يستخدم الطيران طاقة الوقود البترولية (الهيدركربونية) السائلة التي تتمتع بمحتوى عالي من الطاقة لكل وحدة حجم مقارنة بالوقود الغازي، كما أنها تتميز بسهولة توزيعها والتعامل معها مقارنة بالوقود الصلب، كما تتميز بتوفرها ورخص ثمنها.

تحققت القدرة على الطيران في السنوات الأولى من القرن العشرين، وذلك بتطوير محرك الاحتراق الداخلي المشابه لمحركات السيارات، وكانت تستخدم نفس الوقود. وقد قادت الحاجة المتزايدة للطاقة إلى تطوير محركات خاصة، ووقود (جازولين) خاص بالطائرات (Aviation gasolines) يتم تحضيره بحسب متطلباتها. ظهر في الأربعينات من القرن الماضي المحرك التوربيني (العنفي) استجابة للحاجة إلى زيادة القوة المحركة. وتم إحلال الكيروسين بدلاً من الجازولين في الطائرات التوربينية الأولى، ثم استبدل فيما بعد بالوقود النفاث الخاص بالطائرات التوربينية المتطورة.

يستعرض هذا المقال وقود المحركات المكبسية (جازولين الطائرات) بشيء من الإيجاز لقلة انتشاره، بينما يستعرض بالتفصيل كل مايتعلق بوقود المحركات التوربينية أو مايسمى بالوقود النفاث.

وقود المحركات المكبسية

وقود المحركات – جازولين الطائرات– عبارة عن خلائط خاصة من خامات الجازولين، مع مضافات تستخدم للحصول على وقود عالي الأداء يمكن تصنيفه تبعاً لدرجة عدم الطّرق التي يتمتع بها.

خاصية الجازولين	نظامي برافين	إيزوبرافين	عطريات	نفثينات
منع الدق لمزيج وقود الحالة المنخفضة	--	+/++	+/++	O / -
منع الدق لمزيج وقود الحالة المرتفعة	--	+	++	O / -
السيولة تحت درجات حرارة منخفضة	-	+/++	-	O / +

(+) تأثير مفيد، (–) تأثير ضار، (O) تأثير محايد أو بسيط.

● **جدول(١) تأثير المساهمة المحتملة لكل طائفة هيدروكربونات على خصائص مختارة لجازولين الطائرات.**

تشمل خامات خلط الجازولين نفثا بكر (غير مكسرة)، وألكيلات، وجازولين تكسير حفزي، حيث تكون النفثا عبارة عن خلائط من المركبات الهيدروكربونية المقطرة مباشرة من النفط الخام، أما الألكيلات فهي مركبات برافينية متفرعة مصطنعة أثناء عمليات التكرير، بينما تحتوي مواد الجازولين المكسرة حفزياً على مركبات حلقية عطرية. ويستخدم رباعي إثيل الرصاص(Tri Ethyl Lead- TEL) كمادة مضافة بتركيز يصل إلى ٤ مليلتر/جالون (١,٠٥٧مل/لتر) من الوقود، وذلك بهدف زيادة خاصية منع الطّرق للوقود.

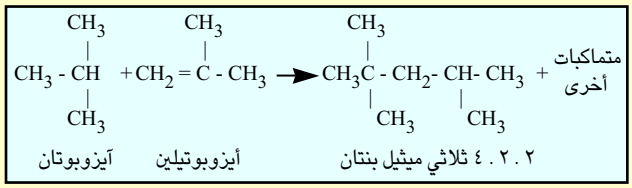
● التركيب

تتراوح أعداد ذرات الكربون في مكونات وقود المحركات المكبسية ما بين ٤ (البوتان) إلى ١٠ (الديكان) مع توافر أكبر للمكونات ذات عدد ذرات الكربون (٨)، ويوضح الجدول (١) مدى تأثير مشاركة كل طائفة من الطوائف الهيدروكربونية المكونة لجازولين الطائرات على ثلاث خصائص أداء مهمة لهذا الجازولين. وبما أن مركبات إيزو البرافين توافق جيداً خصائص جازولين الطائرات الثلاثة المختارة، فإن هذه المركبات تعد مفيدة جداً، كما تعد المركبات العطرية مفيدة لخصائص منع الطّرق إلا أنها ضارة من ناحية السيولة تحت درجات حرارة منخفضة، وتعد النفثينات محايدة إلى ضارة بصورة عامة. أما البرافينات النظامية فتعد ضارة جداً باستثناء البوتان

● التكرير

يتم تكرير جازولين الطائرات (Aviation Gasoline Refining) وفقاً لما يلي:

* **الألكلة (Alkylation):** وقد تم تطويرها في الثلاثينات من القرن الماضي لإنتاج جازولين الطائرات ذي خصائص منع طرق عالية، ويتم تكريره بتفاعل الإيزوبوتيلين مع الأيزوبوتان بوجود حمض قوي للحصول على مركبات إيزوبرافينية ذات أوزان جزيئية ودرجات غليان أعلى خاصة مركبات ثلاثي ميثيل البنتان، ويعد ٢ ، ٢ ، ٤ ثلاثي مثيل البنتان (إيزوأوكتان) المتماكب الأكثر توفراً في هذه العملية، وهو الذي يتمتع ـ بحسب تعريفه ـ بعدد أوكتان مقداره ١٠٠ وذلك حسب المعادلة أدناه:



* **خلط جازولين الطائرات:** ويتم تحضيره بخلط مكونين أو أكثر للوصول إلى الخصائص المرغوبة.

