وقود الصواريخ

د. ناصر بن عبدالله الرشيد

وقود الصواريخ عبارة عن خليط من مواد كيميائية تولد عند احتراقها غازات كثيفة ذات ضغط ودرجة حرارة عاليين، يعملان على دفع الصاروخ. يتكون هذا الخليط ـ في العادة ـ من وقود ومؤكسد، حيث يشكل الوقود المادة التي تحترق عندما تمتزج مع الأكسجين. أما المؤكسد فهو عامل يطلق الأكسجين اللازم لحرق الوقود، ويطلق على نسبة المؤكسد إلى الوقود مصطلح نسبة الخليط (Mixture ratio).

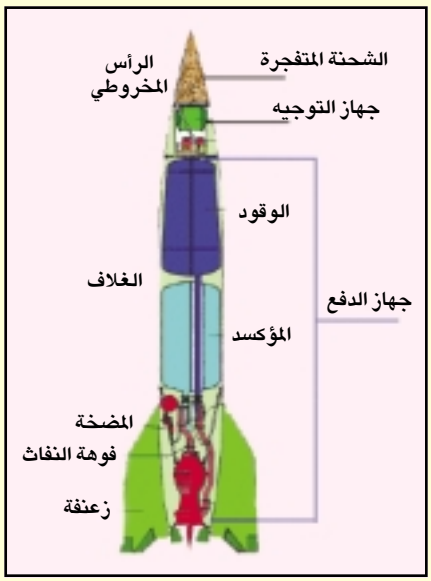
تقاس كفاءة الوقود الدافع للصواريخ (Propellant) بمقدار الدفع النوعي (Specific Impulse) والذي يدل على كمية الدفع ـ مقدَّرة بالكيلوجرام ـ الناتجة عن احتراق كيلوجرام واحد من الوقود في ثانية واحدة. ومع أن قوة الدفع النوعي تميز نوع الوقود الدافع إلا أن قيمتها الحقيقية تختلف ـ إلى حد ما ـ حسب طريقة التشغيل وتصميم محرك الصاروخ.

يعتقد العلماء أن الصينيين هم أول من اخترع الصواريخ، ولكن لا يعرف على وجه التحديد متى بدأ ذلك، حيث اقتصر استخدامهم لها على عروض الألعاب النارية، وكانت تستخدم مادة يطلق عليها الوقود الأسود الذي يتكون من فحم نباتي ونترات البوتاسيوم والكبريت.

طور الضابط البريطاني **وليم كونجروف** في بداية القرن التاسع عشر الميلادي صاروخاً يحمل متفجرات. ونظراً لوزنه الخفيف (٢٧كجم)، فإنه لم يحمل إلا كمية قليلة من الوقود، وبالتالي لم يستطع التحليق إلا إلى ارتفاع قليل(٢,٥كم)، وقد استعملت بريطانيا هذا الصاروخ في حربها مع الولايات المتحدة عام ١٨١٢م.

أصبح **روبرت جودارد** العالم الأمريكي مبتدع الصواريخ الحديثة عندما تمكن عام ١٩٢١م من إطلاق أول صاروخ له وقود دافع سائل إلى ارتفاع ٥٦ متراً، معتمداً على نظرية المدرس الروسي **كونستانتين تسيولكوفسكي** لحساب طاقة الصاروخ التي نشرها عام ١٩٠٣م، وقد تطورت الصواريخ وتنوعت أشكالها ووظائفها مع مرور الوقت بحسب الوقود المستخدم.

تتكون الصواريخ من عدد كبير من الأجزاء يوزعها مصممي ومحللي الصواريخ إلى أربعة أنظمة بحسب الوظائف التي تؤديها، وهي الهيكل، ونظام الشحنة المتفجرة للصاروخ ، ونظام التوجيه، ونظام الدفع، شكل (١). وتعمل الصواريخ بمحركات تنتج طاقة تزيد بعشرات المرات عن أي محرك آخر، حيث يستطيع الصاروخ أن ينتج طاقة تقدر بثلاثة آلاف ضعف طاقة محرك السيارة، ونظراً لأن الصاروخ يحرق الوقود بسرعة هائلة ـ أحرق الصاروخ ساتورن أكثر من ٢١٢٠ ألف لتر من الوقود خلال ٢,٧٥دقيقة من انطلاقته، فإنه يجب أن يزود بكميات كبيرة من الوقود.



● شكل (١) أجزاء الصاروخ.

