny. Protože okysličovadlo bylo těžší než palivo, nacházela se jeho nádrž kvůli vyvážení modulu blíže kabině. Díky tomu získal LEM při pohledu zepředu svůj zvláštní asymetrický tvar.

Stabilitu a orientaci celého lunárního modulu i při sestupu zajišťovala soustava šestnácti trysek systému RCS (Reaction Control System), která byla na vzletovém stupni umístěna ve čtyřech kvadrantech. Používaly stejné pohonné hmoty jako DPS a APS, ale měly vlastní nádrže s maximální kapacitou 287 kg. Jinak motor APS měl zásobu až 2353 kg paliva a okysličovadla. Jeho prázdná hmotnost byla 2150 kg. Upozorňujeme, že jde pouze o orientační hodnoty, protože každý měl jinou hmotnost, a ta navíc s komplexností mise narůstala. Takže lunární modul Apolla 11 vážil při startu ze Země 15 102 kg, ale u Apolla 17 (včetně lunárního roveru) už to bylo 16 454 kg.



Samostatný přistávací stupeň lunárního modulu

Problém s nadváhou

Jestli je něco příznačného pro celý vývoj LEMu, pak neustálý boj s překračováním hmotnostních limitů. Původní „rozpočet“ na modul byl při zadávání kontraktu rovných 10 t. Už po několika měsících se ale ukázalo, že jde o nereálný požadavek. Proto byl v lednu 1963 zvýšen na 11,4 t, v lednu 1964 pak na 13,4 t. V listopadu 1964 už to bylo 14,5 t.

V lednu 1965 je evidentní, že ani toto nebude stačit. NASA neviní firmu Grumman, která dělá, co může - ostatně viz problémy při definování podoby modulu hned na počátku vývoje, kdy ani kosmická agentura vlastně netušila, cože přesně poptává. Situace se ale nějak řešit musí. V červenci 1965 proto přichází

ale nikoliv, protože šlo o samozážehové pohonné látky. A pokud by přišly do kontaktu mimo spalovací komoru motoru, znamenalo by to hodně velký problém. NASA proto rozhodl, že na premiérovém Saturnu V nepoletí „živý“ lunární modul, ale jen upravená zkušební verze LTA-10R.

V prosinci téhož roku postihl program nepříjemný incident. Během testů ve vakuové komoře se roztříštilo jedno z trojúhelníkových oken modulu LM-5 (ten později letěl na legendárním Apollu 11). Při předchozí zkoušce vydrželo větší námahe a najednou zcela bez varování prasklo. Co by to znamenalo pro posádku, kdyby k události došlo během kosmického letu, asi netřeba zdůrazňovat.

některých komponent a jejich odeslání k výrobci. Nakonec byly obě části 28. října spojeny definitivně a 19. listopadu putovaly na rampu k raketě Saturn IB AS-204. Po několika odkladech nakonec finální odpočítávání proběhlo 22. ledna 1968. Ovšem nikoliv bez problémů - start se uskutečnil s téměř čtyřhodinovým odkladem.

Příliš citlivý počítač

LM-1 měl hmotnost 14 301 kg. K primárním cílům mise patřilo oddělení obou jeho stupňů, dále monitorování funkce motorů a zjištění charakteristik chování struktury. Plán letu počítal se zážehem DPS, který by simuloval zahájení sestupu z lunární oběžné dráhy (obdoba brzdicího manévru u Země). Motor měl v rámci zkoušky pracovat v několika režimech. Pak měly následovat ještě čtyři zážehy, přičemž v okamžiku konce posledního mělo dojít k ověření manévru FITH (Fire In The Hole), tedy k okamžitému startu vzletového stupně. Simulovalo to případné nouzové odhození přistávacího stupně. Pak měla následovat ještě jedna zkouška APS, která dobou hoření a tahem motoru simulovala start z Měsíce.

První dva oblety Země proběhly podle plánu, zkoumaly se jen mechanické a tepelné vlastnosti modulu. Pro-



Vzletový stupeň lunárního modulu bez fólie tepelné ochrany při pohledu zepředu

NASA s nabídkou: firma Grumman dostane od nynějška bonus 25 tisíc dolarů za každou ušetřenou libru (0,45 kg) hmotnosti modulu.

