الدكتور
محمد جلال الملقي
أستاذ مساعد في كلية الهندسة
الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق

مولدات البخار

حقوق التأليف والطبع والنشر محفوظة لجامعة دمشق

منشورات جامعة دمشق
١٤٢٣ - ١٤٢٤ هـ
٢٠٠٢ - ٢٠٠٣ م

الدكتور
محمد جلال الملقي
أستاذ مساعد في كلية الهندسة
الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق

مولدات البخار

حقوق التأليف والطبع والنشر محفوظة لجامعة دمشق

المقـــــدمة

ادرج مقررمولدات البخار ضمن الخطة الدرسية الجديدة لقسم هندسة القوى الميكانيكية بعد ان كان يدرس جزئيا في مقرر محطات الطاقة .

يجرى في مولدات البخار تحويل الطاقة الكامنة في الوقود العضوي والنووي الى طاقة حرارية ، يكتسب الماء جزءا منهـــا ويتحول الى بخار ، وتدور ابحاث هذا الكتاب حول ايجاد السبل والطرائق التي تمكننا من ترشيد استهلاك الطاقة في مولدات البخار سواء من حيث التصميم او الاستثمار ، ويحمل هذا الامر اهميـــة متزايدة في الظروف الراهنة نظرا لضخامة حصة مولدات البخار في الميزان القطري لاستهلاك الوقود العضوي ، ويعتبر الاخير المصدر الاساسي للطاقة المستخدمة في انتاج البخار حتى الان . علما انه يخطط حاليا في قطرنا وفي كثير من البلدان لاستخدام الطاقة النووية بشكل واسع مما يشير بوضوح الى اهمية الوقود النووى فـــــي السنوات القريبة المقبلة .

يعتبر بخار الماء حاملا مناسبا للطاقة لما له من مميزات عديدة من حيث سهولة الحصول ومن حيث خواصه الحرارية ، ويقـــوم البخار بوظيفة جسم التشغيل في محطات الطاقة الحرارية البخارية

كما ويستخدم في كثير من التطبيقات الصناعية مثل المكابس والمطارق البخارية وفي الصناعات الغذائية والكيميائية والنسيجية ويعنى الكتاب بشكل اساسي بمولدات البخار المستخدمة في محطات الطاقة الا أن ذلك لا يقلل من اهمية الابحاث الواردة بالنسبة للمجالات الاخرى المذكورة .

يستهل الفصل الاول مخطط تقني مفصل عن توليد البخار ،يوضح وظائف مختلف عناصر مولدات البخار ، وتتضمن الفصول التالية اهم البحوث المتعلقة بتوليد البخار بدءا بخصائص الوقود وعناصر نظرية الاحتراق التي يستند اليها في تصميم اجهزة الاحتراق وحتى حساب الانتقال الحراري في سطوح التسخين الذى يعتمد في تصميم هذه السطوح.

يستعرض الكتاب بشكل مسهب الظواهر والعمليات المرافقة لانتاج البخار ، ففي الفصل السابع ترد ابحاث اعداد المياه لمولد البخار والنظام المائي له ، وفي الفصل التاسع ترد الاسس النظرية التي يتم بموجبها اختيار عناصر المسار الهوائي الغازي ، مثل المراوح التي تدفع . هواء الاحتراق او لواقط الرماد التي تفصل الرماد عن نواتج الاحتراق الغازية .

يختتم الكتاب بفصل قصير عن مولدات البخار العاملة على الوقود النووي تستعرض فيه مواصفات عناصر المولدات وخصائصها .

د. محمد جلال الملقي

الفصـــــل الاول

تصنيف مولدات البخـــار والمخطط التقني لانتـاج البخار

١-١ المخطط التقني لانتاج البخار

تستخدم مولدات البخار لانتاج بخار الماء وهي تصنف من حيث وظائفها الى تجهيزات طاقوية واخرى صناعية ، ويمكن ايضا استخدامها لعدة اغراض في آن واحد ، مثلا بهدف التدفئة المركزية ولانتاج بخار الماء المحمص .