● الاستهلاك

بلغ استهلاك جازولين الطائرات قيماً حرجة أثناء ومع نهاية الحرب العالمية الثانية، حيث بلغ إنتاج الحلفاء منه ما يزيد عن ٢٥مليون جالون يومياً. وبعد سنتين من الحرب انخفض الإنتاج بصورة حادة إلى ٥ ملايين جالون/يومياً. وقد أدى تطور الطيران التجاري مع استخدام الطيران الحربي إلى زيادة تدريجية مرة ثانية حتى ١٤ مليون جالون/يومياً عام ١٩٥٧م. ثم عاد الإنتاج ليتناقص تدريجياً مع ظهور وتطور المحركات التوربينية كبديل للمحركات المكبسية المستخدمة في الطائرات الحربية، وفيما بعد في الطائرات التجارية، ليصل إلى ٥ ملايين جالون/يومياً في عام ١٩٧٠م. وفي عام ١٩٩٩م بلغ إجمالي إنتاج جازولين الطائرات في الولايات المتحدة

٠,٨ مليون جالون يومياً ، وهي كمية صغيرة جداً مقارنة بإنتاج الوقود التوربيني (٧٠مليون جالون /يومياً) . وقد قدر الاستخدام العالمي لجازولين الطائرات سنة ١٩٩٦م بحوالي ٢,٢مليون جالون/يومياً.

وقود الطائرات التوربينية

بدأ استخدام وقود الطائرات التوربينية (Aviation turbine fuels) ـ العنفية ـ من قبل كل من القوات الجوية البريطانية والألمانية في العمليات الحربية مع نهايات الحرب العالمية الثانية. كانت المحركات البريطانية آنذاك تعمل على كيروسين الإنارة المحتوي على ١٪ زيت تزليق خفيف (زيت محرك نفاث)، بينما استخدمت المحركات الألمانية خليطاً من الجازولين وأجزاء تقطير أثقل ذات مجال غليان أكثر اتساعاً. وقد توقف تطوير الوقود في المانيا مع نهاية الحرب. بعد الحرب العالمية الثانية بدأت القوات الجوية الأمريكية باستخدام وقود منخفض الأوكتان متسع مجال الغليان (Wide-cut fuel)، وهو بصورة أساسية عبارة عن خليط هيدروكربوني يمتد ضمن مجالات غليان الجازولين والكيروسين . كما اعتمد اختياره على توفره بكميات أكبر من الجازولين أوالكيروسين بمفردهما ، خاصة في فترة الحرب، وقد وجد فيما بعد أن الوقود النفاث متسع مجال الغليان يتمتع بمميزات تشغيلية أقل مقارنة بالوقود الكيروسيني ، وذلك للأسباب التالية:

- ضياع أكبر للوقود بسبب التبخر عند ارتفاعات عالية.
- زيادة خطورة نشوب الحريق أثناء التعامل معه على الأرض.
- حدوث تحطم الطائرات المزودة بالوقود متسع مجال الغليان.

لأجل ذلك بدأت القوى الجوية بالعودة إلى الوقود من النمط الكيروسيني في سبعينات القرن الماضي، وقد تم التحول من الوقود متسع مجال الغليان (JP-4) إلى النوع الكيروسيني (JP-8) واسع – النظام، كما استخدمت البحرية الأمريكية نوعاً من الوقود الكيروسيني مرتفع نقطة الوميض (JP-5) ، على حاملات الطائرات من أجل اعتبارات السلامة منذ مطلع خمسينات القرن الماضي.

مع تطور صناعة الطائرات النفاثة التجارية في خمسينات القرن الماضي، تم اختيار الوقود الكيروسيني لملائمة مواصفاته. ومع أن الوقود النفاث واسع مجال الغليان (Jet-B) لايزال مستخدما في بعض مناطق كندا وألاسكا شديدة البرودة لملائمته لذلك ، إلا أن أصناف الوقود الكيروسيني تبقى هي المهيمنة في بقية أنحاء العالم.

يستخدم الوقود (Jet- A) في الولايات المتحدة ، بينما يستخدم معظم ماتبقى من دول العالم الوقود (Jet A-1)، حيث يتمتع الوقود الأخير بنقطة تجمد قصوى أقل مما هي عليه بالنسبة للوقود الأول ـ ٤٧م تحت الصفر للوقود (Jet A) و ٤٠ م تحت الصفر للوقود (Jet A-1) ـ مما يجعل الوقود (Jet A-1) أفضل في حالة الرحلات الدولية الطويلة وخاصة في المسارات القطبية أثناء فصل الشتاء.

يعود اختيار وقود الـ (Jet A) في الولايات المتحدة لانخفاض تكلفته وتوفره ، وقد أظهرت التجربة عبر السنين أنه مناسب للاستخدام في الولايات المتحدة وخاصة للرحلات الداخلية.

● تكوين وقود الطائرات التوربيني

يتكون وقود الطيران التوربيني من خليط لكثير من المركبات الهيدروكربونية – أكثر من ألف مادة– يصعب فصلها بتقنيات التحليل الحديثة . يتراوح عدد ذرات الكربون في مكونات الوقود النفاث الكيروسيني ما بين ٨ و ١٦، بينما يتراوح عددها في الوقود النفاث واسع مجال الغليان ما بين ٥ إلى ١٥، ويظهر الشكل (١) منحنيات غليان نموذجية لكل من الوقود النفاث الكيروسيني والوقود النفاث واسع مجال الغليان.