Část této prémie firma vypisuje pro zaměstnance a ti se opravdu činí. Začíná „Operace škrábání“ (Operation Scrape), kdy je odlehčováno naprosto vše, co není na konstrukčním limitu. Chemickým obráběním je ztenčována spousta komponent, je odstraněn lak chránící před vlivy atmosféry z hliníkové konstrukce, je odřezován dokonce i přebytečný kov z jednotlivých šroubů. Výsledek? Ušetřených 2500 liber (1130 kg) hmotnosti. Stejně se modul tak-tak vešel do stanovených mantinelů.

Čekání na premiéru

Původně se počítalo, že by první vyrobený modul označený LM-1 letěl už na premiérové raketě Saturn V, která nakonec startovala v listopadu 1967 (viz L+K 11/2017, článek Král mezi raketami). Mělo tak jít o velkou zkoušku: od kompletní lunární rakety přes zatěžkávací test lodí Apollo až po samotný lunární modul. Jenže když byl 27. června 1967 LM-1 dodán do Kennedyho kosmického střediska, byly při přejímce odhaleny stovky závad. Nejnepříjemnější byly problémy s elektronickými systémy (lámající se dráty) a hlavně s palivovou soustavou (úniky pohonných látek). Právě úniky představovaly problém. Šlo sice jen o několik centimetrů krychlových za den, což by teoreticky bylo akceptovatelné. Prakticky

Jednotlivé střípky byly sesbírány kousek po kousku a následovalo důkladné vyšetřování. Ukázalo se, že během výroby sklo absorbovalo vlhkost. Když pak došlo k poklesu tlaku vně modulu ve vakuové komoře, voda ve skle se začala roztahovat. Až v inkriminované chvíli prasklo. Řešením problému bylo zpřísnění požadavků na výrobu oken a zvýšení kontroly kvality.

Konečně ve vesmíru

První test lunárního modulu představoval mimořádně obtížnou misi. Ke všem výše popsaným problémům se totiž přidal jeden detail: LM nebyl určen k letu bez posádky, všechny systémy vyžadovaly manuální ovládání. Jenže premiéra měla proběhnout v automatickém režimu, a tak bylo mnoho systémů nutné vyvinout speciálně jen pro tento let. Modul LM-1 navíc neměl podvozkové nohy, přistávací radar a jen část systému zajištění životních podmínek (bylo například bez systému propojení se skafandry). Ušetřená hmotnost byla nahrazena měřicími přístroji. Po incidentu s prasklým sklem LM-5 pak u něj byla okna narychlo nahrazena (to už se nacházel na rampě pod aerodynamickým krytem) hliníkovými panely.

V červnu 1967 dorazil LM-1 na Floridu, 11. července pak došlo ke spojení přistávacího a vzletového stupně. Kvůli velkému množství závad byly 16. srpna rozpojeny. Pak byly 7. září opět spojeny, ale jen na dvanáct dní. Následovalo rozpojení, demontáž



Příprava modulu LM-5, který v červenci 1969 uskutečnil první přistání na Měsíci (Apollo 11)

blémy začaly, když došlo k prvnímu zážehu DPS. Automatika jej vypnula po 4,17 s, protože zaregistrovala nižší tah a vyhodnotila jej jako anomálii. Viníkem byl nižší tlak v nádržích, který ale jinak byl v normě. Systém jen reagoval příliš citlivě. Tato mimořádná událost každopádně nabourala celou choreografii zkoušek. Ty jednak mohly probíhat jen v dosahu pozemních stanic. A jednak modul čerpal energii z baterií, které limitovaly misi maximální délkou 8 hodin.

Řídicí středisko se rozhodlo uskutečnit tedy jen tři namísto pěti zážehů DPS, na poslední okamžité navázal test FITH. Vzletový stupeň si ještě vyzkoušel simulovaný start z Měsíce a po vypotřebenosti všech pohonných látek se 7 hodin 52 minut 10 s po startu odmlčel.

Příště už s astronauty na palubě

Zkouška byla maximálně úspěšná. Přes problémy se podařilo všech hlavních cílů mise dosáhnout, takže bylo možné odvolat druhý test LM-2 chystaný na květen 1968. V LM-3 se pak v březnu 1969 při letu Apollo 9 proletěli první lidé. LM-2 už nebylo možné přebudovat na pilotovaný stroj, takže skončil jako muzejní exponát. Dnes je k vidění ve vstupní hale National Air and Space Museum ve Washingtonu D.C. ■