تولد الصواريخ دفعاً هائلاً نتيجة لاحتراق الكميات الضخمة من الوقود، فيعمل ذلك على تحريكها بعكس اتجاه اندفاع نواتج الاحتراق المنطلقة من الفتحة الخلفية للصاروخ ـ فوهة النفاث (Nozzle) ـ بحسب قانون **نيوتن** الثالث للحركة الذي ينص على: «أن لكل فعل رد فعل مساوٍ له في المقدار ومعاكس له في الاتجاه».

آلية عمل وقود الصواريخ

يحرق الصاروخ وقوداً خاصاً في حجرة الاحتراق فينتج غازاً يتمدد بسرعة. يضغط هذا الغاز داخل حجرة الاحتراق بالتساوي في كل الاتجاهات، فيخرج الغاز من مؤخرة الصاروخ من خلال فوهة النفاث، فيختل الضغط؛ لأن ضغط الغاز المندفع من الفوهة لا يعادل الضغط على مقدمة الصاروخ، فيعمل هذا الضغط غير المتساوي على دفع الصاروخ إلى الأمام.

تولد الصواريخ دفعاً قوياً عن طريق تحويل الوقود الدافع (Propellants) إلى غازات ساخنة جداً تندفع بسرعة عالية من خلال فوهة النفاث، فتؤدي إلى انطلاق الصاروخ في الفضاء. تقاس قوة الدفع الناتج بحاصل ضرب معدل الدفع الكتلي (Mass flow rate) للوقود الدافع مع سرعة انفلات غازات العادم(Exhaust velocity)

كما حددها قانون نيوتن الثالث للحركة، أي أن:
قوة الدفع = معدل الدفع الكتلي× سرعة الغازات

ينطلق الصاروخ إلى الأعلى بفعل اندفاع الغازات الناتجة عن احتراق الوقود في حجرة الاحتراق من فوهة النفاث الخلفية، وكلما ارتفع الصاروخ زاد تسارعه بسبب ضعف أو انعدام مقاومة الهواء، وضعف الضغط الجوي على الفتحة الخارجية لفتحة النفاث، وبالتالي فإن الصاروخ يكتسب سرعته القصوى عند غياب القوى الخارجية المؤثرة عليه بفعل النسبة الكتلية وسرعة انفلات الغازات من فوهة النفاث.

أنواع وقود الصواريخ

يوجد عدة أنواع من الوقود الدافع للصواريخ (Propellants)، منها ما يلي:-

● الوقود الصلب

يتكون الوقود الصلب من مادة بلاستيكية أو مطاطية تسمى الحبوب (Grains)، والتي تتكون بدورها من الوقود والمؤكسد في الحالة الصلبة. ومن الجدير بالذكر أن الوقود والمؤكسد في الوقود الصلب لا يشتعلان إذا تلامساً مع بعضهما البعض ـ كما في الأنواع الأخرى من الوقود الدافع ـ إذ لا بد من وجود مادة إشعال. ويتم ذلك إما بإحراق كمية صغيرة من المسحوق الأسود (خليط من نترات البوتاسيوم والفحم النباتي والكبريت)، أو بالتفاعل الكيميائي عن طريق رش الوقود الصلب بمركب كلور سائل.

بقي الوقود الصلب على ما هو عليه منذ أن استخدمه الصينيون منذ مئات السنين في عروض الألعاب النارية والأسلحة، ولم تتقدم تقنية لوقود الدافع للصواريخ إلا بنهاية القرن التاسع عشر عندما تم استخدام مسحوق عديم الدخان استخدم بشكل أساس في الأسلحة النارية والمدفعية.

طورت الولايات المتحدة خلال الخمسينيات والستينيات من القرن الماضي ما يعرف بوقود الصواريخ الصلب النموذجي، وهو عبارة عن خليط مكون من مسحوق بركلورات الأمونيوم (Amonium Perchlorate) كمؤكسد مخلوطاً مع مسحوق الألمنيوم (كوقود) مثبتة مع بعضها البعض على قاعدة من أكريلو النيتريل عديد البولي تادائين (Polybutadien Acrylonitrile-PBAN) يُشْكَلّ هذا الوقود على هيئة سائل ثم يصب في أشكال مناسبة، فيتخثر إلى مادة صلبة تشبه المطاط.