تتألف مولدات البخار من المرجل ومن اجهزة اخرى مساعدة اهمها المحمص ، الموفر ، مسخن الهواء ، جهاز الايقاد ، انابيب الغاز والهواء ، الغطاء ، اجهزة التحكم والتنظيم واخيرا اجهزة الفحص والتنظيف . تستخدم الاجهزة المساعدة لتحضير وايصال الوقود والماء ولازالة الرماد ولطرح غازات الاحتراق ، وايضا لايصال هواء الاحتراق (جهاز التهوية) ، هناك ايضا اجهزة التحكم الالي والمراقبة .

يمر تحضير بخار الماء على المراحل التالية :

١- احتراق الوقود ،

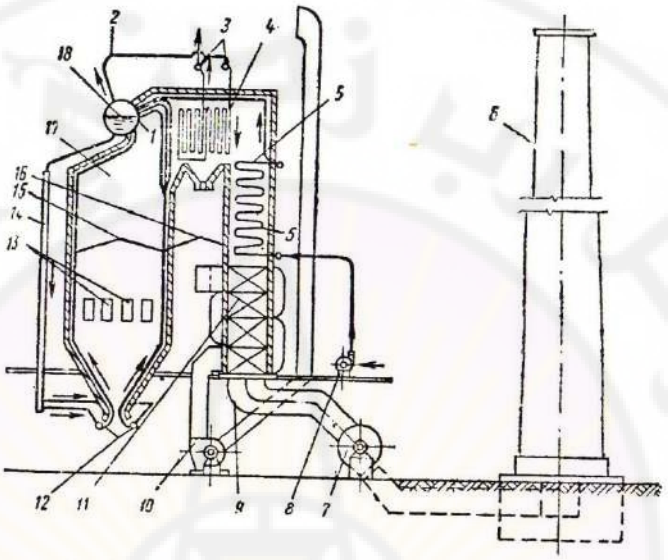
٢- انتقال حرارة غازات الاحتراق الساخنة الى الماء او البخار؛

٣- انتاج البخار (تسخين الماء حتى الغليان ومن ثم التحميص) .

على الشكل ١-١ نرى مخططا اساسيا لمولد البخار ، يصل الوقود الى الموقد (17) من خلال الخراق (13) ، من الموقد تسير نواتج الاحتراق الى ممر الغاز ، حيث يتواجد محمص البخار (4) ، وبعد ذلك تصل نواتج الاحتراق الى منجم الحمل حيث يتواجد الموفر (5) ومسخن الهواء (11) ،تسحب غازات الاحتراق بواسطة مروحة الامتصاص (7) الى المدخنة (6) في طريقها الى الوسط الخارجي ، تمد مروحة التهوية (10) مولد البخار بالهواء اللازم للاحتراق الذى يسخن في المبادل الحرارى (11) .

تمر مياه التغذية بعد تعرضها لسلسلة من العمليات الحرارية والكيميائية على مضخة التغذية (8) ، ومنها تسير عبر الموفر وبعد ذلك الى الحلة (18) .

تنساب مياه الحلة بعد اختلاطها مع مياه التغذية عبر الانابيب الهابطة (14) ثم تلتقي في الانبوب الموزع (12) ، من الاخير تصعد المياه عبر انابيب البخر (انابيب المعاكس) (15) ، ومن ثم يعود الخليط المائي البخارى الى الحلة (18) وفيها يفصل البخار عن الماء ، يسير البخار الرطب عبر الانابيب (2) الى المحمص (4) ، ومن مجمع البخار المحمص (3) يذهب الاخير الى المستهلك .



الشكل (١-١): مخطط مولد البخار.

١- المرجل ، ٢- انابيب التوصيل ، ٣- مجمعات المحمص ، ٤- المحمص
٥- الموفر ، ٦- المدخنة ، ٧- مروحة الامتصاص ، ٨- مضخة التغذية
٩- مخرج نواتج الاحتراق ، ١٠- مروحة التهوية ، ١١- مسخن الهواء
١٢- مجمعات المعاكس ، ١٣- الحراقات ، ١٤- الانابيب الهابطة ،
١٥- العواكس ، ١٦- الغلاف ، ١٧- الموقد ، ١٨- الحلقة .

يغطى موقد البخار من الخارج بالغلاف (16) ويتألف من المواد المقاومة للحرارة العالية ولانتقال الطاقة الحرارية الى الوسط الخارجي .

