

دراسة ونمذجة عملية تشكل الكربون عند احتراق الوقود في المحركات

الدكتور عارف علي*

الدكتور ياسر حسن**

(تاريخ الإيداع 7 / 11 / 2012. قُبل للنشر في 25 / 2 / 2013)

▽ ملخص ▽

يقدم احتراق الوقود الهيدروكربوني في الوقت الحاضر القسم الأكبر من الطاقة اللازمة والمستهلكة في العالم خصوصاً في محركات وسائل النقل، والتي سيقى الوقود الهيدروكربوني كما يبدو في المستقبل المنظور مصدراً وحيداً للطاقة فيها، وهذا ما يستدعي العمل على تطوير عملية احتراق الوقود في حبر الاحتراق المختلفة تماشياً مع المتطلبات البيئية المتزايدة في الآونة الأخيرة.

يعتبر هباب الفحم الناتج عن عملية الاحتراق واحداً من أهم ملوثات الوسط المحيط، وذلك لثبات تأثيره وإمكانية تشبع السطوح الكربونية بالمواد المسرطنة شديدة الضرر. لهذا فإن البحث يقدم دراسة حول تشكل الكربون (هباب الفحم) عند احتراق الوقود في المحركات ويضع موديلاً رياضياً يصف تلك العملية المعقدة ودراسة للعوامل المختلفة المؤثرة على نشأته، حيث أمكن وضع تصور لما يمكن إجراؤه لتحسين عملية الاحتراق في المحركات بغية تحسين أدائها وتخفيف التلوث الناتج عنها.

الكلمات مفتاحية: الكربون، هباب الفحم، جبهة اللهب، البؤر الوليدة، الهيدروكربونات.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** مدرس - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Studying and modeling of the carbon formation process during fuel burning in engines

Dr. Aref Ali*
Dr. Yasser Hassan**

(Received 7 / 11 / 2012. Accepted 25 / 2 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

Hydrocarbon burning nowadays has a great part of the required energy consumed in the world, mainly in the transport vehicle engines, which seems to be the main source in the future. This urges us develop the fuel burning in different internal combustion engines according to the environmental increasing requirements nowadays. The carbon fine-dust produced is the main source of the environmental pollutants, which could be considered as the main cause of cancer. Therefore our present paper deals with the way of carbon fine-dust formation during fuel burning in engines and gives a mathematical model describing that complex method, and studying the different function affecting its formation, the aim is to find a way to develop the burning process in engines and increase its working and decrease the pollution produced.

Keywords: carbon, carbon fine-dust, flames-front, focus formation, Hydrocarbon.

* Associate Professor, Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Assistant Professor, Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تترافق زيادة النشاط البشري مع تزايد الطلب على عمليات نقل الركاب والحمولات، حيث أصبحت تستخدم وسائل النقل العاملة على محركات الديزل بشكل كبير في الآونة الأخيرة، إضافة إلى أنها تزود أكثر من خمسين بالمائة من السيارات المتوسطة والخفيفة المنتجة حديثاً بمحركات تعمل على وقود الديزل.

تساهم محركات الديزل بنصيب كبير من تلوث الوسط المحيط بالمركبات والغازات الضارة الناتجة عن عملية احتراق الوقود فيها. ومن أهم تلك الغازات والمركبات: أكاسيد الآزوت NO_x ، أول أكسيد الكربون CO ، وثاني أكسيد الكربون CO_2 ، والهيدروكربونات غير المحترقة C_nH_m ، كما تنتشر مركبات صلبة من أهمها جزيئات الكربون الجاف أو هباب الفحم C والتي تشكل الدخان الأسود الناتج عن عملية الاحتراق في محركات الديزل. لهذا تحظى الدراسات المتعلقة بتخفيف التلوث الناتج عن عمل محركات الاحتراق الداخلي بأهمية بالغة في وقتنا الحاضر، نظراً للقيود الشديدة الموضوعة على طرح المركبات الملوثة في الهواء الجوي بسبب ضررها الشديد على البيئة وصحة الإنسان.

يجري العمل من أجل تخفيف التلوث الصادر عن المحركات في ثلاثة توجهات رئيسية: تصميم محركات قليلة التلوث، معالجة الغازات والمركبات الضارة الناتجة وتحييدها، وإيجاد أنواع جديدة من الوقود تكون أقل تلويثاً للوسط المحيط عند احتراقها.

تتطلب تلك التوجهات دراسة كافية للمركبات الملوثة وآلية تشكلها ونشوتها في المحركات وبناءً على ذلك محاولة تحقيق دورة عمل للمحركات تكون فيها عملية الاحتراق أكثر تماماً وكاملاً مع إدخال كل العوامل التصميمية والعيارية والاستثمارية المؤثرة، حيث يندرج البحث ضمن هذا الإطار.

تتألف عملية تشكل الكربون الجاف واحتراقه عند حرق أنواع الوقود الهيدروكربوني بشكل عام من جملة عمليات معقدة فيزيائية وكيميائية والتي تُعتبر حتى الآن غير مدروسة بشكل كافٍ، إلا أنه في السنوات الأخيرة وبالرغم من أنه يجري اهتمام بالدراسات النظرية والتجريبية حول هذه المسألة، ووجود بعض التقدم في ذلك، فإنه لا تزال هناك حاجة لوضع نماذج رياضية لعمليات تشكل الكربون الجاف واحتراقه عند عمل محركات الاحتراق الداخلي والتجهيزات الأخرى لإحراق الوقود إضافة إلى ضرورة إيجاد طرق للتوجيه والتحكم بتلك العمليات بهدف تقليل تشكل الكربون الجاف إلا في تلك العمليات الإنتاجية والتي يكون هدفها إنتاج الكربون الجاف من أجل بعض الاستخدامات الصناعية فيكون الهدف عندها على العكس تسريع تشكل الكربون وزيادته.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى دراسة تشكل الكربون الجاف عند عملية احتراق الوقود ووضع موديل رياضي يصف هذه العملية ويحددها، ويحدد الكميات المطروحة من هباب الفحم مع المقارنة بالأبحاث التجريبية التي أجريت على المحركات واقتراح الطرق الممكنة لتنظيم عملية الاحتراق بهدف تقليل طرح واحدٍ من أهم المركبات الملوثة الصادرة مع غازات العادم في محركات الديزل وهو هباب الفحم.

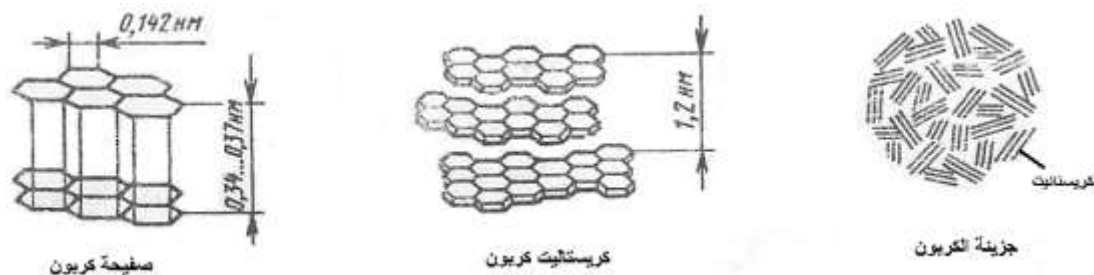
طريقة البحث ومواده:

يعتمد البحث طريقة تحليلية علمية للعمليات الفيزيائية والكيميائية عند تشكل هباب الفحم لوضع موديل رياضي ناظم لتلك العملية ثم تحويله إلى برنامج حسابي يوفر تقييم إمكانية نشوء هباب الفحم والكميات المتشكلة منه عند احتراق الوقود الهيدروكربوني وبالتالي تقييم مدى اكتمال عملية الاحتراق وتأثيرها على دورة عمل المحرك بشكل كامل. نظرة حول تشكل هباب الفحم عند الاحتراق:

لقد وفر استخدام الطرق الحديثة في اختبار شعلة الاحتراق ومنها الميكروسكوبات الالكترونية والأشعة والتحليل الطيفي وغيرها، الحصول على تصور كافٍ عن الأبعاد والبنية والخصائص الفيزيائية والكيميائية لجزيئات الكربون الناتجة، وتستخدم عادةً طريقتان. إحداهما تعتمد على التعامل المباشر مع عينات من شعلة الاحتراق بالنقاط جزيئات الكربون من الشعلة على صفائح خاصة يتم فيما بعد تصويرها ودراستها تحت المجهر الالكتروني والطريقة الثانية تصوير بالأشعة والعدسات معتمدين على خصائص عبور طاقة الأشعة وامتصاصها في الوسط الذي تتوزع فيه جزيئات الكربون. اعتماداً على هذه الطرق تم التوصل إلى أن أبعاد جزيئات الكربون وتبعاً لعملية تنظيم احتراق الوقود يمكن أن تتراوح بين 1 وحتى 1000 نانومتر لكن أصغرها بين 1 و 1.5 نانومتر حيث يتواجد ضمن هذا القياس من 50 – 160 ذرة كربون. أما أشكالها فقد تكون كروية أو قريبة من ذلك أو بشكل سلاسل مثل تركيبة القطن أو بشكل خلايا مسدسة أو خيطية وغيرها من الأشكال البنوية الأخرى وقد يلعب الدور الهام هنا طريقة النقاط الجزيئات قبل فحصها وتصويرها لكن الشكل الغالب لجزيئات الكربون الناتجة عن الاحتراق في حجرة احتراق المحركات فهو الكروي بقطر 20 – 40 نانومتر [1] بينما تكون الأشكال الأخرى المعقدة موافقة للمراحل اللاحقة من إعادة تشكيل الجزيئات الكروية.