*** مميزات وعيوب وقود الدفع الصلب:**
وهي كما يلي:-

ـ المميزات: ومن أهمها ما يلي:-

١ـ يعد الأسهل في الاستخدام والتخزين من وقود صواريخ الدفع السائل، مما يجعله نموذجياً في الاستخدامات الحربية، ولذا فقد قامت الولايات المتحدة في السبعينات والثمانينات من القرن الماضي بتحويل كل صواريخها إلى الوقود الصلب. أما روسيا فقد طورت في الثمانينات والتسعينات وقوداً دافعاً صلباً للصواريخ عابرة القارات، ولكنها أبقت على استخدام الصواريخ ذات الوقود الدافع الغازي.

٢ـ يتميز بالبساطة وسهولة الاستخدام في الصواريخ متعددة المراحل، لذلك فإن جميع الصواريخ عابرة القارات الروسية والأمريكية التي تعمل بالوقود الصلب لها ثلاث مراحل.

٣ـ يتميز بقوة الدفع وقلة التكاليف مما جعله الخيار الأنسب حينما تكون هناك حاجة إلى قوة دفع شديدة وتوفير في التكاليف، ولهذا السبب يستخدم العلماء لإطلاق مكوك الفضاء وكثير من عربات القذف المدارية البعيدة صواريخ ذات وقود دفع صلب في مراحلها الأولى.

ـ العيوب: وهي كما يلي:-

١ـ يمتلك الوقود الدافع الصلب قوة دفع نوعية (Specific Impulse) أقل من الوقود الدافع السائل، كما أنه من الصعب بناء صواريخ تعمل بالوقود الصلب ذات نسبة كتلية (Mass Ratio) كبيرة ـ نسبة كتلة الصاروخ ومحتوياته من المعدات والوقود الدافع إلى كتلة الصاروخ ومعداته بدون الوقود الدافع ـ لأن معظم هيكل الصاروخ يتكون من حجرة الاحتراق التي يجب أن تبنى بشكل يتحمل ويقاوم الضغط الهائل الذي يقع عليها نتيجة لاحتراق الوقود.

٢ـ صعوبة إيقاف الصاروخ بعد تشغيله إلا بعد أن يستهلك جميع الوقود.

٣ـ وجوب إخراج حبيبات الوقود المحترقة لخفض الضغط في حجرة الاحتراق.

٤ـ يؤدي وجود الشوائب في حبيبات الوقود إلى انفجارات أثناء الاحتراق، التي يمكن أن تزيد من سرعة احتراق الوقود بشكل كاف لزيادة ضغط الانطلاق إلا أنها قد تؤدي إلى فصل حجرة الاحتراق عن الصاروخ وتسقط قبل إكمال المهمة.

● وقود صلب.

● الوقود السائل

يتكون الوقود السائل من خليط من الوقود والمؤكسد كل منهما على شكل سائل. تحمل الصواريخ كل من الوقود والمؤكسد في خزان مستقل. تنقل شبكة من الأنابيب والصمامات والمضخات عنصري الوقود إلى حجرة الاحتراق، ولزيادة كفاءة الوقود فإنه يجب أن يمر كل من الوقود والمؤكسد حول محيط حجرة الاحتراق قبل مزجهما، وذلك لتبريد حجرة الاحتراق وتسخين عنصري الوقود لتهيئتهما للاشتعال.

اقترح معظم منظري صناعة الصواريخ السابقين: الأكسجين السائل والهيدروجين كوقود دفع للصواريخ، ويعد العالم **روبرت جودارد** هو أول من استخدم الصواريخ ذات الوقود السائل، ـ في ١٦ مارس ١٩٢٦م ـ حيث استخدم الجازولين والأكسجين السائل. أما الهيدروجين السائل فقد استخدم لأول مرة بواسطة شركة لوكهيد كوقود للطائرات في منتصف الخمسينات من القرن الماضي.

وجد أن أعلى قوة دفع للوقود في محرك الصواريخ ـ اختبرت حتى الآن ـ هي القوة الناتجة عن احتراق الوقود المكون من الليثيوم والفلور مع إضافة الهيدروجين لتحسين عوادم الحركية الحرارية (Thermodynamics exhaust).

*** أنواع الوقود السائل:** وتصنف وفقاً لوكالة الفضاء الأمريكية، وفي صواريخ الإطلاق التجارية إلى مايلي:-

● خزانات وقود سائل.