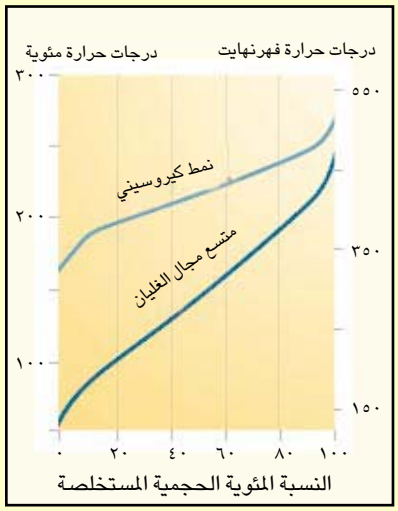
تحتوي معظم المركبات الهيدروكربونية الموجودة في الوقود النفاث على مركبات بارافينية أو نفثينية أو عطرية. وتختلف مواد الوقود النفاث التي لها نفس النوع عن بعضها البعض بسبب احتوائها على نسب مختلفة من هذه الأصناف الثلاثة من المركبات، وذلك بحسب مواصفات كل صنف على النحو التالي:

* **نقطة الغليان والتجمد:** ويلاحظ ارتفاع نقطة الغليان بازدياد عدد ذرات الكربون في مركبات الصنف الواحد. أما المركبات التي لها نفس عدد ذرات الكربون فيكون ترتيب ازدياد نقطة الغليان في نفس الصنف على النحو التالي: آيزو بارافين ، بارافين نظامي (n-Paraffin)، نفثين ، وعطري ، جدول (٢).

تزداد نقطة التجمد بازدياد عدد ذرات الكربون في كل صنف، لكنها تتأثر بقوة بشكل الجزيء. تتجمد (تتبلور) البرافينات النظامية والعطريات غير المحتوية على متبادلات عند درجات حرارة أعلى بكثير من المركبات الأخرى ذات نفس العدد من ذرات

اسم المركب	صيغته	صنفه	نقطة غليانه	نقطة تجمده
أوكتان نظامي	C_8H_{18}	n– برافين	١٢٥,٧م	–٥٦,٨م
٢– ميثل الهبتان	C_8H_{18}	آيزوبرافين	١١٧,٦م	–١٠٩م
١-ميثل -١- إثيل حلقي البنتان	C_8H_{16}	نفثين	١٢١,٥م	–١٤٣,٨م
إثيل حلقي الهكسان	C_8H_{16}	نفثين	١٣١,٨م	–١١١,٣م
أورتوكزيلين	C_8H_{10}	عطري	١٤٤,٤م	–٢٥,٢م
بارا ـ كزيلين	C_8H_{10}	عطري	١٣٨,٤م	+١٣,٣م
سيس ـ ديكالين	$C_{10}H_{18}$	نفثين	١٩٥,٨م	–٤٣م
تترالين	$C_{10}H_{12}$	عطري	٢٠٧,٦م	–٣٥,٨م
نفثالين	$C_{10}H_8$	عطري	٢١٧,٩م	+٨٠,٣م
دوديكان نظامي	$C_{12}H_{26}$	برافين	٢١٦,٣م	–٩,٦م
٢– مثيل أونديكان	$C_{12}H_{26}$	آيزوبرافين	٢١٠م	–٤٦,٨م
١– إثيل نفتالين	$C_{12}H_{12}$	عطري	٢٥٨,٣م	–١٣,٨م
نظامي هكسيل البنزين	$C_{12}H_{18}$	عطري	٢٢٦,١م	–٦١م
هكساديكان نظامي	$C_{16}H_{34}$	n-برافين	٢٨٦,٩م	+١٨,٢م
مثيل بنتاديكان	$C_{16}H_{34}$	آيزوبرافين	٢٨١,٦م	–٧م
نظامي ديسيل البنزين	$C_{16}H_{26}$	عطري	٢٩٧,٩م	–١٤,٤م

● جدول (٢) نقاط غليان وتجمد مركبات الوقود النفاث الهيدروكربونية.



● شكل(١) منحنيات تقطير (D86) نموذجية لوقود نفاث كيروسيني ووقود نفاث متسع مجال الغليان.

الكربون بسبب شكلها الهندسي الذي يسمح لها بالتجمع مع بعضها بسهولة ضمن تركيب بلوري.

* **محتوى المادة من الطاقة :** ويزداد للمركبات التي لها نفس عدد ذرات الكربون بالنسبة لوحدة الوزن لكل صنف، حيث يكون محتوى العطريات الأقل ثم النفثينات ثم البرافينات الأعلى، وعلى أساس حجمي يكون الترتيب معكوساً، حيث تتمتع البرافينات بأقل محتوى من الطاقة بينما تتمتع العطريات بأعلى محتوى من الطاقة. تنطبق هذه العلاقة على مواد الوقود ، فمواد الوقود الأخف (الأقل كثافة)، مثل الجازولين، تتمتع بقيم حرارة أعلى على أساس وزني، بينما تتمتع مواد الوقود الأثقل (الأعلى كثافة)، مثل الديزل ، بقيم حرارة أعلى على أساس حجمي.

* **اللزوجة :** وترتبط بعدد ذرات الكربون أكثر من ارتباطها بصنف الهيدروكربون. فمن أجل عدد ذرات كربون معين، تتمتع النفثينات بصورة عامة بلزوجة أعلى بقليل مما هي عليه في البارافينات أو العطريات.

ويلخص الجدول (٣) العلاقة بين صنف الهيدروكربون وخصائص الوقود النفاث الحاوي عليه. فيلاحظ أن البرافينات النظامية تتمتع بمحتويات طاقة حجمية قليلة وبخصائص تدفق ضعيفة جداً تحت درجة حرارة منخفضة. بينما تتمتع العطريات بمحتويات طاقة حجمية جيدة جداً ، ولكن جودة احتراقها منخفضة ، وخصائص تدفقها ضعيفة تحت درجات حرارة منخفضة. أما الآيزوبرافينات والنفثينات فتتمتع بخصائص متوسطة تقع بين تلك الخاصة بالبرافينات النظامية والعطريات.

● التكرير

يتم تكرير وقود الطيران التوربيني (Aviation Turbine Fuel Refining) من البترول باستخدام طريقة **فيشر ـ تروبش**، وتشمل أهم منتجات تكرير خام البترول: وقود النقل (الجازولين والوقود النفاث ووقود الديزل وجازولين الطائرات)، وغاز البترول المسيل (LPG)، ووقود التسخين، وزيت التزليق، و الشمع، والأسفلت.