١-٢ مولدات البخار وتصنيفاتها

(I) تنتمي التجهيزات المرجلية المعدة للتدفئة المركزية والتي يكون الضغط في مراجلها اقل من $P \leq 0.17\ MPa$ والحرارة اقل من $388\ ^{\circ}K$ الى فئة الضغط المنخفض والتي تصنع خزانات مراجلها من الحديد الزهر او الفولاذ ، ويتميز حديد الزهر بانه مقاوم للاكسدة ولكنه سريع العطب .

(II) في مولدات البخار الطاقوية ، تستخدم المراجل ذات الضغط المنخفض $P = 0,8 \div 1,6\ MPa$ والمتوسط $P = 2,4 \div 4\ MPa$ والمرتفع $P = 10 \div 14\ MPa$ والعالي $P = 25 \div 30\ MPa$

وفي الصناعة لاسباب فنية وتكنولوجية عديدة يعمد الى تحديد المواصفات الاساسية لمولدات البخار على اساس مؤشرات حالة البخار المنتج (P , T) وعلى اساس الانتاجية .

(III) مثال على ذلك تقسم مولدات البخار الى ذات الانتاجية المنخفضة $0,01 \div 5,5\ kg/sec$ والانتاجية المتوسطة حتى ($30\ kg/sec$) والانتاجية المرتفعة (فوق $30\ kg/sec$) وقد تصل الى $500\ kg/sec$.

يمكننا تقسيم كافة تصميمات المولدات البخارية الى نوعين :

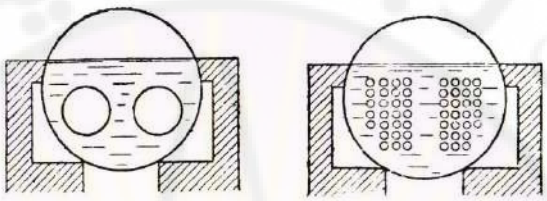
١- مولدات الانابيب الغازية

٢- مولدات الانابيب المائية

في النوع الاول (الشكل ١-٢ a ، b) تتواجد سطوح التسخين الاساسية داخل الوعاء الاسطواني ذي القطر الكبير .

* يتم انتقاد الحرارة بالحمل والاشعاع والتوصيل لتقدير الحرارة المنتقلة عند عمليات الاحتراق لتصميم الحاجز الحراري المناسب

وتتألف سطوح التسخين من انابيب احتراق كما هومبين على الشكل ٠
او انابيب تمر فيها نواتج الاحتراق الغازية (الشكل ١-٢ ، a ، b)



الشكل (١-٢): مخطط المولدات ذات انابيب الاحتراق .
(a) وانابيب نواتج الاحتراق (b) ٠

انخفض استعمال مولدات انابيب الغاز في الوقت الحاضر الى حد بعيد وذلك لاسباب عديدة اهمها :

اولا لانخفاض الضغط العامل المسموح به (1,5 ÷ 1,8 MPa)
وثانيا لضعف انتاجها ،
وثالثا لطول زمن الايقاد فيها بسبب الانتقال الحراري الرديء ،
ورابعا لكبر حجمها ،وهذا يعني انها تشغل مساحة كبيرة ؛ويستهلك لصنعها قدر كبير من المعدن الغالي الثمين ٠

* تعتبر مولدات الانابيب المائية اكثر عصرية وتطورا بالمقارنة مع نظيرتها ذات الانابيب الغازية ، فهي تحتوي على سطوح كبيرة للتسخين مؤلفة من الانابيب الممتلئة بالماء المسخن او بالخليط المائي البخاري ٠
وتسخن السطوح الخارجية لهذه الانابيب بالاشعاع او بالحمل من قبل

نواتج الاحتراق العازية .

تنقسم مولدات الانابيب المائية بدورها، تبعا لوضعية الاخيرة داخل المواقد الى أفقية تميل الانابيب المائية فيها بزاوية تقل عن 25° بالنسبة للافق والى شاقولية تكون زاوية الميل فيها اكثر من الزاوية المذكورة .

بصورة عامة في تصميمات مولدات الانابيب المائية جرى التخلص من سطوح التسخين العائدة للحلة ، ويجري ذلك عن طريق التحكم في عدد حزم الانابيب وعدد الانابيب في كل حزمة وذلك دون اللجوء الى زيادة اقطار الحلة كل ذلك يعني توفر امكانية رفع الضغط العامل للبخار المنتج . ومن المهم بمكان بالنسبة لمولدات الانابيب المائية تأمين التبريد الكافي والاكيد لسطوح التسخين فيها ، ويتم ذلك عن طريق التنظيم الصحيح لسير البخار والماء فيها .