١ـ الوقود النفطي: وهو عبارة عن خليط من المواد الهيدروكربونية المعقدة (مركبات عضوية تتكون فقط من الكربون والهيدروجين) يستخرج من النفط الخام. حيث يستخدم ـ عادة ـ نوع من الكيروسين عالي النقاوة يعرف في الولايات المتحدة بـ (RP-1) مع الأكسجين السائل كمؤكسد.

صدرت مواصفات هذا النوع من الوقود لأول مرة في الولايات المتحدة عام ١٩٥٧م عندما دعت الحاجة إلى وجود وقود صواريخ نفطي نظيف، ويعد هذا الخليط من الوقود الدافع الأكثر فعالية لأجهزة الإطلاق للأغراض المدنية، ومع هذه المواصفات الجديدة فإن آلات حرق الكيروسين لا زالت تنتج مخلفات تؤدي إلى التقليل من العمر الافتراضي للآلة.

تم استخدام هذا النوع من الوقود الدافع في الصواريخ التي تحمل محطات استقبال وإرسال الموجات الإذاعية الروسية والصينية إلى المدارات القريبة، وكذلك في المرحلة الأولى من الصاروخ ساتيرن، و ساتيرن ـ١ب ٥ . وتشبه هذه الصواريخ ـ إلى حد كبير ـ الصاروخ الأول **لروبرت جودارد**. كما استخدم في المرحلة الأولى لصواريخ أطلس ودلتا ـ٢ لإطلاق المركبات.

من سلبيات وقود الكيروسين أنه يعطي كمية دفع نوعي أقل من الوقود المنخفض الحرارة (Cryogenic)، ولكنه في معظم الأحوال أحسن من الوقود تلقائي الاشتعال (Hypergolic).

٢ـ وقود منخفض درجة الحرارة: وهو عبارة عن غاز مسال يحفظ تحت درجة حرارة منخفضة جداً، ويتكون عادة من هيدروجين مسال كوقود، وأكسجين مسال كمؤكسد. يحفظ الهيدروجين عند درجة حرارة –٢٣٥م، أما الأكسجين فيحفظ عند درجة حرارة –١٨٣م.

يمثل انخفاض درجة حرارة هذا النوع من وقود الدفع الصاروخي صعوبة في تخزينها لفترة طويلة، ولهذا السبب فإنها قليلة الاستخدام في الصواريخ العسكرية؛ لأن الصواريخ العسكرية يجب أن تبقى لعدة شهور جاهزة للإطلاق. كما أن من عيوبه كثافته المنخفضة، مما يجعله يحتاج إلى حيز تخزين أكبر بعدة أضعاف من حجم الحيز اللازم لأنواع الوقود الأخرى. وبالرغم من هذه المعوقات والسلبيات إلا أن كفاءة الأكسجين المسال والهيدروجين المسال كوقود للصواريخ تجعل من الممكن التغاضي عن تلك المعوقات، خصوصاً إذا كان وقت التفاعل (Reaction time) وقابلية التخزين ليست ضرورية. كما أن الوقود السائل يعطي دفعاً نوعياً يزيد عن أنواع الوقود الأخرى بنسبة تتراوح ما بين ٣٠ إلى ٤٠٪.

يستخدم الأكسجين السائل والهيدروجين السائل كوقود في المحركات الرئيسية ذات الكفاءة العالية لمكوك الفضاء، كما تم استخدامها في المراحل العليا من صواريخ ساتيرن–٥ وساتيرن ١ب، وسنتور، وفي مكوك الفضاء، وفي المراحل العليا من صواريخ السنتور (Centaur)، وفي الصاروخ الأحدث من طراز دلتا– ٤ (Delta-IV)، وفي معظم المراحل للصاروخ الأوربي من طراز أريان (Ariane).

اقترحت وكالة الفضاء الأمريكية في الرحلات المستقبلية إلى كوكب المريخ استخدام

● صاروخ أريان.

الميثان المسال عند درجة حرارة –١٦٢م كوقود لأنه يمكن تصنيعه جزئياً من ثاني أكسيد الكربون المتوفر في جو المريخ.

من جانب آخر تم تطوير آلات احتراق تستخدم الفلور المسال (عند درجة حرارة –١٨٨م). ومع أن الفلور سام بدرجة شديدة إلا أنه مؤكسد فعال بدرجة عالية ـ يتفاعل بشدة مع كل شيء ما عدا النيتروجين والغازات النبيلة الخفيفة والمواد المفلورة ـ وأداؤه عال جداً، كما يمكن خلطه مع الأكسجين لتحسين أداء محركات حرق الأكسجين السائل، ولذا يطلق عليه الأكسجين السائل الفلوريني (FLOX). ويعد الفلور خياراً جيداً لرحلات الفضاء البعيدة في المستقبل.