بيّن التحليل الكيميائي للكربون الناتج بأنه يحوي % (99 – 94) من تركيبه كربون C و % (3 – 0.5) هيدروجين H وقليلاً من الأوكسجين O_2 إضافة إلى عناصر أخرى من الرماد، وتتغير النسبة $\frac{C}{H}$ من 3 إلى 15 ولهذا فإنه يمكن النظر إلى الكربون على انه مركب هيدروكربوني قاسٍ أو مادة كربونية قاسية. بينما تعتبر تسمية الكربون القاسي أو المنتشر والمستخدمة أحياناً غير دقيقة. أما نحن فنعتمد في هذا البحث تسمية الكربون الجاف والمقصود به الجزيئات القريبة في تركيبها إلى الكربون الصافي C بشكل غير منحل ومتواجد كجزيئات مستقلة متطايرة مع غازات الاحتراق.

تحوي جزيئات الكربون الوليد المتشكلة في بداية تطور شعلة الاحتراق على الهيدروجين بحيث أن جزيئات الكربون ذات القطر 1.5 نانومتر تتمتع بنسبة $\frac{C}{H} \approx 3$ وتتراوح كثافتها حسب وجود الهيدروجين في حدود $\rho_s = (1.8 - 2) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ أما شكل جزيئات الكربون فهو يشبه بلورات الغرافيت ذات البعد بين الذرات 0.142 نانومتر لكنها متوضعة بحيث تشكل طبقات تبعد عن بعضها 0.34 – 0.37 نانومتر وبحيث تشكل طبقتان متجاورتان منها ما ندعوه بشريحة الكربون كما تشكل عدة شرائح بدورها ما ندعوه بكريستاليت الكربون وتملك البلورة المؤلفه من 10 – 2 شرائح سماكة قدرها 3 - 1.2 نانومتر. كما أن الجزيئة الكروية من الكربون المتبلورة وذات القطر 20 – 30 نانومتر تحوي 103 – 104 بلورة وتتألف من مليون ذرة كربون تقريباً ويعد توضع بلورات الكربون بالنسبة لبعضها عشوائياً [1].



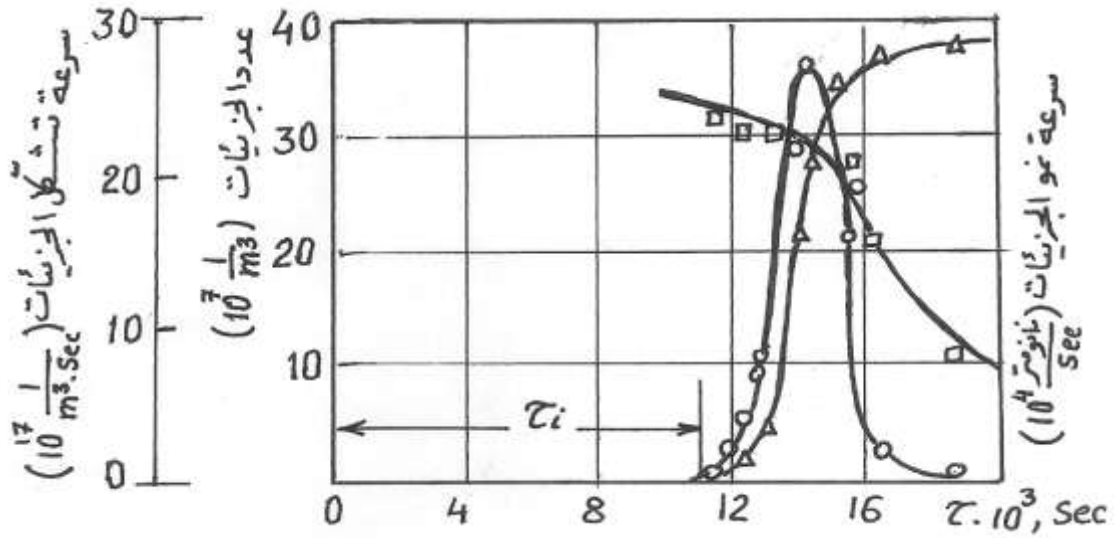
الشكل (1) توضع بلورات الكربون

مكنت الأبحاث [1] من تحديد نظام معين لتوضع الكريستالات في جزيئات الكربون معقدة الشكل بحيث يتوضع على محيط الجزيئة طبقة منحنية من الكريستالات وفي الداخل تكون الكريستالات متوضعة بشكل غير منتظم حول بعض المراكز. ترتبط تلك البنية بعملية تجمع الجزيئات وتطورها مع التي سبقتها في التشكل والحاوية على كمية أقل من الهيدروجين لكنها تملك انتظاماً أكثر في البنية. يعني هذا أن زيادة زمن تواجد جزيئات الكربون في ظروف درجات حرارة عالية يجعل بنيتها الداخلية أكثر انتظاماً وهذا ما يؤكد أيضاً عملية التحول إلى غرافيت عند التأثير الحراري على الكربون وطرد ذرات الهيدروجين من بنيتها. بهذا الشكل يمكن التوصل الى نتيجة بأن الكربون الجاف (السخام) يملك طاقة حرة أكبر مما هو عليه الغرافيت، حيث تكون أقل قيمة للنسبة $\frac{C}{H}$ له هي 3. كما يتمتع بخاصة امتصاص عالية خصوصاً لذرات الكربون حديثة التشكل التي تمتص كمية كبيرة من الهيدروكربونات الخفيفة تصل نسبتها إلى 30% من ذرة الكربون إضافة إلى امتصاصها لأنواع الهيدروكربونات المسرطنة أيضاً ولعل هذه الخاصية هي ما تجعل الكربون شديد الضرر والتأثير على صحة الإنسان مما يتطلب دراسته ووضع السبل لتخفيف تواجده في الغازات الصادرة عن عمل المحركات. تلك التي يتوفر في حجر الاحتراق فيها وكما في أفران حرق الوقود الهيدروكربوني الأخرى كل الظروف الفيزيائية والكيميائية لتشكيل الكربون، بنفس الوقت فقد بينت دراسة المناطق من شعلة الاحتراق أنه يمكن الحصول على خصائص مختلفة لذرات الكربون المتشكلة وهذا ما يتعلق بتطور عملية تشكلها مع الزمن.

توجد عدة طرق لتشكيل الكربون تتبع للشروط السائدة والخصائص الفيزيائية لتلك العملية، ومن أبرز تلك الطرق الطريقة الفيزيائية الكيميائية كسلسلة تفاعلات [3] وهي تتألف من ثلاث مراحل: نشوء الجذور الأولية، نشوء الكربون الوليد من الجذور الأولية، نمو جزيئات الكربون المتولدة.

في المرحلة الأولى: ينشأ نتيجة لتفكك الوقود العضوي وتفاعلات الأكسدة الأولية جذور أولية وليدة تعتبر الحلقة المرحلية لتشكيل الكربون وهذه الجذور قد تكون C_2 , C_3 , C_2H إضافة إلى مركبات عطرية، تلك التي فقدت استقرارها نتيجة لخروج بعض ذرات الكربون منها. يحدث ذلك في مجال درجات حرارة 1700 – 1800 K حيث يتم فيه التفكك الكامل للمركبات الهيدروكربونية العطرية مع تشكل للكربون وانطلاق الهيدروجين خلال أجزاء بالألف من الثانية. أما المرحلة الثانية فهي مرحلة تشكل الجذور الأولية ونموها حيث تمتع سطوحها بصفة فيزيائية تسمح بتجمعها ونموها ولذلك فهي متغيرة بشكل دائم وبحيث يزداد وزن هذه الجذور من مرحلة إلى أخرى مشكلة الجزيئة الصغرى من الكربون تلك التي نسميها الوليدة والتي تكون أبعادها 1.5 نانومتر وتحوي حوالي 50 ذرة كربون [2]. بينما تتضمن المرحلة الثالثة سلسلة تفاعلات كيميائية تؤدي لتفكك الهيدروكربونات وانحسار جذورها على سطوح جزيئات الكربون وهنا تشارك جزيئات أبسط الهيدروكربونات المشكّلة للوقود (أستيلين، والميثان) في تجمع جزيئات الكربون.