* **المادة الخام (Raw Material) :** وهي عبارة عن خامات بترولية عالية الوزن النوعي تحتوي على كميات أكبر من المنتجات الخفيفة وكميات أقل من الكبريت والنيتروجين ، مما يجعلها سهلة التكرير . وبصورة عامة تتألف كل أنواع النفط الخام بالدرجة الأولى من هيدروكربونات بارافينية ونفثينية وعطرية ، وتحتوي كل طائفة من هذه المركبات على مجال واسع جداً من الأوزان الجزيئية.

* **عمليات التكرير (Refining Processes) :** وتنقسم إلى ثلاثة أقسام:

– **عمليات الفصل (Separation Processes):** وتعد عملية التقطير أكثرها شيوعاً، حيث يتم فصل لقيم هذه العمليات إلى مكونين أو أكثر بالاعتماد على بعض الخصائص الفيزيائية، مثل درجة الغليان.

– **عمليات التحسين (Upgrading Processes) :** حيث يتم تحسين نوعية المادة من خلال تفاعلات كيميائية لنزع أي مركبات موجودة بكميات نزرة غير مرغوب فيها. ومن عمليات التحسين الأكثر شيوعاً المستخدمة للوقود النفاث عملية التحلية، والمعالجة بالهيدروجين، والمعالجة بالصلصال.

– **عمليات التحويل (Conversion Processes) :** حيث يتم تغيير التركيب الجزيئي للّقيم ، عن طريق تكسير الجزيئات الكبيرة إلى جزيئات صغيرة ، مثل: التكسير الحفزي،والتكسير الهيدروجيني.

خاصية الوقود النفاث	بارافين نظامي	آيزو بارافين	نفثين	عطري
محتوي الطاقة وزنياً	+	+	O	–
محتوى الطاقة حجمياً	–	–	O	+
جودة الاحتراق	+	+	+	–
السيولة تحت درجات حرارة منخفضة	––	+/O	+	–/O

(+) تاثير مفيد ، (–) تاثير ضار، (O) تاثير محايد أو بسيط.

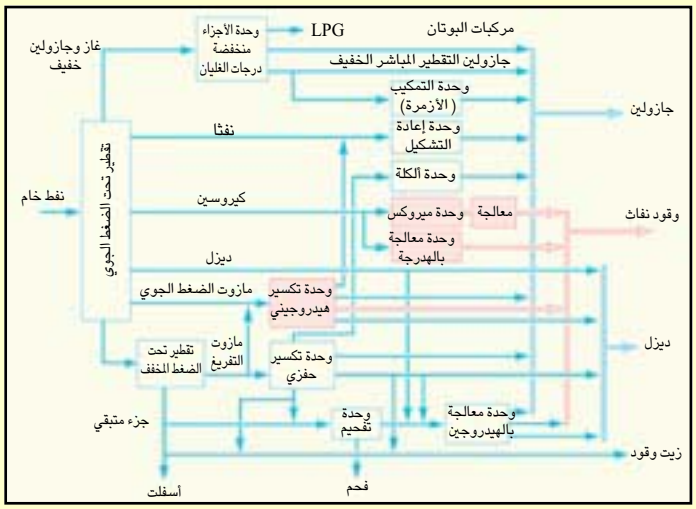
● جدول (٣) درجة مساهمة كل صنف هيدروكربوني في خصائص مختارة للوقود النفاث.

● التكرير الحديث

تتم عمليات التكرير الحديث (Modern refining)، بتقديم النفط الخام إلى عمود التقطير حيث يتم فصل منتجات التقطير المباشر وهي: الجازولين الخفيف والثقيل، والكيروسين، والديزل وذلك تحت الضغط الجوي ، شكل (٢). ويتم تقطير المنتجات السفلية الموجودة في عمود الضغط الجوي تحت ضغط منخفض للحصول على المازوت (gasoils) كلقيم للتكسير الحفزي المائع (FCC) أو للتكسير الهيدروجيني. ويمكن معالجة المازوت هيدروجينياً لخفض مستويات الكبريت والنيتروجين فيه لتحسين أداء عمليات الـ (FCC).

يمكن للوقود النفاث المنتج بواسطة المصفاة أن يكون بكامله منتج تقطير مباشر أو منتج ناتج عن المعالجة الهيدروجينية، أو أن يكون ناتجاً عن خلط منتج التقطير المباشر مع منتج المعالجة الهيدروجينية أو منتج التكسير الهيدروجيني. كما يمكن إضافة كميات قليلة من مكونات الجازولين الثقيل. ويمكن لكيروسين التقطير المباشر الناتج عن نفط خام قليل محتوى الكبريت أن يحقق جميع مواصفات الوقود النفاث. إلا أن كيروسين التقطير المباشر يتم تحسينه عادة بمعالجة ميروكس (Merox)، المعالجة بالطين، أو بالمعالجة الهيدروجينية قبل أن يباع على هيئة وقود نفاث.

ويجب على المكررأن يقوم بخلط المنتجات المتوفرة بهدف التوصل إلى كل متطلبات الأداء والمتطلبات الاقتصادية. وقد تم تطوير برامج حاسوبية متطورة لتقدير وضبط عمليات



● شكل (٢): رسم تخطيطي لمصفاة حديثة.

التكرير بما في ذلك مرحلة الخلط النهائي.

● خصائص الأداء

بما أن الوظيفة الأساسية لوقود الطيران التوربيني (الوقود النفاث) هي تقديم الطاقة للطائرة فإن محتوى الطاقة وجودة الاحتراق سيمثلان مفتاح خصائص أداء الوقود. وتوجد أيضاً خصائص أداء مهمة أخرى مثل الثبات، التزليق ، السيولة، قابلية التطاير، عدم قابلية التآكل والنظافة.