٣ـ الوقود تلقائي الاشتعال (Hypergolic): ويتكون من الوقود والمؤكسد اللذين يشتعلان تلقائياً بمجرد تلامسهما مع بعضهما البعض. وقد جعلت إمكانية إشعال وإيقاف الإشعال لهذا النوع من الوقود مثالياً لسفن الفضاء. ونظراً لأن الوقود تلقائي الاشتعال يبقى في حالته السائلة عند درجات الحرارة الاعتيادية، فإنه لا يحتاج إلى ظروف تخزين معينة، كما هو الحال في الوقود منخفض درجات الحرارة. إلا أن من عيوبه سميته الشديدة، ولذلك يجب الحذر الشديد عند تداوله.

يشمل الوقود تلقائي الاشتعال كلا من:ـ

ـ الهيدرازين: ويتمتع بكفاءة عالية كوقود للصواريخ، ولكن له درجة تجمد عالية وغير مستقر للاستعمال كمبرد.

ـ أحادي ميثيل الهيدرازين: ويعد أكثر ثباتية ويعطي أداءً أفضل حينما لا تكون درجة التجمد ذات اعتبار، كما أنه يستخدم كوقود دفع نفثي في سفن الفضاء.

ـ ثنائي ميثيل الهيدرازين غير المتماثل: ويتميز بأنه الأقل في نقطة التجمد وثباتية حرارية تمكنه من الاستخدام في عدد كبير من محركات التبريد التجديدية. ونتيجة لذلك يستخدم ثنائي ميثيل الهيدرازين غير المتماثل في إطلاق المقذوفات بالرغم من أنه الأقل كفاءة من بين مشتقات الهيدرازين. كما يستخدم بشكل عام في الوقود المخلوط (Blended fuels)، مثل الآيروزاين المكون من ٥٠٪ من ثنائي ميثيل الهيدرازين غير المتماثل و ٥٠٪ من الهيدرازين، والذي يتميز بثباتية تماثل ثباتية ثنائي ميثيل الهيدرازين غير المتماثل وأداء أفضل.

يتكون المؤكسد للوقود تلقائي الاشتعال بأنواعه المذكورة ـ عادة ـ من رباعي أكسيد النيتروجين أو حمض النيتريك، حيث يتميز رباعي أكسيد النيتروجين بأنه أقل تآكلاً من الحمض وأفضل أداءً منه، ولكنه يتمتع بنقطة تجمد عالية، ولذلك يفضل رباعي أكسيد النتروجين كمؤكسد حينما تكون نقطة التجمد ليست ذات تأثير.

يستخدم رباعي أكسيد النيتروجين والهيدرازين في الأغراض العسكرية، وفي صواريخ المدارات البعيدة، حيث إن كلاً من السائلين يمكن تخزينهما لفترة طويلة وعند درجة حرارة وضغط مناسبين، وبما أن هذا الخليط ذاتي الاشتعال فإنه يسهل تسلسل عملية الاشتعال، ولكن من أهم الأشياء غير المرغوبة في هذا النوع من الوقود سميتها العالية، مما يجعل تداولها يتطلب عناية فائقة وحذر شديد. ومن الجدير بالذكر أن الهيدرازين يمكن أن يتفكك بشكل فعال إلى نيتروجين وهيدروجين مكوناً وقود دفع أحادي جيد.

استخدمت الصواريخ من عائلة تيتان التي تقوم بإطلاق المركبات الفضائية، والطور الثاني من صواريخ دلتا–٢ وقوداً دافعاً مكوناً من رباعي أكسيد النيتروجين والآيروزاين ٥٠ . أما رباعي أكسيد النيتروجين مع أحادي ميثيل الهيدرازين فقد استخدما في أنظمة المناورة المدارية (Orbital maneuvering system) ونظام السيطرة على ردة الفعل للمكوك الفضائي.

٤ـ أنواع أخرى: ومنها نوعين فقط تستحق الذكر، هما:ـ

١ـ **الكحول**: وقد استخدم كوقود خلال السنوات الأولى من تصنيع الصواريخ، حيث استخدم الصاروخ الحربي الألماني (V-2)، والصاروخ الأمريكي (Redstone): الأكسجين السائل وكحول الإيثانول مع تخفيفهما بالماء لخفض درجة حرارة حجرة الاحتراق، ولكن مع اكتشاف أنواع الوقود الجديدة أصبح الكحول خارج دائرة الاستخدام.