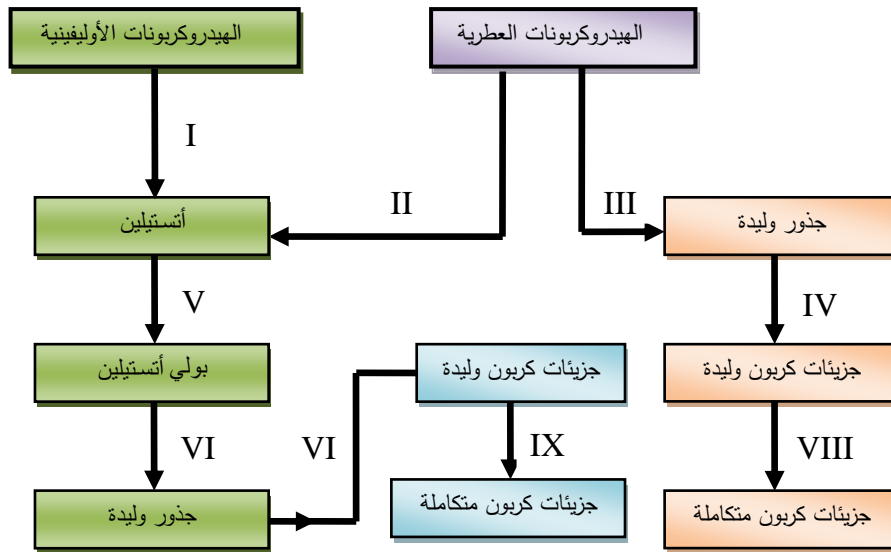
دلت التجارب على أن هذه المراحل الثلاثة تتم في زمن قصير جداً وأنه توجد مرحلة تأخر τ_i في البداية يتم فيها تخزين وتجمع للطاقة قبل أن تبدأ سرعة التشكل بالزيادة الحادة وتزداد سرعة نمو الجزيئات المتشكلة [2] الشكل (2).



الشكل (2) مواصفات تشكل الكربون مع احتراق مركب التولون الهيدروكربوني.

O - سرعة تشكل جزيئات الكربون ، Δ - عدد جزيئات الكربون المتشكلة ، □ - سرعة نمو جزيئات الكربون

بناءً على ما تقدم فإنه يمكن اعتبار أن الطريقة الفيزيائية الكيميائية لتشكيل الكربون تحظى باعتراف أكبر من غيرها من الطرق والتي يمكن تمثيلها بشكل مختصر وفق المخطط المبسط التالي الشكل (3).



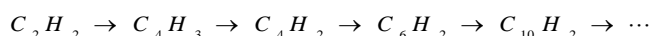
الشكل (3) مخطط تشكل الكربون وفق الطريقة الفيزيائية الكيميائية لاحتراق الوقود.

في المراحل I, II يتم تسخين الوقود في الشعلة وأكسدته وتفككه حرارياً وهي عمليات كبيرة العدد لا يمكن تحديد الزمن اللازم لحدوثها بشكل دقيق حيث تتم الأكسدة والتفكك حسب تركيب الوقود والمركبات الهيدروكربونية الداخلة فيه.

المرحلة الثالثة III تشكل المركبات الهيدروكربونية العطرية وعند درجة حرارة $K > T$ (1750 ÷ 1800) وبعد انفصال جزيئات الهيدروجين في شعلة الاحتراق جنوراً ذات تركيبة عطرية تلك التي تكون جاهزة بدورها لعملية بلمرة ببنية ذرية مختلفة ما هي إلا الجذور الوليدة للكربون.

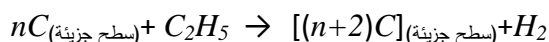
المراحل VII, IV يسبب انضمام الجذور الهيدروكربونية والهيدروكربونات الخفيفة إلى الجذور الوليدة زيادة في وزنها والتي تشكل بدورها جزيئات الكربون الوليدة بمقاسات 1.0 – 1.5 نانومتر وتجري هذه العملية بسرعة كبيرة.

المرحلة VI – V تجري بلمرة متتابعة للأنتستلين وفق الآلية المتسلسلة التالية:



ونتيجة لاتحاد الجذور الهيدروكربونية مع البولي أنتستلين تتشكل مركبات أكثر تعقيداً تأخذ البنية الحلقية التي تشكل الجذور الوليدة.

المرحلة IX – VIII عبارة عن عملية يتم فيها نمو جزيئات الكربون من جراء تحلل الهيدروكربونات ومنها الأنتستيلين على سطوح هذه الجزيئات ويمكن تمثيل هذه العملية بالشكل:



تتبادل جزيئات الكربون بنفس الطريقة التفاعل مع الهيدروكربونات الخفيفة والعطرية والبولي أنتستلين ويزداد حجمها بالتدريج حتى تصل إلى الحالة الصلبة ضمن شعلة الاحتراق عندما يتوفر التركيز الأكثر توازناً لها، ثم يتم لاحقاً عملية تجميع لهذه الجزيئات المستقلة لتصبح ذات مقاسات أكبر وبأشكال مختلفة ولهذا السبب فإنه تصادف في شعلة الاحتراق لوقود الديزل جزيئات من الكربون ذات أبعاد تتراوح من بضعة نانومترات إلى بضعة ميكرومترات.

تجدر الإشارة إلى أنه توجد طرق أخرى تبحث في تشكل الكربون أثناء عملية الاحتراق وهي تعتمد على مبدأ تكاثف أبخرة الوقود الهيدروكربوني وعملية البلورة للجزيئات المختلفة الناتجة عن احتراق الوقود [1] لكنها تبقى في الدرجة الثانية بعدما تقدمنا بعرضنا السابق.

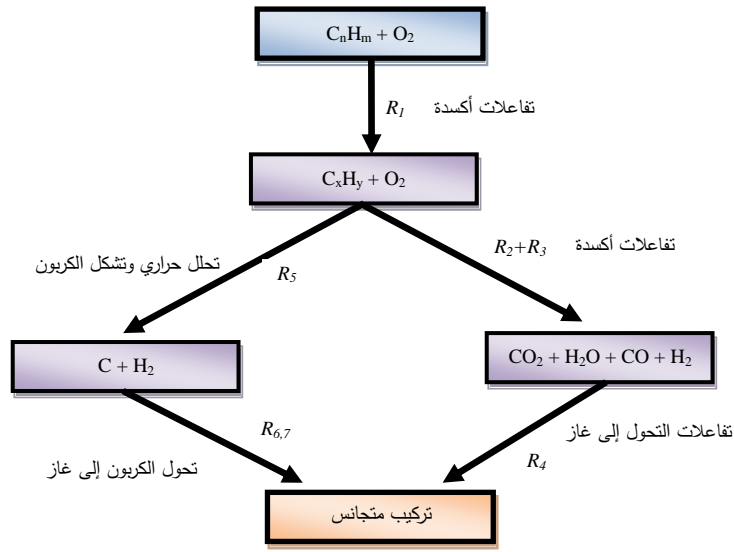
الموديل الرياضي لتشكيل الكربون:

تتشكل شعلة احتراق الوقود الهيدروكربوني بعد اختلاطه مع الهواء في المحركات وتتوقف على نسبة كلا المركبين طبيعة المزيج، فقد يكون متجانساً أو فقيراً أو غنياً بالوقود ويختلف تبعاً لذلك تشكل الكربون عند عملية الاحتراق، لكنه يمكن تحديد طابع عام لهذه العملية ووصفها بموديل محدد.

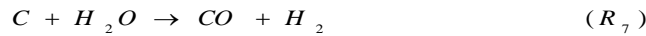
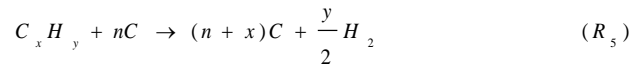
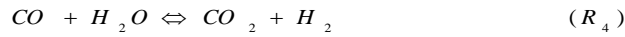
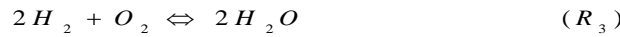
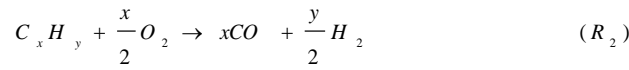
تبين الحسابات الترموديناميكية لتركيب نواتج الاحتراق المتوازن عن إمكانية تشكل الكربون الجاف عند نسبة لذرات الكربون C إلى ذرات الأوكسجين O في حدود $1 < C/O$ أو تبعاً لمعادلة:

$$C_m H_n + yO_2 + 2yCO + \frac{n}{2}H_2 + (m - 2y)C \quad \text{عندما } m > 2y$$

تكون حدود α عادة بالنسبة للشحنة المتجانسة أكبر من تلك التي لا يتشكل معها الكربون والتي نسميها حدود ظهور الكربون α_c ، وتجدر الإشارة هنا إلى أن الحدود العددية لـ α_c لا تتوقف عملياً على الضغط ودرجة الحرارة الأوليين كما بينت الحسابات الترموديناميكية، بينما دلت التجارب على نتيجة هامة بأن التركيز الكتلي للكربون المتشكل كنتاج مرحلي في التفاعلات الكيميائية يتحدد من التنافس بين عمليتين: تشكل الكربون وعملية تحوله إلى غاز كثنائي أكسيد الكربون أو بخار الماء. تعتبر الشحنة الغنية بالوقود في المحركات مصدراً أكبر لتشكيل الكربون ويصح من أجلها وضع موديل رياضي يستند على المخطط التالي [3]:



أي أن الوقود الأولي C_nH_m والمركب الهيدروكربوني المرحلي C_xH_y هي الأساس من أجل تفاعلات الأكسدة والتحلل الحراري ويعتمد مثل هذا المخطط في الأبحاث [4,5] حيث التفاعلات مع التحولات الغازية على الشكل التالي:



تعتبر عمليات التحول الحراري R_1 والتحول الغازي R_6, R_7 ممتصة للحرارة بينما عمليات الأكسدة R_2, R_3 وكذلك تشكل ونمو الكربون عند التفكك السطحي R_5 فهي عمليات طارحة للحرارة. تشكل التفاعلات R_1, R_2 سلسلة تفاعلات تكون عملية الأكسدة هي السائدة أو الأقوى فيها، وهي توفر الطاقة اللازمة لحدوث التفاعلات الأخرى، بينما تصف العملية R_5 مرحلة التكاثر من الهيدروكربونات الموجودة في الحالة الغازية والتي يبنى على أساسها الموديل الفيزيائي - الكيميائي لتشكيل الكربون وفقاً للعملية المتسلسلة لتفكك الجذور والمقترحة من قبل Tasnor [2].

تترافق عملية تشكل الكربون مع تفاعلات التحول إلى غاز في العمليات R_6, R_7 لكنه وبعد أن تتناقص سرعة التفاعلات R_5 وكنتيجة لاستهلاك الهيدروكربونات فإن التفاعلات الغازية تصبح هي السائدة عندها يتناقص محتوى الكربون، CO_2 ، H_2O وتتخفض درجة الحرارة ويقترب النظام إلى حالة التوازن الترموديناميكي وفي الحقيقة فإن التفاعلات R_1, R_7 تعتبر شاملة للمراحل المعقدة لآلية التشكل هذه.

من أجل الحصول على موديل رياضي بسيط لتشكل الكربون فإنه نعتد بعض الفرضيات إضافة إلى ما جرى عرضه سابقاً وهي:

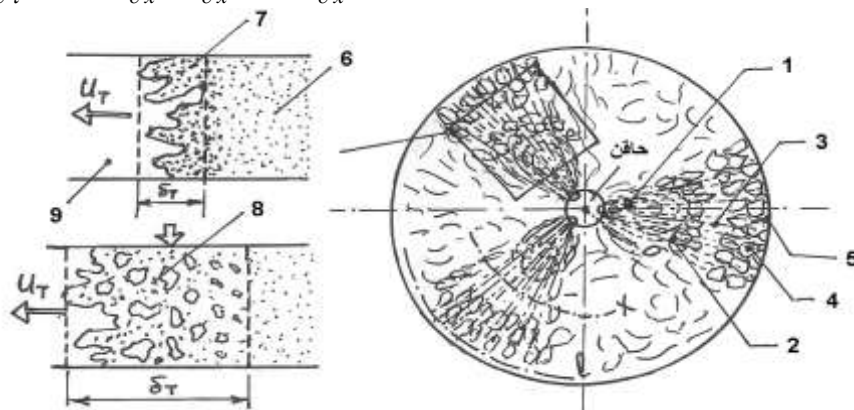
- أن حركة الغازات المتشكلة وحيدة البعد وتتم بشكل أدبياتي.
- أن تفاعلات الأكسدة تجري في جبهة اللهب ذات الجريان الصفائحي.
- أن تشكل الكربون يبدأ من اللحظة التي تستهلك فيها كامل كمية الأوكسجين.

وتسمح الفرضية الثالثة بتبسيط حل المسألة المطروحة من حيث تقسيمها إلى مرحلتين متتاليتين: الأولى وتتم في الجريان الصفائحي ويتحدد من خلالها كمية الهيدروكربونات المتبقية بدون أكسدة وكذلك تركيب ودرجة حرارة نواتج الاحتراق خلف جبهة اللهب. أما المرحلة الثانية ففيها يتشكل الكربون لاحظ الشكل (4) الذي يبين توزع المناطق المدروسة ضمن حجرة الاحتراق هذا وقد أكدت التجارب صحة هذا التقسيم.

تكون المسألة الأولى متضمنة وضع الموديل الرياضي لجبهة اللهب ذات الجريان الصفائحي والغنية بخلائط الهواء والهيدروكربونات وتوصف تركيبة اللهب الصفائحية بمعادلات انتقال الكتلة والحرارة والانتشار في وسط غير متجانس (مؤلف من طورين) والتي تأخذ الشكل التالي:

$$C_p \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} + B^* \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \phi \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \cdot g_i}{\partial \tau} + B^* \frac{\partial g_i}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \rho \cdot D_i \cdot \frac{\partial g_i}{\partial x} = \phi_i \quad i=1, \dots, N \quad (2)$$



الشكل (4) مقطع في حجرة الاحتراق يبين توزع اللهب عند احتراق الخليط.

- 1- منطقة الوقود السائل , 2- منطقة الجريان الصفائحي , 3- بداية اللهب , 4- كربون خلف منطقة اللهب (وسط انتشاري)
- 5- منطقة الجريان المضطرب , 6- نواتج الاحتراق , 7- جبهة اللهب عند اضطراب ضعيف , 8- جبهة اللهب عند اضطراب شديد
- 9- خليط جديد قابل للاشتعال , δ_T - عمق منطقة الاضطراب , u_T - سرعة انتشار اللهب المضطرب.

حيث:

C_p - السعة الحرارية تحت ضغط ثابت.

$B^* = \rho_o \cdot u_o$ - السرعة الكتلية لتدفق الوقود ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{sec}$).

ϕ, ϕ_i - عناصر أساسية مشتركة في العملية.

ρ - الكثافة (kg/m^3)

T - درجة الحرارة (K)

g_i - التركيز الكتلي (kg/m^3)

D_i - القطر (N.m)

τ - الزمن (sec)

على اعتبار أن عدد لويس يمثل القيمة:

$$L_e = \frac{C_p \cdot \rho \cdot D}{\lambda} = 1 \quad (3)$$

وأن عوامل الوسط الانتشاري متساوية من أجل جميع مكوناته $i=1, \dots, N$ و $D_i = D$ فإن المسألة تصبح أبسط بشكل كبير مع المحافظة على الخصائص الأساسية للظاهرة المدروسة أي تشكل الكربون الجاف عند الاحتراق. يمكن وصف معادلات الانتقال الحراري بمعادلات حفظ الانتالبي:

$$d \sum_i h_i g_i = 0 \quad (4)$$

كما تسمح معادلات حفظ الكتلة النسبية لكل من العناصر: الكربون C والأوكسجين O والهيدروجين H وكتابتها بالنسبة إلى كتل المشاركة في العمليات R_3, R_4 (المذكورة سابقاً) والموجودة في حالة توازن، تسمح بالحصول على العلاقة المتبادلة لتراكيز العناصر المشاركة في التفاعلات، وعلى اعتبار أن القيم التي نتجت عنها هي: $g_{H_2O}, g_{H_2}, g_{CO_2}, g_{CO}, g_{O_2}, g_{C_xH_y}, g_{C_nH_m}$ ودرجة الحرارة السائدة T فإنه يمكن وصف جبهة الاحتراق الصفائحي لخليط الوقود الهيدروكربوني مع الهواء بستة معادلات جبرية غير خطية ومعادلتين حديتين تصفان الوسط الانتشاري:

$$\Delta(g_{C_nH_m}) = \rho v_1 w_1 \quad (5)$$

$$\Delta(g_{C_xH_y}) = \rho (v_1 w_1 - v_2 w_2) \quad (6)$$

حيث :

v_i - معاملات تجانس

w_1, w_2 - سرعة التفاعلات R_2, R_1 على التوالي.

Δ - عامل التفاضل الذي يوافق معادلات الوسط الانتشاري:

$$\Delta = \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot \rho + \rho \cdot u \frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \cdot D \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (7)$$

وإذا أخذنا بعين الاعتبار دور مسألة الجريان الصفائحي في جبهة اللهب في تشكيل الكربون فإنه يمكن تحديد الشروط الحدية في المعادلات (5) , (6) على أساس فكرة أن خليطة الوقود والهواء الأولية تدخل في منطقة التفاعلات من المقطع الحدي اليساري ($X=0$) بينما نواتج التفاعلات R_7, \dots, R_1 تكون في الجانب الأيمن ($X=L$) ولا تحدث عندها تفاعلات احتراق أي أن $\dot{O}=0$ ومنه فإن الشروط الحدية تأخذ الشكل:

$$X=0, \quad g_i = \frac{\rho \cdot D}{B} - \frac{dg_i}{dx} = g_i \cdot 0 \quad (8)$$

$$X=L, \quad \frac{dg_i}{dx} = 0 \quad (9)$$

يسمح استخدام الصيغ غير الثابتة للمعادلات (5) , (6) وبإعطاء بعض القيم الأولية للمركبات الداخلة في التفاعل $g_i(0, x_i)$ وحساب العلاقات من (4) وحتى (9) بشكل مشترك حتى قيمة للزمن مطابقة للوضع عندما $0 = \frac{\partial \rho \cdot g_i}{\partial \tau}$ فإننا نحصل على حل المسألة المطروحة حتى توقف التفاعلات المنتجة للكربون والوصول إلى الوضع الحدي اليميني عندما ($X=L$) أي حالة نواتج الاحتراق.