وإضافة إلى كونه مصدراً للطاقة ، يستخدم الوقود كسائل هيدروليكي في أنظمة التحكم بالمحرك وكمبرد لبعض مكونات نظام الوقود.

*** محتوى الطاقة (Energy Content) :** وهي عبارة عن الحرارة الصادرة عن احتراق كمية معلومة من الوقود تحت ظروف نوعية خاصة نوعية). وتعتمد كمية الحرارة الناتجة على الماء المتشكل خلال عملية الاحتراق. فإذا كان الماء قد تكثف إلى الطور السائل معطياً حرارة التبخر، فإن الطاقة المتحررة في هذه العلمية تدعى محتوى الطاقة الإجمالي. أما إذا بقي الماء على هيئة غازية ، فإن محتوى الطاقة الصافي يكون أقل من ذلك. وبما أن المحركات تطرح الماء على هيئة بخار فإن محتوى الطاقة الصافي هو القيمة المناسبة التي يمكن أن نقارن بواسطتها أنواع الوقود.

يمكن التعبير عن محتوى الطاقة إما بطريقة وزنية (الطاقة الناتجة عن حرق وحدة وزن من الوقود)، أو بطريقة حجمية. ووحدات القياس الدولية المستخدمة هي : ميجا جول/كيلوجرام (MJ/kg) ، وميجا جول / لتر (MJ/L) . في الولايات المتحدة، الوحدة الوزنية هي الوحدات الحرارية البريطانية لكل رطل إنجليزي (Btu / lb)، والوحدة الحجمية هي الوحدات الحرارية البريطانية لكل جالون (Btu / ga) .

وبما أن محتوى المركبات الهيدروكربونية من الطاقة يختلف فيما بينها ، فإن تكوين الوقود النفاث له بعض التأثير على محتوى الطاقة. ويمكن التنبؤ بهذا التأثير من خلال كثافة الوقود التي تختلف أيضاً تبعاً لتكوينه . وبصورة عامة تتمتع أصناف الوقود النفاث الأقل كثافة بمحتوى طاقة وزني أعلى، أما أصناف الوقود النفاث الأكثر كثافة فتتمتع بمحتوى طاقة حجمي أعلى، وكوقود للطائرات يفضل الوقود الأعلى كثافة ذو المحتوى الطاقي الحجمي الأعلى ، أو الوقود الأقل كثافة ذو المحتوى الطاقي الوزني الأعلى . ويساعد الوقود الأول على الطيران لفترات زمنية أطول.

*** مميزات الاحتراق (Combustion Characteristics) :** وتتحقق بضبط تدفق الوقود ، وذرّه لجعل كفاءة الاحتراق أعظم مايمكن، وإنتاج أقَل كمية من الدخان والرواسب الكربونية، والغازات المؤكسدة جزئياً مثل أول أكسيد الكربون، وكذلك شدة الإشعاع المنبعث من اللهب حيث يؤثر نوع الوقود على كل ذلك.

تتشكل في المحرك النفاث أثناء عملية الاحتراق دقائق صغيرة محتوية على الكربون . تستمر هذه الدقائق بالاحتراق طالما أنها تمر عبر اللهب ويتم استهلاكها كلياً تحت ظروف مناسبة . ويؤدي توهج هذه الدقائق في قسم الاحتراق إلى إطلاق أشعة تحت حمراء يسبب امتصاصها من قبل جدران الحارق حدوث شقوق وإخفاقات مبكرة للمحرك . كما يمكن لهذه الدقائق ـ إن لم يتم استهلاكها كلياً من قبل اللهب ـ أن تكون خطرة إذا اصطدمت أو لامست شفرات التوربين والأجزاء الثابتة من المحرك ، مما يسبب تآكلها . كما يمكن لرواسب الكربون أن تسد فتحات جدار الحارق التي تؤمن هواءً ممدداً لقسم الاحتراق مما يؤدي لإحداث فوضى في نمط تدفق منتجات الاحتراق.

تشكل مواد الوقود الغنية بالمحتوى العطري ـ خاصة الوقود الغني بالنفثالينات ـ كميات أكثر من هذه الدقائق المحتوية على الكربون . وبما أن هذه الدقائق ذات خطر كبير لذا يتم ضبط المحتوى العطري ومحتوى النفثالينات الإجمالي للوقود النفاث . ويؤدي المزج الأفضل للوقود والهواء إلى حدوث احتراق أكمل وأفضل، وبالتالي خفض كمية الكربون.

*** الثبات (Stability) :** وهو عبارة عن ثبات خصائص الوقود، إما أثناء التخزين أوأثناء الاستعمال، أي أن الوقود الثابت هو الوقود الذي لاتتغير خصائصه عندما يتعرض لدرجات حرارة مرتفعة في المحرك (ثبات حراري).

ينتج عدم ثبات الوقود النفاث عن التفاعلات الكيميائية متعددة الخطوات ، مثل تفاعلات الأكسدة . وتكون منتجات التفاعل الأولية عبارة عن هيدروبيروكسيدات وبيروكسيدات، وتبقى هذه المنتجات ذائبة في الوقود، لكنها قد تهاجم وتخرب بعض الإستومرات نظام الوقود . كما تؤدي تفاعلات أخرى إلى تشكل أصماغ ذوابة ودقائق غير ذوابة يمكنها أن تسد مصافي الوقود وأن تترسب على سطوح أنظمة وقود الطائرة ، مؤدية إلى تضييق هذه المسارات ، ولتحسين ثبات الوقود يضاف له مواد مانعة للتأكسد.