٢ـ **بيروكسيد الهيدروجين**: وقد اكتسب عناية واهتمام خاص كمؤكسد، ولذا استخدم في صواريخ السهم الأسود البريطانية. يطلق على بيروكسيد الهيدروجين اسم: "البيروكسيد عالي المعيار" (High test peroxide-HTP) إذا كانت نسبة تركيزه عالية، وهو يتكسر في وجود المحفز إلى أكسجين وبخار ماء عالي الحرارة.

تقترب كثافة وأداء (HTP) من كثافة وأداء حمض النيتريك، إلا أنها إلى حد بعيد أقل منها في السمية والتآكل. ومع أن بيروكسيد الهيدروجين يتصف بنقطة تجمد متدنية وغير مستقر ـ إضافة إلى أنه لم يستخدم كمؤكسد مع وقود دافع مزدوج ـ إلا أنه يستخدم بشكل واسع مع الوقود الدافع الأحادي.

*** مميزات الوقود السائل**، ومنها ما يلي:

١ـ يتميز بدفع نوعي(Specific Impulse) أفضل من صواريخ الوقود الصلب، كما أنه قابل للإيقاف وإعادة التشغيل بعكس صواريخ الوقود الصلب التي لا يمكن إيقافها بعد بدء التشغيل.

٢ـ يتميز بكسر كتلي(Mass Fraction) عالي؛ ولهذا فإن معظم الصواريخ المرسلة إلى المدارات الخارجية وجميع الصواريخ عابرات القارات من الجيل الأول والثاني: تستخدم الوقود السائل.

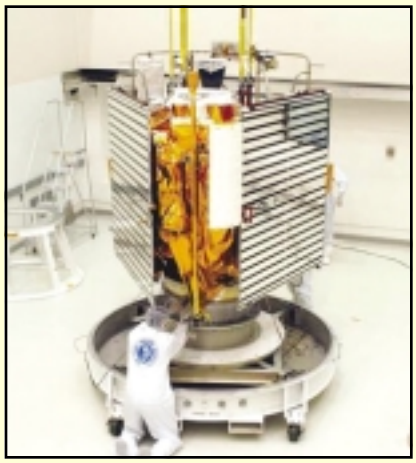
٣ـ وجود العديد من المؤكسدات السائلة ذات الكفاءة العالية: (الأكسجين السائل، أو رباعي أكسيد النيتروجين، أو بيروكسيد الهيدروجين) والتي تتميز بأنها أفضل من حيث قوة الدفع النوعي من بيركلورات النشادر عندما يضاف كل منها إلى كميات مقارنة من الوقود.

٤ـ قلة تكلفتها المادية مقارنة بوقود الدفع الصلب، ولكن تكلفة وقود الصواريخ بشكل عام سواءً الصلب أو السائل لا تشكل شيئاً بالنسبة لتكلفة الصاروخ نفسه.

*** عيوب الوقود السائل**: من أهم المشكلات التي تواجه استخدام وقود الدفع السائل للصواريخ هي:ـ

١ـ صعوبة تخزين وتداول المؤكسدات بسبب سميتها العالية، مثل حمض النيتريك، أو بسبب برودتها الشديدة مثل الأكسجين المسال، أو لكليهما مثل: الفلورين المسال. كما أن العديد من المؤكسدات الغريبة المقترحة مثل الأوزون المسال، وثلاثي فلوريد الكلور، وخماسي فلوريد الكلور يعاب عليها أنها غير مستقرة ونشطة وسامة.

٢ـ تتطلب صواريخ الوقود السائل أنظمة معقد ذات قدرة تحمل عالية، ولتكيف



● تعبئة سفينة الفضاء بالوقود تلقائي الاشتعال.

الضغط، والتمديدات وغرف الاحتراق؛ مما يزيد بشكل واضح من تكلفة الصواريخ. وتستخدم كثير من الصواريخ المضخات التوربينية والتي ترفع من التكلفة بشكل كبير.

٣ـ يجب أن تكون غرفة الاحتراق في صواريخ الوقود السائل: مقاومة لضغط وحرارة الاحتراق، كما يجب أن تجهز المركبات التي تستخدم العنفات التوربينية بخزانات للوقود السائل مصنوعة من مواد خفيفة.