تكون المسألة الثانية المطروحة هي إيجاد الموديل الرياضي لتشكل الكربون خلف جبهة اللهب الصفائحية حيث يمكن بناء طريقة الحساب هنا على أساس نتائج الأبحاث العلمية المطروحة سابقاً في هذا المجال [5,4] حول تشكل الكربون من الهيدروكربونات في الحالة الغازية، غير أن هذه الطريقة تسمح باعتبار العملية غير إيزوترمية وتدخل عملية التحول إلى غاز للكربون المتشكل مع نواتج الاحتراق مشكلة في نهاية الأمر الجسم العامل لعملية التوازن الترموديناميكي، كما تعتبر أيضاً عملية تجمع جزيئات الكربون حيث أظهرت نتائج تجارب عديدة ضرورة اعتبار تلك التأثيرات مجتمعة.

تعتبر نتائج الحساب التقريبي لتركيبية جبهة اللهب الصفائحية أي تركيبية ودرجة حرارة نواتج الاحتراق خلف جبهة اللهب كمعطيات أولية لحساب عملية تشكل الكربون، حيث يحصل في المرحلة التحريضية لتشكل الكربون عملية متسلسلة لنشوء الجذور الوليدة (البؤر) والتي يمكن وصفها بالعلاقة التالية [2] :

$$\frac{\partial n}{\partial \tau} = n_o + f \cdot n + g_o \cdot n^2 \quad (10)$$

$$n_o = N \cdot 10^{-3} \cdot e^{(-E_1 / R.T)} \quad (11)$$

حيث:

n_o - السرعة الذاتية لنشوء الجذور الوليدة

n - التركيز العددي للجذور الوليدة (1/m3)

N - التركيز العددي لجزيئات الكربون (1/m3)

R - ثابت الغازات العام (j/kg.k)

T - درجة الحرارة (K)

f - معامل التشعب الخطي لسلسلة التفاعلات

E_1 - طاقة التنشيط لتشكل الجذور الوليدة للكربون.

g_o - فهي معامل إحاطة الجذور الوليدة بجزيئات الكربون:

$$g_o = \pi \cdot D_r^2 \cdot \sqrt{\frac{8 RT}{\pi \cdot M_1}} \quad (12)$$

حيث:

D_r - قطر الجذور الوليدة

M_1^* - الكتلة الجزيئية المحولة للجذور الوليدة المتصادمة مع بعضها.

تتحدد زيادة أبعاد البؤر الوليدة نتيجة لتصادمها مع الجزيئات الهيدروكربونية وفق العلاقة:

$$\frac{dD_r}{d\tau} = 2 \frac{m_{ca} \cdot x}{\rho_r} \left(\frac{r_a + D_r / 2}{D_r} \right) \cdot N \cdot \sqrt{\frac{8 RT}{\pi \cdot M_2}} e^{(-E_2 / RT)} \quad (13)$$

حيث:

$m_{ca} = 1.992684 \times 10^{-26} \text{ kg}$ كتلة ذرة الكربون.

x - عدد ذرات الكربون في جزيئة $CxHy$ الهيدروكربون.

r_a - القطر الفعال لجزيئة الكربون.

E_2 - طاقة التنشيط لعملية نمو الجذور الوليدة.

M_2^* - الكتلة الجزيئية المحولة للجذور الوليدة المتصادمة مع الجزيئات الهيدروكربونية.

كما توصف عملية تناقص تركيز الهيدروكربونات N في مرحلة التحريض بالعلاقة التالية:

$$\frac{dN}{d\tau} = -\pi \cdot n \cdot N \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T}{2\pi \cdot M_{CH}}} \left(r_a + \frac{D_r}{2}\right)^2 \cdot e^{(-E_2/RT)} \quad (14)$$

حيث:

M_{CH} - الكتلة الجزيئية المحولة للجزيئات الهيدروكربونات المتصادمة.

تتحول الجذور الوليدة الأولية إلى ذرات كربونية عندما يبلغ قطرها قيمة حرجة D_{cr} وهنا تنتهي المرحلة التحريضية حيث يتم وصف العمليات الحاصلة لاحقاً في النظام الترموديناميكي بمعادلات تفاضلية، وهي معادلات من أجل وصف تغير:

التركيز العددي للجزيئات الهيدروكربونية N ، التركيز الكتلي للهيدروكربونات C_xH_y ، التركيز العددي للجذور الوليدة n ، التركيز العددي لجزيئات الكربون N_C ، التركيز الكتلي للمركبات الغازية g_{CO_2} ، g_{CO} ، g_{H_2O} ، g_{H_2} ، التركيز الكتلي للكربون الجاف g_{cs} ، درجة حرارة نواتج الاحتراق T والقطر الأعظمي لجزيئة الكربون D_{Cmax} .

تعطى سرعة تغير التركيز العددي للجزيئة الهيدروكربونية وفق [9] بالعلاقة:

$$\frac{dN}{d\tau} = \left(\frac{\partial N}{\partial \tau}\right)_T - \frac{N \cdot dT}{T \cdot d\tau} \quad (15)$$

حيث:

$$\left(\frac{\partial N}{\partial \tau}\right)_T = -\pi \cdot N \cdot N_C \cdot e^{(-E_3/RT)} \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T}{2\pi \cdot M_{CH}}} \left(\frac{D_{cr} + D_{Cmax}}{2}\right)^2 - \frac{\partial N_C}{\partial \tau} \cdot \frac{\pi \cdot D_{cr}^3 \cdot \rho \cdot N_A}{6 \cdot m_c \cdot x} \quad (16)$$

حيث لدينا:

E_3 - طاقة التنشيط عند اصطدام الجزيئات الهيدروكربونية مع جزيئات الكربون.

N_A - عدد أفوكادرو.

$\left(\frac{\partial N}{\partial \tau}\right)_T$ - سرعة تغير التركيز العددي في الشروط الأيزوترمية (ثبات درجة الحرارة).

يصف الحد الأول من العلاقة السابقة سرعة استهلاك الجزيئات الهيدروكربونية من أجل النمو الكيميائي لذرات الكربون بينما يصف الحد الثاني استهلاكها على نشوء ونمو ذرات الكربون من الجذور الوليدة ذات القطر D_r إلى القطر الحرج D_{cr} .

تُحدد سرعة تغير التركيز الكتلي للهيدروكربونات بالعلاقة:

$$\frac{dg_{C_xH_y}}{d\tau} = \frac{10^6 R \cdot M_{CH} \cdot T}{P \cdot N_A \cdot M} \left(\frac{\partial N}{\partial \tau}\right)_T \quad (17)$$

حيث:

M - الكتلة الجزيئية الوسطية لنواتج الاحتراق.

توصف سرعة تشكل البؤر الوليدة بقطر يساوي القطر الحرج D_{cr} بعلاقة شبيهة بالعلاقة (10) لفترة تحريض تشكل الكربون:

$$\frac{\partial n}{\partial \tau} = n_o + (f - q)n - g_o (n')^2 - k \cdot N_C \cdot n \quad (18)$$

حيث تأخذ n_o, g_o القيم المشار إليها سابقاً بينما k فهو معامل يأخذ بعين الاعتبار سرعة فناء وانعدام الجزيئات الوليدة عند اصطدامها بسطوح ذرات الكربون أما q فهي معامل الانقطاع الخطي لسلسلة التفاعلات. تعطى سرعة تغير التركيز العددي لذرات الكربون:

$$\frac{dN_c}{d\tau} = \left(\frac{\partial N_c}{\partial \tau}\right)_T - \frac{N_c \cdot dT}{T \cdot d\tau} \quad (19)$$

وهنا تعطى القيمة:

$$\left(\frac{\partial N_c}{\partial \tau}\right)_T = \frac{\partial n}{\partial \tau} V - \frac{6}{5} k_{th} \cdot \psi^{1/6} \cdot N_c^{11/6} \quad (20)$$

حيث:

V - معامل يأخذ بالاعتبار تناقص سرعة نمو قطر الجذور الوليدة بسبب انخفاض تركيز الهيدروكربونات نسبة إلى سرعة نمو الجذور الوليدة في الفترة التحريضية.