*** التزليقية (Lubricity) :** وهي عبارة عن:

– تزليق هيدروديناميكي: وفيه تقوم طبقة المزلق الرقيق بمنع السطوح المتحركة المتقابلة من التماس فيما بينها. وتوفر السوائل ذات اللزوجة الأعلى تزليقاً هيدروديناميكياً أكبر ، مقارنة بما توفره السوائل ذات اللزوجة المنخفضة. تصمم المحركات النفاثة للعمل على مواد وقود نفاث ضمن مجال لزوجة عادية ، وبالتالي توفر مواد الوقود النفاث النموذجية تزليقاً هيدروديناميكياً مناسباً.

– تزليق رقيق: ويصبح مهماً عند فشل التزليق الهيدروديناميكي ، والمزلقات الرقيقة عبارة عن مركبات تشكل بالتصاقها على السطوح المعدنية طبقة واقية مضادة للتآكل، ويعد الوقود النفاث الناتج عن التقطير المباشر (اللاتكسيري) مزلقاً رقيقاً جيداً ، بسبب احتوائه على كميات نزره من مركبات محتوية على أكسجين ونيتروجين وكبريت . ويؤدي إضافة كمية ضئيلة ـ تصل إلى عشرة اجزاء من مليون ـ من مضاف محسن للتزليق إلى وقود ضعيف التزليق إلى أن يصبح تزليقه مقبولاً.

*** السيولة (Fluidity):** وهي تدفق الوقود بحرية من خزانات الوقود الموجودة في الأجنحة إلى المحرك من خلال نظام وقود الطائرة، ونظراً لأن الوقود النفاث يتعرض إلى درجات حرارة منخفضة جداً عند ارتفاعات عالية، وخاصة عند المسارات الجوية القطبية في أوقات الشتاء، وكذلك على الأرض في المناطق شديدة البرودة، فإنه يجب أن يحتفظ بسيولته في جميع هذه الحالات وتحت هذه الظروف، وإلا فإن تدفقه إلى المحركات سوف يتناقص أو يتوقف، لذلك يجب أن تحتوي مواصفات الوقود على حد علوي للزوجة ، وعلى نقطة تجمد منخفضة مناسبة.

*** التطايرية (Volatilit) :** وهي قدرة الوقود على التبخر قبل حرقه ، ومع أن ميل الوقود للتطاير يؤدي لزيادة تبخره من الخزانات الأرضية وخزانات الطائرات ، كما يؤدي لازدياد اشتعاليته وخطورته داخل أو خارج الخزان. فإن التطايرية تعد من أهم الفروق بين الوقود النفاث الكيروسيني والوقود النفاث واسع مجال الغليان، حيث

يعد الوقود النفاث الكيروسيني عملياً غير طيار ، فهو يتمتع بضغط بخار رايد (Reid) مقداره ١ كيلو باسكال (Kpa) (أي ٠,١٤ psi)، أما الوقود النفاث واسع مجال الغليان فيتمتع بضغط بخار رايد مقداره ٢١ كيلو باسكال (أي ٣ psi).

ويعتبر الوقود النفاث واسع مجال الغليان مناسباً أكثر لاستخدامات المناخ البارد بسبب تمتعه بلزوجة ونقطة تجمد أقل مما هو عليه الوقود النفاث الكيروسيني.

* **منع التآكلية (Corrosivity) :** حيث يجب أن لايؤدي تماس الوقود لتآكل أي من مواد أنظمة وقود الطائرة . وفي الحالة النموذجية تستخدم خزانات وقود من الألمنيوم . كما تحتوي أنظمة الوقود أيضاً على الفولاذ ومعادن أخرى . كما يمكن لخزانات الوقود أن تحتوي على مواد مانعة للتسرب، وطلاءات. ويقوم صانعو الهيكل والمحرك باختبار مكثف على أي مادة قبل الموافقة على استخدامها في نظام الوقود لمعرفة مدى انسجامها مع هذا الوقود.

من أهم المركبات الأكالة الموجودة في الوقود النفاث الأحماض العضوية والمركبتانات ، وتضع جميع المواصفات أرقاماً حدية لهذه المركبات بسبب ضررها . يسبب الكبريت الموجود في جميع المركبات العضوية تآكل شفرات العنفة عند درجة حرارة مرتفعة ، وخاصة بوجود الصوديوم . كما تسبب تآكلاً عاماً حتى عند تراكيز منخفضة، مما يؤكد الحاجة لنزعها بالكامل من الوقود.

● نظافة الوقود

تعني نظافة الوقود (Fuel Cleanliness) غياب الدقائق الصلبة ، والماء الحر من الوقود ، حيث يمكن للدقائق والصدأ والأوساخ أن تؤدي لإنسداد مرشحات الوقود وزيادة إجهاد مضخة الوقود ، ولذلك يتم تنظيف الوقود وفقاً لما يلي:

* **فصل الماء (Water separation):** حيث يدخل الماء في وقود الطائرات من عدة مصادر خاصة نتيجة لتكثف الرطوبة عليه عندما يكون بارداً . ويشكل الماء الحر أو غير الممتزج خطراً كبيراً في الطائرات، حيث إنه يتجمد عند درجات حرارة تقل عن صفر مئوية ، مما يؤدي إلى سد الفتحات أو المصافي أو المرشحات . كما أن وجود الماء يقود إلى نمو الميكروبات في الأجزاء الراكدة من نظام الوقود، لذلك يبذل جهد كبير لنزع كل المياه غير الممتزجة بواسطة فواصل ترشيح قبل تعبئة الطائرة بالوقود.