٤ـ يعاب على الليثيوم والفلور المستخدمين في الوقود السائل أنهما باهظا الثمن ونادرا الوجود، إضافة إلى أنهما من مواد شديدة التآكل، كما أن الليثيوم قابل للاشتعال عند ملامسته للهواء. أما الفلور فهو قابل للاشتعال عند تلامسه مع معظم أنواع الوقود. بينما يكون الهيدروجين غير ذاتي الاشتعال ومتفجر خطر جداً.

كذلك يعد الفلور وفلوريد الهيدروجين مواد سامة جداً ملوثة للبيئة عن طريق عوادم الصواريخ مما يجعل المناطق المحيطة بمنصات إطلاق الصواريخ مناطق غير صالحة للعمل.

٥ـ تنطلق عن عوادم الصواريخ المستخدمة للوقود السائل مواد مؤينة قد تتداخل مع موجات الراديو فتؤدي إلى التشويش على الاتصال مع الصاروخ.

● الوقود الدافع الهجين

يتكون الوقود الدافع الهجين (Hybrid propellants) عادة من وقود صلب ومؤكسد سائل أو غازي. ومع أنها تجمع بين حالتين من حالات الوقود الصلب والسائل إلا أن محركات صواريخ الوقود الهجين تعد أقل تطوراً مقارنة بكثير من

مثيلاتها في صواريخ الوقود الصلب وصواريخ الوقود السائل، حيث تستخدم صواريخ الوقود الصلب في الأغراض العسكرية بسبب سهولة كل من تداولها وصيانتها. أما في حالة إطلاق الأقمار الاصطناعية إلى المدارات البعيدة فإن صواريخ الوقود السائل تكون هي الأفضل، وقد ازداد في الآونة الأخيرة العمل على تطوير محركات صواريخ الوقود الهجين لاستخدامها للحالات تحت المدارية (Suborbital) غير العسكرية.

* **مميزات الوقود الهجين**، ومنها ما يلي:ـ

ـ يسمح المؤكسد السائل بعملية خنق أو إيقاف (Throttle) وإعادة تشغيل الصاروخ كما في حالة صواريخ الوقود السائل.

ـ تعد أنظف وأقل تلويثاً للبيئة من صواريخ الوقود السائل، لأن جميع مؤكسدات الطور الصلب ذات الأداء العالي تحتوي على الكلور.

* **عيوب الوقود الهجين**، وأهمها ما يلي:ـ

ـ يشترك مع صواريخ الوقود الدفع الصلب في: أنه يجب أن يكون الغلاف المحيط بحجرة الاحتراق قوياً؛ بحيث يقاوم ضغط احتراق الوقود والحرارة العالية.

ـ يتم مزج الوقود الصلب مع الوقود السائل عند السطح المنصهر من الوقود الصلب أو السطح المتبخر من الوقود، ويعاب على هذه العملية أنه لا يمكن التحكم بها بشكل كامل، ولذا يتخلف بعض الوقود غير المحترق مما يقلل من كفاءته، وبالتالي يقلل من سرعة اندفاع نواتج الاحتراق، مما يؤثر على سرعة انطلاق الصاروخ.

● **الوقود النووي**

تعمل صواريخ الوقود النووي بواسطة مفاعل نووي ينتج الطاقة عن طريق انشطار الذرات فتحوِّل الوقود إلى غاز ساخن يتمدد بسرعة. ومع أن هذه الصواريخ تنتج طاقة تعادل ضعفي أو ثلاثة أضعاف الطاقة التي تنتجها صواريخ وقود الدفع الصلب أو السائل، إلا أن العلماء جادون في تطويرها بشكل أكبرلرحلات الفضاء.

تعمل صواريخ الوقود النووي بضخ الهيدروجين السائل إلى المفاعل من خلال الجدار المحيط بمحرك الصاروخ لتبريد الصاروخ، وكذلك لتسخين الهيدروجين السائل. ثم يمر الهيدروجين من خلال مئات القنوات الضيقة في المفاعل، فتعمل حرارة المفاعل على تحويله إلى غاز متمدد يخرج في الحال من فوهة العادم بسرعات قد تصل إلى ٣٥٠٠٠كم/ساعة.