يصف الحد الثاني في العلاقة (20) تناقص عدد ذرات الكربون تبعاً لتجمّعها وتؤخذ العلاقة التي تصف سرعة التجمع لجزيئات الكربون من [1] بالشكل:

$$k_{th} = \frac{5}{12} \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/16} \cdot \sqrt{\frac{6RT}{\rho_c}} \cdot G \cdot \alpha_f \quad (21)$$

$$\psi = \frac{10^6 \cdot \pi}{48} (D_{cr} + D_c)^3 \cdot N_c \quad (22)$$

حيث:

$$R = 1.380662 \times 10^{-3} \text{ j/K} - \text{ ثابت بولتسمان.}$$

G - معامل تركيز قوى تفتيت الذرات. (للذرات الكروية $G=2$)

α_f - مؤشر يعتبر شكل علاقة توزيع الذرات وفقاً لأقطارها ويؤخذ في

$$\text{حدود } \alpha_f = 6.55 .$$

من قانون حفظ الطاقة نحصل على درجة الحرارة T بالعلاقة:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\sum \frac{dg_i}{d\tau} \cdot h_i}{\sum C_{Pi} \cdot g_i} \quad (23)$$

حيث g_i, h_i, C_{Pi} - الحصة الكتلية، الانتالي النوعي، السعة الحرارية النوعية عند ضغط ثابت لنواتج الاحتراق على التوالي.

وتأخذ علاقة التركيز الكتلي الشكل التالي:

$$\frac{dg \cdot C_c}{d\tau} = W_5 - W_6 - W_7 \quad (24)$$

حيث:

C_c - الطرح الكتلي من هباب الفحم نسبة إلى الكربون في الوقود (kg/kg.carbon)

g - التركيز الكتلي.

$$W_5 = \frac{M_c}{M_{CH}} \cdot \frac{dC_x H_y}{d\tau} - \text{ سرعة تشكل جزيئات الكربون.}$$

W_6 - سرعة تحول جزيئات الكربون إلى غاز في العملية R_0

W_7 - سرعة تحول جزيئات الكربون إلى غاز وفقاً للعملية R_7

يعطى تغير قطر ذرات الكربون مع اعتبار الشكل الكروي لها بالعلاقة:

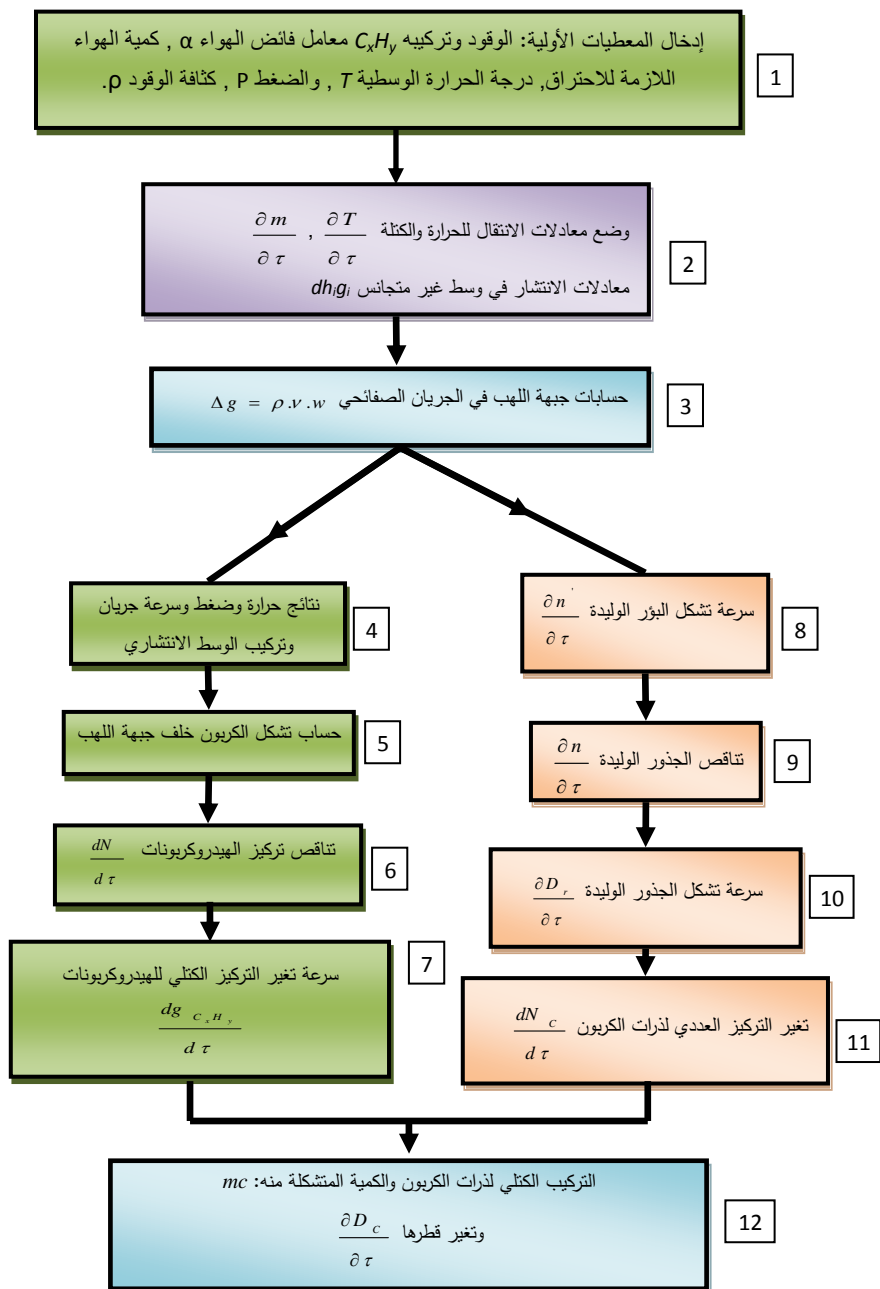
$$\frac{dD_c}{d\tau} = \frac{16 \times 10^{-16} P.M}{\pi \cdot \rho_c \cdot R \cdot N_c \cdot T \cdot (D_{cr} + D_c)^2} \cdot \frac{dgC_c}{d\tau} - \frac{D_{cr} + D_c}{3N_c} \left(\frac{\partial N_c}{\partial \tau} \right)_T \quad (25)$$

يصف الحد الثاني من الطرف اليميني في العلاقة السابقة سرعة تغير قطر ذرات الكربون في أثناء عملية تجمعها.

يتم حل نظام المعادلات التفاضلية المطروحة من الدرجة الأولى وبإضافة ثلاث معادلات تصف التعادل المادي للعناصر الكيميائية H, O, C مع علاقة قانون توازن الكتل المؤثرة من أجل العملية R_4 , باستخدام طريقة رانج غوتا RaNG-GoTTa المعروفة في حل جملة معادلات حلاً مشتركاً [6].

بهذا الشكل فإن دراسة المسألتين حول الجريان الصفائحي في جبهة اللهب وتشكل الكربون خلف جبهة اللهب تعبر عن الموديل الرياضي لتشكيل الكربون في خليطة غنية من الوقود الهيدروكربوني مع الهواء كما تسمح طريقة عرض التفاعلات الكيميائية $R1, \dots, R7$, والمعادلات المذكورة من (1) وحتى (25) بالوصف التقريبي لعملية تشكل الكربون في خلائط الوقود مع الهواء عند احتراقها وتحديد التراكيز فوق المتوازنة والمرحلية للكربون, وبخار الماء, وثاني أكسيد الكربون وكذلك درجة حرارة نواتج الاحتراق.

يمكن استخدام الموديل الرياضي المقترح ووضع برنامج حسابي يعتمد المخطط الصندوقي التالي الشكل (5).

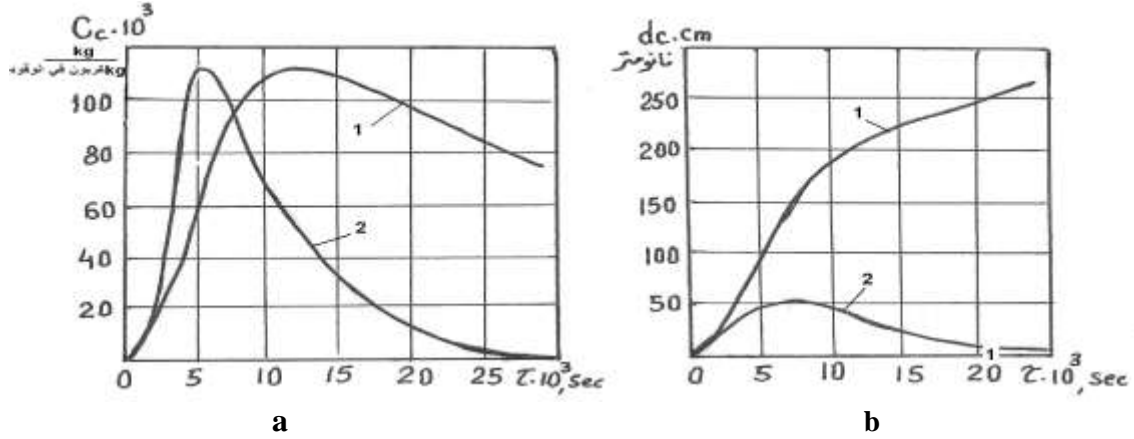


الشكل (5) مخطط حساب عملية تشكل الكربون عند احتراق الوقود

النتائج والمناقشة:

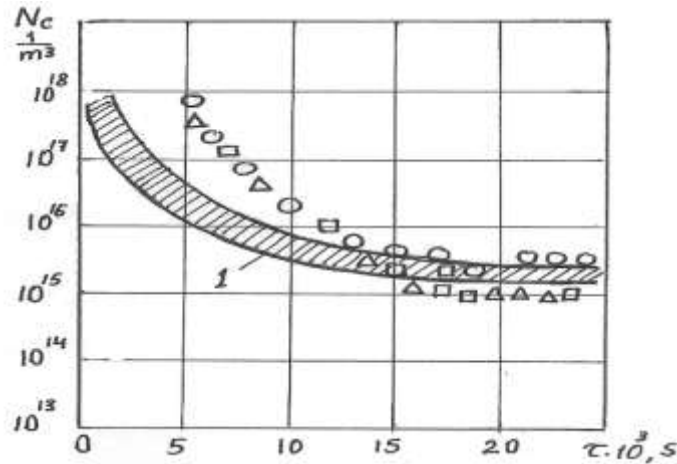
تتجلى الأهمية الأكبر لاستخدام النموذج الحسابي في إمكانية الدراسة التفصيلية لخصائص العملية المدروسة بناءً على نتائج التجارب العددية وهذا هام جداً عند دراسة مثل تلك العمليات المعقدة كما نشأة الكربون والطور الغازي كذلك بقية المراحل الداخلة في العملية كلها. والتي لا يمكن عملياً إجراء أبحاث تجريبية عليها. فمثلاً دراسة دور تخثر (تجمع) جزيئات الكربون على عملية التشكل اللاحقة يمكن تقييمه بحسابات تأخذ بعين الاعتبار عملية التجمع للجزيئات وبدونها، حيث يكون دور عملية التخثر أو التجمع في تقليل سطوح التفاعل في الطور الغازي للكربون بسبب انضمام جزيئات الكربون إلى بعضها وانخفاض السرعة الفعالة للتفاعلات السطحية لنمو الجزيئات (العملية R_5)

والتحول الغازي (العمليتان R_7, R_6) لجزيئات الكربون. كل ذلك يؤدي إلى تناقص السرعة الكتلية لتشكيل الكربون في شعلة احتراق الوقود والى زيادة ملحوظة في زمن الاحتراق الكامل لجزيئات الكربون المتشكل كما يساهم في تزايد تلك العملية زيادة أبعاد بعض الجزيئات تبعاً لعملية تجمعها. يبين الشكل (6-a) تأثير تجمع الجزيئات الكربونية على الكمية المطروحة من الكربون الناتجة حسابياً، كما يبين الشكل (6-b) تغير القطر الوسطي لجزيئات الكربون المتشكلة مع الزمن t .



الشكل (6) تأثير تجمع الجزيئات الكربونية عند احتراق الوقود (1 - مع اعتبار التجمع 2 - بدون تجمع)
a - تغير الكمية المطروحة مع الزمن b - تغير القطر الوسطي للجزيئات مع الزمن

يتعلق التركيز الكتلي العددي المحسوب لجزيئات الكربون لدرجة قليلة بالضغط وتركيب الشحنة (المزيج) ويكون تغير تلك التركيز مع الزمن τ مشابهاً لما ورد في البحث [1] الذي يعرض نتائج تجريبية على أنواع مختلفة من الوقود الهيدروكربوني الشكل (7) يدل ذلك على أن عدد جزيئات الكربون في نواتج الاحتراق يتحدد بشكل أساسي بالعمليات الفيزيائية لتجمع الجزيئات أي بخصائص الجزيئات نفسها كما أن الاختلاف في بداية فترة تطور عملية التشكل بين النتائج الحسابية والتجريبية يزول بسرعة ليصبح التوافق أكثر وضوحاً.



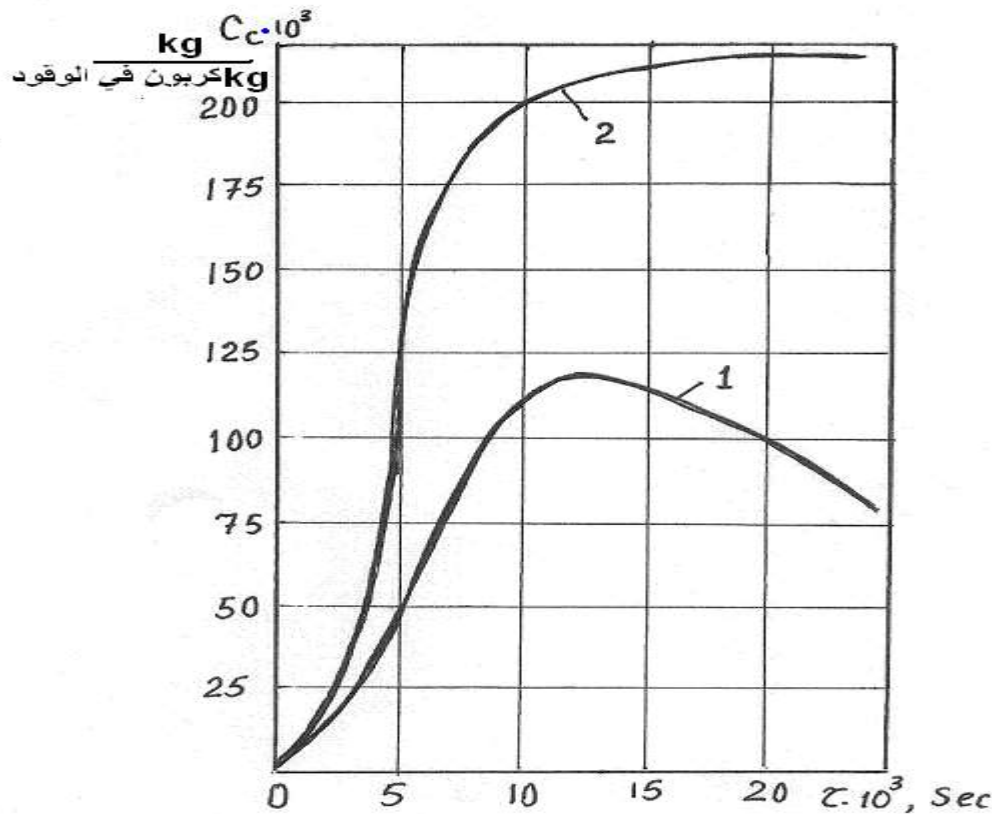
الشكل (7) علاقة عدد جزيئات الكربون في واحدة الحجم مع الزمن τ لأنواع مختلفة من الوقود الهيدروكربوني.

O - C_6H_6 ; $C/O=0.71$, Δ - C_2H_4 ; $C/O=0.73$, \square - C_2H_4 ; $C/O=0.68$

1 - معطيات حسابية عند قيم مختلفة ل α و P

تبيين المقارنة السابقة ضرورة وأهمية اعتبار عملية تجمع جزيئات الكربون وتأثرها عند وضع الموديل الرياضي لتشكيل الكربون من أجل زيادة دقة النتائج الحسابية.

ثم أيضاً وعلى أساس الموديل العددي المقترح تقييم تأثير عمليات التحول إلى غاز لجزيئات الكربون خلال العمليات R_6 , R_7 على تغير الطرح الكلي للكربون عند احتراق الوقود وهذا ما نظهره على الشكل (8) حيث بينت النتائج أن عدم اعتبار تلك العمليات يؤدي إلى خطأ كبير ليس فقط بشكل كمي وإنما نوعي أيضاً.

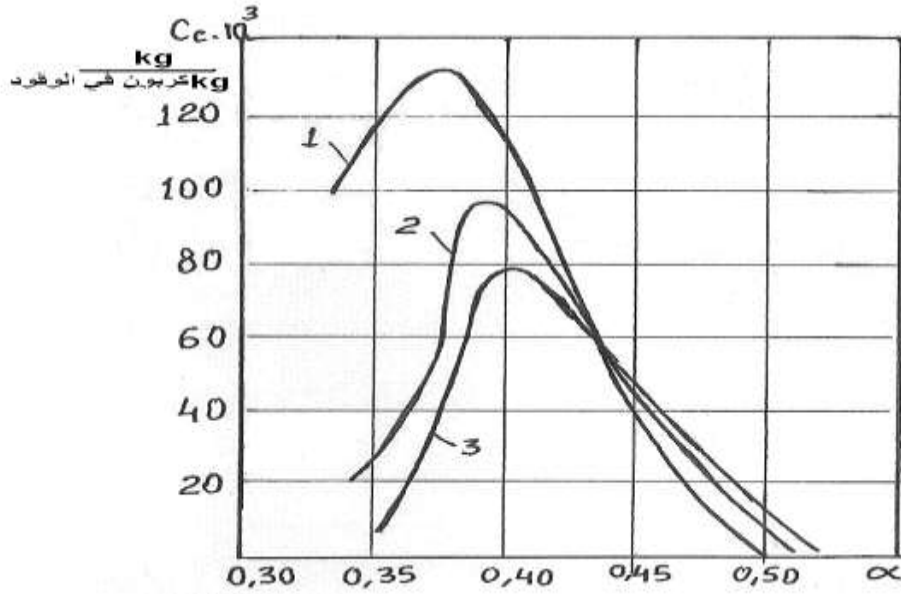


الشكل (8) تأثير عملية التحول إلى غاز لجزيئات الكربون على طرح هباب الفحم وعملية احتراق الوقود.