تبعا لطابع حركة جسم التشغيل في سطح البخر تقسم مولدات الانابيب المائية الى الاصناف التالية :

١- مولدات الدوران الطبيعي ؛

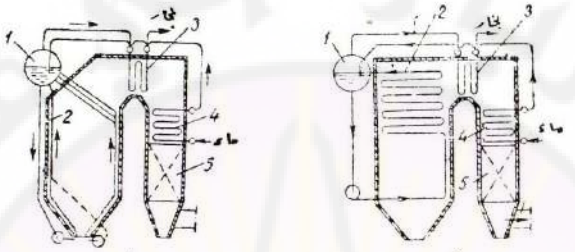
٢- مولدات الدوران القسري ؛

٣- مولدات الجريان المباشر .

في مولدات الدوران الطبيعي (الشكل ١-٣ ، a) يتحرك الماء ضمن اطار مغلق يتألف من الحلة ، الانبوب الهابط ، انبوب الموزع ، انابيب المعاكس ، واخيرا الحلة .

وتحدث الدورة المذكورة بتأثير فرق كثافة الماء قبل وبعد التسخين.

في مولدات الدوران القسري (الشكل ١-٣ ، b) يضاف الى دورة البخر ما يسمى بمضخة الدوران،ومهمتها احداث الضغط الكافي للتغلب على المقاومة الهيدروليكية للاطار .



الشكل (١-٣) : مخططات مولدات الدوران الطبيعي .

(a) والقسري (b)

١- خزان الحلة ، ٢- سطوح البخر ، ٣- محمص البخار ،

٤- الموفـــــــر ، ٥- مسخن الهواء .

في الوقت الحاضر يجري تطوير مختلف تصميمات المراجل المائيـــة حسب الاتجاهات التالية :

١- رفع انتاجية المولد مع رفع مؤشرات حالة البخار المنتج ؛

٢- تحسين مردود المولد ؛

٣- تحقيق مستوى عال من الاستثمار الآمـن والخالي من الاعطال ؛

٤- تخفيض كلف تصنيع وجمع وصيانة المولد .

تحقق مولدات الانابيب المائية العمودية اهم البنود المذكورة ومن مميزاتها انها صغيرة الحجم نسبيا . ويمكنها استخدام الانابيب

ذات الاقطار الصغيرة ويسهل ايضا جمعها مع مختلف تصميمات المواقد وهي الى جانب كل ذلك موثوقة (قليلة الاعطال) عند الاستثمار .

من المفهوم انه مع تصغير اقطار الانابيب المرجلية تزداد سطوح التسخين فيها بسرعة اكبر ويزداد ايضا معامل الانتقال الحراري من الغازات الى الماء او البخار ، ولكن في نفس الوقت تزداد المقاومات الهيدروليكية للسطوح الداخلية للانابيب ، ان ذلك دعا الى تصميم مولدات الدوران القسري .

ادى رفع الضغط العامل في المراجل الى الازدياد السريع لسماكة الانابيب والحلة حتى (0.1 m) ، ان ذلك عقد بصورة محسوسة الطرق التكنولوجية لتصنيع المرجل وبالتالي ادى الى رفع ثمنه .

ومن ناحية اخرى ادى ازدياد الضغط الى انعدام الدوران الطبيعي للماء والبخار ، كل هذه العوامل بمجموعها دعت الى ظهور التصميمات الحديثة للمراجل والتي يستغنى فيها نهائيا عن الحلة ، ويتشكل ما يدعى بمولدات الجريان المباشر .

في الاخيرة يتحول الماء الآتي الى بخار مشبع ومن ثم الى بخار محمص من خلال مروره عبر مختلف عناصر المرجل على التسلسل (الشكل ١ - ٤) .

تمر مياه التغذية خلال الموفر الحملي 6 وبعد ذلك تصل مباشرة الى انابيب المعاكس المصنوعة على شكل حلزوني ، والمتوازية والملتصقة بجدران الموقد .

يسخن الماء في الجزء الاولى حتى درجة الاشباع ، وفي الجزء الوسطى للانابيب يتحول الماء الى بخار جاف بدرجة 70 ÷ 75 % .