* **تثبيط النمو الميكروبي (Microbial Growth Inhibition) :** وذلك بإزالة الكائنات الدقيقة الحية (بكتيريا وفطريات) الموجودة بصورة دائمة في الهواء والماء. وتعد المواد الصلبة المتشكلة بواسطة النمو الحيوي شديدة الفعالية في سد مصافي الوقود. كما تولّد بعض الكائنات الدقيقة الحية منتجات ثانوية حمضية يمكنها تسريع تآكل المعدن. وبما أن معظم الكائنات الحية تحتاج إلى مياه حرة لكي تنمو، فإن النمو الحيوي يتركز عادة في المنطقة بين سطحي الماء والوقود. وتتغذى هذه الكائنات الحية على الوقود والماء ومغذيات أساسية محددة مثل الفوسفور الذي يجب خفضه للحد من النمو الحيوي. كما تشجع درجات الحرارة فوق العادية على النمو الحيوي.

تعد الوقاية أفضل وسيلة للحد من التلوث الميكروبي، وذلك بجعل كمية الماء الحر في خزانات الوقود أقل ما يمكن. أما عندما تكون نسبة الكائنات الحية مرتفعة، فإنه يمكن استخدام مادة متلفة للحياة (biocide) تحت ظروف محددة. مع نزع الكتلة الحية المتجمعة لتجنب انسداد المرشحات.

● مضافات الوقود النفاث

يتم إضافة بعض المواد بصورة إجبارية، وبعضها بصورة اختيارية. ويبين الجدول (٤) قائمة بالمواد المضافة التي ينصح باستخدامها في بعض مواصفات الوقود النفاث الرئيسة.

يعد استخدام المواد المضافة الاختلاف الأساسي بين الوقود النفاث التجاري والوقود النفاث الحربي. يحتوي الوقود النفاث الحربي الأمريكي على ثلاث مواد مضافة أو أكثر ، أما الوقود الدولي النفاث (Jet A-1) فيضاف إليه مبدد إستاتي (Static Dissipator)، كما يمكن أن يحتوي أيضاً على مضاد أكسدة. من جانب آخر لايحتوي الوقود النفاث (Jet A) عادة على أي مضاف، وأحياناً يحتوي فقط على مضاد أكسدة.

* **مانع تجمد نظام الوقود :** يمكن للجليد أن يتشكل في خزانات الوقود عند درجات الحرارة شديدة الانخفاض عند الارتفاعات العالية ، وينتج ذلك من الماء الذائب في الوقود. وتحتوي معظم الطائرات التجارية على مسخنات عند المرشحات الرئيسة للوقود من أجل صهر أي جليد متشكل. ومع ذلك فإن العديد من الطائرات الحربية لاتحتوي على هذه المسخنات مما يجعلها معرضة لانخفاض تدفق الوقود عند تشكل بلورات الجليد. لذلك تستخدم مواد مانعة لتجمد الوقود تقوم بخفض نقطة تجمده. ويستخدم ثنائي إثيلين جليكول أحادي ميثل إيثر (di-EGME) كمانع لتجمد وقود الـ (Jet A)، (Jet A-1)، والوقود الحربي الأمريكي.

وتستخدم مادة مشابهة هي الإيثلين جليكول أحادي إثيل إيثر في الوقود الروسي TS-1. كما تضاف مادة الإيثلين جليكول ثنائي مثيل إيثر (١، ٢- ثنائي ميتوكسي الإيثان) وبتركيز يتراوح بين ٠,١-٠,١٥٪ حجماً. وتكمن المشكلة الأساسية لهذه المضافات في إمكانية استخلاصها بواسطة الماء الحر. ولتجنب تماسها مع الماء تتم إضافتها للوقود في المطار أو أثناء تزويد الطائرة بالوقود.

* **مثبتات حرارية:** يستخدم الوقود النفاث كوسيلة تصريف حرارية في المحركات التوربينية. وتعاني المحركات المستخدمة في الطائرات الحربية عالية الأداء من إجهاد حراري مرتفع على الوقود. لذلك بدأت القوى الجوية الأمريكية في مطلع التسعينات برنامجاً لتطوير وقود ذي ثبات حراري محسن بإدخال مجموعة مضافات تحسن الثبات الحراري للوقود بمقدار ٥٥مْ تقريباً من ١٦٣مْ إلى ٢١٨مْ . يعرف المضاف المستخدم باسم (+100)

نوع المادة المضافة	Jet A (ASTM D1655)	Jet A-1 (DEF STAN 91-91)	JP- 4 (MIL-DTL 5624)	JP- 5 (MIL-DTL 5624)	JP- 8 (MIL-DTL 83133)
مانع أكسدة	مسموح	مطلوب**	مطلوب**	مطلوب	مطلوب**
مثبط المعدن	مسموح	مسموح	بالاتفاق	بالاتفاق	بالاتفاق
موصلية كهربائية/مبدد إستاتي	مسموح	مطلوب	مطلوب	بالاتفاق	مطلوب
مانع التآكل/محسن إنزلاق	غير مسموح	بالاتفاق	مطلوب	مطلوب	مطلوب
مانع تجمد نظام الوقود	بالاتفاق	بالاتفاق	مطلوب	مطلوب	مطلوب
مبيد حيوي	بالاتفاق	بالاتفاق	غير مسموح	غير مسموح	غير مسموح
مثبت حراري	غير مسموح	غير مسموح	غير مسموح	غير مسموح	غير مسموح ++

** تعني أنه مطلوب في أي وقود أو مكون وقودي أجريت عليه عملية هدرجة، وإلا فإنه اختياري.
++ عند استخدام مضاف التثبيت الحراري في الوقود JP-8 يطلق عليه إسم JP-8+100.

● جدول (٤) أنماط المضافات الموافق عليها في الوقود النفاث.

ويسمى وقود القوى الجوية الأمريكي الحاوي على هذا المضاف باسم (JP8 +100).