1 - مع اعتبار التحول إلى غاز 2 - بدون اعتبار التحول إلى غاز

يسمح الموديل الحسابي وعلى أساس التجارب العددية بدراسة واحدة من المسائل الهامة وهي تأثير بارامترات نظام عملية الاحتراق في المحركات على حدود ظهور الكربون وبالتالي الدخان في غازات العادم. فالمعروف أن قيمة α_s تستخدم غالباً لتقييم مدى قابلية الهيدروكربونات لتشكيل الكربون عند احتراقها حيث تمثل قيمة α_s قيمة حدية لعامل فائض الهواء، تلك التي لا يسجل بعدها ظهور الكربون عند احتراق خلائط الوقود مع الهواء وهي غالباً ما تحدد بشكل تجريبي وتتوقف قيمتها على حساسية طريق القياس المستخدمة.

تم إجراء حسابات على الكمية المطروحة من الكربون وعلاقتها بتركيب المزيج الوقودية (α) وتأثير طرح الحرارة من شعلة الاحتراق وهذا ما يبدو على الشكل (9) مع مقارنة بنتائج تجريبية [7] بينت تطابق قيمة (α_s) حد ظهور الكربون في الحالتين.

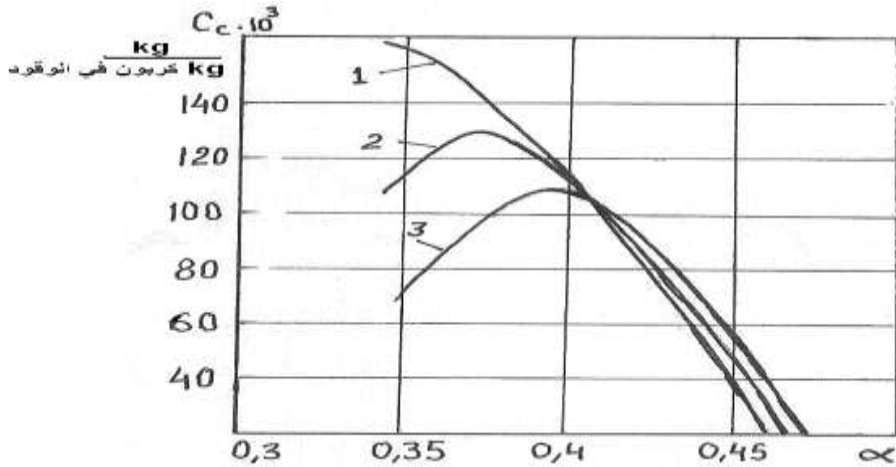


الشكل (9) تأثير طرح الحرارة من شلعة الاحتراق على اصدار الكربون عند تغير α (تركيب المزيج).

1- في شروط أديباتية $dQ=0$ ، $dQ=15\%$ - 2 ، $dQ=25\%$ - 3

يلاحظ أن حدود ظهور الكربون (α_S) تزداد بزيادة الضياعات الحرارية من شلعة احتراق الوقود الهيدروكربوني مما يدل على عدم صحة استخدام حد ظهور الكربون وبالتالي الدخان (α_S) كبارامتر يقيم مدى قابلية أنواع الوقود الهيدروكربوني لتشكل الكربون عند احتراقها.

إضافة إلى ما سبق فقد تم إجراء حسابات للكمية المطروحة من الكربون مع غازات الاحتراق عند تغير درجة الحرارة الأولية للهواء T_0 المشترك في المزيج الوقودي وذلك عند قيم مختلفة لمعامل فائض الهواء α . وقد أظهرت المنحنيات على الشكل (10) تطابقاً مع النتائج التجريبية أيضاً. وأمكن التوصل إلى نتيجة هامة: أنه وعند قيم لمعامل فائض الهواء α أكبر بقليل من حد ظهور الكربون (α_S) يبدأ نشوء الجذور الوليدة والتي لم تصل بقياسها إلى الحدود الحرجة D_{cr} ولم تتحول إلى جزيئات كربون كاملة بسبب أن سرعة التحول إلى غاز عند درجات الحرارة تلك كانت أكبر من سرعة نموها وتجمعها كجزيئات كاملة [8].



الشكل (10) تأثير درجة حرارة الهواء على طرح الكربون عند تغير α (تركيب المزيج).

1- عند $T_0=623 K$ ، $T_0=573 K$ - 2 ، $T_0=523 K$ - 3

بين استطلاع الأمثلة السابقة الفائدة العملية للموديل الرياضي المقترح الذي يصف تشكل الكربون واحتراق الوقود الهيدروكربوني، لكنه يبقى بحاجة إلى بحث وتطوير كي يناسب حالات مختلفة من تشكيل الخليط واضطراب الشحنة والحقن والتذيرير في المحركات ويلعب هنا دوراً كبيراً في تصميم موديل رياضي كامل يطور التجارب العملية على المحركات لدراسة عملية تشكل الكربون واحتراقه في حجر الاحتراق لتلك المحركات.

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1 - يتشكل الكربون الجاف (هباب الفحم) أثناء احتراق الوقود في المحركات بطريقة معقدة أفضل ما يصفها هو التحليل الفيزيائي الكيميائي والذي يتعلق بشكل كبير بتركيب ومواصفات الوقود وشروط وظروف عملية الاحتراق وتطور جبهة اللهب في شعلة الاحتراق.
- 2 - من الصعب وضع موديل رياضي عام وشامل يأخذ بعين الاعتبار كل شروط وظروف العمليات المعقدة الحاصلة وتطور البؤر الوليدة لجزيئات الكربون، لكن الموديل المقترح ومع بعض الفرضيات التي اعتمدت لتبسيط المسألة المطروحة يعكس بشكل مقبول عملية تشكل الكربون بأهم مراحلها المتسلسلة.
- 3 - توفر الحسابات العددية باستخدام الطريقة المقترحة دراسة تأثير كثير من العوامل على تشكل الكربون أثناء الاحتراق الأمر الذي لا يمكن تحقيقه بتجارب عملية على محركات الاحتراق الداخلي وهذا ما يعكس الفائدة العملية للموديل الحسابي المقترح.
- 4 - تعتبر حدود عامل فائض الهواء α من أهم العوامل المؤثرة على طرح هباب الفحم في محركات الديزل، حيث توافق أقل قيمة لطرحه الحدود $3 < \alpha < 5$ الأمر الذي يمكن التحكم به عن طريق كمية الوقود المحقونة في الدورة باستخدام المنظمات التي توفر عمل المحركات عند الإقلاع والحمولات الجزئية والكاملة مع الأخذ بعين الاعتبار حد ظهور الدخان في غازات العادم الذي يمكن تقليله إلى النصف عند تصحيح كمية الوقود المحقونة.
- 5 - بينت الدراسة التأثير الكبير للجريانات المضطربة على تشكل الكربون لهذا فإن توليد الحركات الإعصارية في الخليط القابل للاحتراق في حجر الاحتراق لمحركات الديزل إضافة إلى العوامل العيارية الاستثنائية من تغيير زاوية تسبيق الحقن وضغط الحقن وتنظيم عملية التذيرير تساهم كلها مجتمعة في تقليل طرح هباب الفحم بحدود تصل حتى 80% .

المراجع :

- [1] HAYNES, B, S ; WAGNER, H, G. *Soot formation progress in energy and combustion science*. Vol. 17,N4, 1999 , 229 – 273.
- [2] ТЕЧЕР, П; А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы. М: химия, 1998 , 137.
- [3] FARMER, F ; EDELMAN, R ; WANG, E. *particulate carbon formation during combustion*. N – Y – L : plenum press, 2008 , 229 – 317.
- [4] ТЕЧЕР, П, А. Образования сажи при горении физика горения и взрыва, №2 , 2007, 3-13.
- [5] Суrowикин, В, Ф. Аналитическое описание процессов зародыше образования и роста частиц сажи при термическом разложении ароматических углеводородов в газовой фазы. химия твёрдого топлива, 2005.
- [6] MAGNUSSEN, B, F ; HOLDERNESS, F, S. *On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion*. Cambridge, 2009.
- [7] MACFARLAN, J, J ; HIERTAGER, F, S. *Soot formation rates in premixed C₅ and C₆ hydrocarbon – air flames up to 20 atm*. combustion and flame, Vol. 8 №3, 2002, 215 – 229.
- [8] Талантов, А, В. " Горение в потоке " М. Машиностроение , 2001,160.