ثم يتحول المزيج الناتج الى قسم التسخين الحملي-المنطقة الانتقالية 4 حيث يجفف نهائيا ويتحول جزئيا الى بخار محمص ، يتابع الاخير تحميصه في المحمص الاشعاعي 2 ثم يصل الى درجة الحرارة المطلوبة في المحمص الحملي 3 . في المنجم الهابط لمولد البخار تتوضع المرحلة الاولى (حسب اتجاه نواتج الاحتراق الغازية) والثانية 5 ، 7 لتسخين الهواء

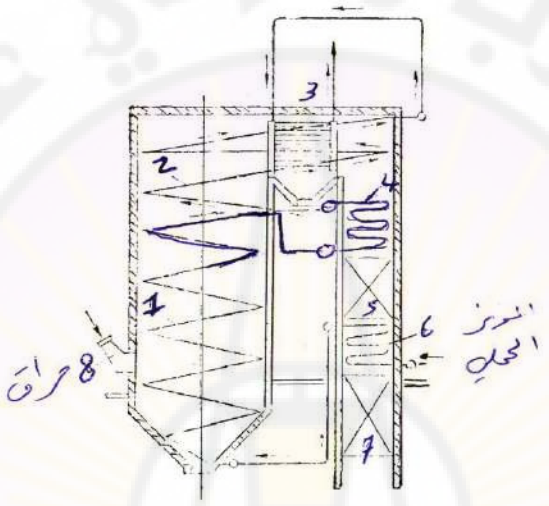
يمكننا ادراج اهم السلبيات في مولدات الجريان المباشر من خلال البنود التالية :

١- المتطلبات العالية لنظافة وخلو مياه التغذية من الشوائب والمحاليل ،

٢- انخفاض الاحتياطي المخزون من الماء نظرا لغياب الحلة ، مما يؤدي الى ظهور اخطار عديدة ، وبالاخص في حالة توقف احد الاجزاء الاساسية للمرجل، او في حالة انفجار احد الانابيب ،
ان ذلك يخلق صعوبات عديدة امام جملة التحكم الالي التي يجب ان تكون بدورها اوتوماتيكية وبدون عطالة .

٣- المقاومة الهيدروليكية العالية للمرجل وهذا ما يؤدي الى زيادة الاستطاعة المستهلكة لتدوير مضخة التغذية .

لقيت مولدات الجريان المباشر انتشارا واسعا في السنوات الاخيرة على الرغم من العيوب المذكورة وذلك لانتاجيتها ومرددوها العاليين .



الشكل (١-٤) مخطط مولد الجريان المباشر .

١- سطح التسخين الاشعاعي السفلي ، ٢- محمص اشعاعي ،

٣- قسم التحميص الحملي ، ٤- سطح التسخين الانتقالي ،

٥،٧ - المرحلة الاولى والثانية لتسخين الهواء ،

٦- الموفر الحملي ، ٨ - حـــــراق .

١-٣ المميزات الاساسية لمولدات البخار

١- مؤشرات البخار المحمص : وتحدد بالضغط والحرارة عند المجمع الخروجي للمحمص ، وهناك مولدات البخار ذات الضغط المتوسط (4,0 MPc) ،والعالي (10 ÷ 14 MPc) ،وفوق الحرج (25,5 MPc) .

٢- انتاجية البخار (الاستطاعة) :

وهي كمية البخار المنتجة في واحدة الزمن ، يجري حساب مولد البخار من اجل الانتاجية الاسمية D_n ؛ وهي عبارة عن الحمولة الاعظمية التي يستطيع الموقد انتاجها على الوقود الحسابي بثبات ، وذلك ضمن حدود المؤشرات الاقتصادية المقررة

٣- نظافة البخار المحمص : يتصف البخار المحمص بكمية الشوائب المرافقة له ، وبكمية الشوائب المسموح بها ،ويتوجب انتاج البخار مع حد ادنى من الشوائب لما في ذلك من اهمية كبرى لعمل الاجهزة المستهلكة للبخار .

٤- المردود : وهو مؤشر اساسي لفعالية التجهيز المرجلي الاقتصادية وهو عبارة عن نسبة كمية الحرارة المستخدمة في مولد البخار الى كمية الحرارة المطروحة نتيجة لاحراق الوقود .