* **مضادات أكسدة :** يتطلب الوقود المعالج بالهيدروجين لنزع المركبتانات (يؤدي لنزع مضادات الأكسدة الطبيعية الموجودة في الوقود) إضافة مضادات أكسدة، وذلك بعد معالجته بالهيدروجين. وهذه المضادات عبارة عن فينولات معاقة ثانوية وثالثية تكون فعالة بالدرجة الأولى أثناء تخزينها وليس خلال استخدامها تحت درجة حرارة مرتفعة. تسمح مواصفات الـ (ASTM) باستخدام هذه المضادات ويبلغ العيار الأقصى المسموح باستخدامه منها ٢٤ملجم/لتر.

* **مخمدات المعدن :** وتستخدم بهدف جعل المعادن النزرة غير فعالة كيميائياً ، وذلك بتخليبها وتحويلها إلى معقدات ثابتة، والمخمد الوحيد المتفق على استخدامه هو: N،N – ثنائي ساليسيليدين – ١، ٢ – ثنائي أمينو البروبان. ويسمح باستخدامه بتركيز أقصى ٥,٧ملجم/لتر، إلا أنه لا يستخدم إلا نادراً.

* **مثبطات التآكل ومحسنات التزليق:** وهي أحماض ثنائية القاعدة، تعمل كمثبطات صدأ في الطور السائل، وتمنع الماء الحر والأكسجين الموجودين في الوقود من أن يؤديا إلى صدأ أو تآكل الخزانات والأنابيب. وتضاف محسنات التزليق أحياناً في المطار مباشرة قبل تزويد الطائرة بالوقود. تبنى خزانات وخطوط أنابيب نظام توزيع الوقود النفاث في البداية من حديد غير قابل للصدأ ودون طلاء.

* **محسنات الناقلية الكهربائية:** حيث يكون المضافان المتفق على استخدامهما هما (Shell ASA3) و (Du Pont Stadis 450)، ويستخدمان بنسب ١ملجم/لتر للأول ، و ٣ملجم/لتر للثاني كحد أقصى. ويؤخذ بالاعتبار عند اختيار نسبة الإضافة ازدياد ناقلية الوقود عند ارتفاع درجة حرارته والعكس عند برودته.

* **مضافات متلفة للحياة:** يمكن للكائنات الدقيقة التي تتفاعل حيوياً مع المركبات الهيدروكربونية أن تتواجد في كل من أنظمة الوقود الأرضية أو أنظمة وقود الطائرات. وتتسبب بعض الجراثيم اللاهوائية التي تقوم بإرجاع الكبريتات إلى كبريتيد الهيدروجين بتآكل النحاس والفضة. كما يسبب تشكل الأوحال، والطلاءات الفطرية، والمنتجات الثانوية الأكالة التي تؤدي لتآكل خزان الجناح، وإلى تعطل مقياس السعة.

تعد مادة (U.S. Borax ، Biobor JF) المادة الوحيدة الذوابة في الوقود المتلفة للحياة، والتي يسمح بها بصورة عامة ، وهي خليط مكون من ٩٥٪ من الديوكسابورينان (dioxaborinanes) و ٥٪ نفثا. والعيار الذي ينصح باستخدامه لقتل الكائنات الدقيقة الحية هو ٢٢٦ملجم/لتر، أما العيار المستخدم للوقاية فهو ١٠٨ملجم/لتر.

* **مضافات مانعة للضباب:** وهي تمنع تشكل قطيرات الوقود الدقيقة اللهوبة أثناء تحطم الطائرة مما يؤدي لخفض حدة الحريق. ولاتزال هذه المضافات في أطوار التجربة. وأفضل ما تم تحقيقه باستخدام مادة (ICI, FM-9) وهي عبارة عن بوليمر مرتفع الوزن الجزيئي وبعيار أقل من ٠,٥٪ حجماً. وعلى الرغم من الحصول على خصائص مانعة للضباب إلا أن مشاكل الاستخدام لاتزال مستمرة.

● شكل (٣): ترتيب خزانات الوقود في طائرة بوينغ (400 -747).

● استهلاك الوقود النفاث

ازداد استهلاك الوقود النفاث في الولايات المتحدة أكثر من الضعف خلال الـ ٢٥ سنة الماضية ، وذلك من ٣٢ مليون جالون يومياً عام ١٩٧٤م ، إلى ٧٠ مليون جالون يومياً سنة ١٩٩٩م ، وقد حدثت غالبية هذه الزيادة منذ سنة ١٩٨٤م.

وفيما يتعلق بالاستخدام العالمي للوقود النفاث فإن المعلومات تقتصر فقط على الفترة الواقعة بعد سنة ١٩٨٩م، فقد وصل الاستهلاك العالمي عام ١٩٩٨م إلى حوالي ١٧٨ مليون جالون يومياً ، أي بزيادة مقدارها حوالي ١٣٪ عما كانت عليه سنة ١٩٩٠م . ويعتبر استهلاك الولايات المتحدة الأكبر ويبلغ حوالي ٣٨٪ من الاستهلاك العالمي.

خزانات الوقود

تخزن الطائرات التجارية الوقود في أجنحتها، ويظهر الشكل (٣) ترتيب خزانات الوقود في طائرة بوينغ (400-747) ، حيث يوجد خزانان رئيسيان وخزان احتياطي واحد في كل جناح إضافة إلى خزان الجناح المركزي في جذع الطائرة. كما تتمتع بعض طائرات البوينغ (400-747) أيضاً بخزان وقود إضافي في المثبت الأفقي للذيل.

وقود الطائرات المستقبلي

يمكن التفكير على المدى البعيد بأنواع الوقود الصاروخي مثل الهيدرجين السائل أو الميثان السائل. ويتميز كلاهما بخصائص احتراق ممتازة، إلا أنها تتطلب أنظمة توزيع وطرق تعامل أرضي جديدة كلياً، إضافة إلى طائرات مختلفة جذرياً. يتميز الهيدروجين بكونه متاحاً بصورة غير محدودة إلا أنه يتطلب معدات تصنيع جديدة.