كفاءة وقود الصواريخ

تعتمد كفاءة الوقود الدافع للصواريخ بجميع أنواعه وأشكاله على نسبة المزيج (Mixture ratio) بين المؤكسد والوقود، إذ كلما كان التفاعل بينهما تاماً دون أن يتبقى شيء من أي منهما دون احتراق كلما كان أكثر كفاءة.

تعتمد سرعة انطلاق غازات العادم النظرية لوقود دافع معين على كمية الطاقة المتحررة من وحدة كتلة الوقود، أي الطاقة النوعية (specific energy)، حيث يؤدي عدم احتراق الوقود بواسطة المؤكسد إلى تدني الطاقة النوعية للوقود.

تحول فوهة نفاث الوقود في الصاروخ الطاقة الحرارية للوقود الدافع مباشرة إلى طاقة حركية في وقت قصير لا يتجاوز واحد من مليون جزء من الثانية. خلال عملية التحويل هذه، يجب أن تنتقل الطاقة في جزيئات العادم بسرعة عالية من حالة الدوران والاهتزاز إلى طاقة إزاحة (Translation). تحتوي الجزيئات الكيميائية ذات العدد القليل من الذرات مثل الهيدروجين (H_2)، وأول أكسيد الكربون (CO)، على طاقة أقل من الجزيئات ذات العدد الأكثر من الذرات مثل الماء (H_2O)، وثاني أكسيد الكربون (CO_2)، حيث تحول هذه الجزيئات الصغيرة كثيراً من طاقتها الدورانية والاهتزازية إلى طاقة إزاحة (Translation energy) أكثر من الجزيئات الكبيرة. و ينتج عن ذلك تحسن كبير في كفاءة فوهة النفاث تمكن محرك الصاروخ من تحسين سرعة العادم الحقيقية بإمرار مخاليط غنية لها سرعات نظرية متدنية (Theoretical Exhaust Velocities) إلى حد ما.

تنطلق صواريخ الهيدروكربونات

والأكسجين السائل بقوة شديدة في البداية فقط؛ لأن الطاقة الناتجة عن وحدة الكتلة من الوقود تبدأ في التناقص بسرعة كلما انحرفت نسبة خليط الوقود عن المزيج القياسي. أما الصواريخ التي تعمل بمزيج الأكسجين السائل والهيدروجين السائل: فإنها تنطلق بقوة وتستمر في ذلك، لأن الهيدروجين خفيف، وبالتالي فإن الطاقة الناتجة عن حرق وحدة كتلة واحدة من الوقود الدافع تتناقص ببطء. وفي الحقيقة: فإن قوة انطلاق صواريخ الهيدروجين السائل والأكسجين السائل واستمراريتها تعتمد على كمية الهيدروجين الإضافية التي يحملها خزان الصاروخ وليس على كتلة الهيدروجين نفسه.

هناك سبب آخر للانطلاقة القوية للصاروخ، هو: أن المزيج غير القياسي (Off-stoichiometric) للخليط يحترق عند درجة حرارة أقل من المزيج القياسي (Stoichiometric) مما يسهل تبريد المحرك. ونظراً لأن معظم المحركات تكون مصنوعة من الفلزات أو الكربون فإن العادم الحار الغني بالمؤكسد يكون ذو تأثير تآكلي شديد، بينما يكون العادم الغني بالوقود أقل من ناحية تأثيره التآكلي.

من الجدير بالذكر أن عوادم جميع المحركات في الصواريخ الأمريكية تكون غنية بالوقود بينما في الصواريخ الروسية تكون غنية بالمؤكسدات.

الأضرار الصحية

تنطلق الصواريخ مخلفة وراءها منتجات العادم الضارة بالبيئة التي تشتمل على نواتج الاحتراق بما فيها الوقود والمؤكسد غير المحترق، فقد أفادت دراسة نشرت في فترة سابقة أن الوقود غير المحترق الناتج عن الصواريخ التي يتم إطلاقها من قاعدة بايكونور كازاخستان ـ تستخدمها وكالة الفضاء الروسية، ووكالة الفضاء الأوربية، ووكالةالفضاء الأمريكية ـ يصيب الأطفال المقيمين بالقرب منها بأمراض خطيرة، إذ وجد أن الأطفال الذين يعيشون في مناطق ينتشر فوقها الوقود أثناء الإقلاع في سيبيريا يعانون من متاعب صحية خطيرة، مثل اضطرابات الغدد الصماء، وحدوث خلل في الدم تفوق المعدل الأقليمي.