٥- مؤشرات الوثوقية : واول هذه المؤشرات هو عدد التوقفات الاضطرارية ، فمع انخفاض هذا المؤشر نقول ان مولد البخار يعمل بثبات وضمن مؤشرات اقتصادية واستثمارية عالية .

وبالاضافة الى عدد التوقفات هناك مؤشرات اخرى للوثوقية نذكر منها ما يلي :

ب- معامل استخدام وقت العمل : اي نسبة استمرار العمل بالساعات خلال السنة الى عدد ساعات السنة التقويمية :

$$k_t = \frac{\tau_t}{8760} \quad : (1-1)$$

ج- معامل التحميل :

$$k_h = \frac{D_m}{D_n} \quad : (2-1)$$

حيث ان D_m - هو الانتاجية المتوسطة لمولد البخار خلال الزمن العامل ويعطى بالعلاقة :

$$D_m = \frac{\sum D}{\tau_t} \quad : (3-1)$$

$\sum D$ - كمية البخار الاجمالية المنتجة فعليا خلال العام .

د- معامل استخدام الاستطاعة المحملة : وهو عبارة عن نسبة الانتاجية الاجمالية الفعلية السنوية $\sum D$ الى الاستطاعة الاسمية خلال الساعة .

$$k_u = \frac{\sum D}{8760 . D_n} \quad : (4-1)$$

وبالنتيجة نجد ما يلي :

$$k_u = k_t \cdot k_h \quad : (5-1)$$

$$\frac{\sum D}{8760 \cdot D_n} = \frac{\tau_t}{8760} \quad \frac{D_m}{D_n} = \frac{\tau_t}{8760} \quad \frac{\sum D}{\tau_t \cdot D_n}$$

الفصل الثاني

احتراق الوقود العضوي

٢-١ انواع الوقود وتركيبه

الوقود هو عبارة عن المادة القابلة للاحتراق ، التي تستعمل كمصدر لانتاج الطاقة الحرارية ، ويجري اختيار نوع الوقود الذي يزمع استخدامه في مولد البخار بالاعتماد على الدراسات الاقتصادية التي تبرر هذا الاختيار ، وتأخذ هذه الدراسات بعين الاعتبار عوامل عديدة اهمها : (١) وجود الاحتياطات الكافية لنوع الوقود ، (٢) كلفة الاستخراج والنقل والتحضير ، (٣) نوعية الوقود الحرارية (كمية الطاقة الحرارية الناتجة عن احتراق واحدة الكتلة او الحجم) ، (٤) النشاط الكيميائي للوقود ، (٥) نسب الشوائب الضارة والمواد الغير محترقة .

يعتبر الوقود العضوي في الوقت الحاضر مصدرا اساسيا للطاقة الحرارية والكهربائية والميكانيكية ، والى جانب الوقود العضوي يزداد الاعتماد على الوقود النووي اكثر فأكثر ، ينشر الوقود النووي الطاقة كنتيجة لتحلل نوى العناصر الثقيلة مثل Pu^{239} ، U^{238} ، U^{235} في المفاعلات الذرية .

تقسم كافة انواع الوقود العضوي من حيث الحالة الفيزيائية الى وقود صلب وسائل وغازي ، ومن ناحية اخرى تقسم الى انواع طبيعية تستخرج من باطن الارض ، واخرى اصطناعية ، تنتج عن

المعاملة الحرارية للوقود الطبيعي .

في الجدول (١-١) يرد تصنيف لانواع الوقود العضوي مرتبة حسب حالتها الفيزيائية وشكل استخدامها :

الجدول (١-١)

الوقود	الحالة الفيزيائية		
	صلب	سائل	غازي
طبيعي	الخشب ، الطورب ، الفحم الحجري ، الانتراسيت .	البترول	الغاز الطبيعي
اصطناعي	الفحم الخشبي ، شبيه الكوك، الكوك، الغبار الفحمي .	مازوت، زيت الكاز (الكيروسين) البنزين	الغاز النفطي الغاز الكوكي غاز افران الصلب

١- التركيب الابتدائي للوقود العضوي الصلب والسائل

يتألف الوقود الصلب والسائل من جملة معقدة من المركبات العضوية واللاعضوية ، من ضمنها مركبات قابلة للاحتراق واخرى غير

قابلة للاحتراق .

حتى وقتنا الحاضر لم تكتمل الابحاث المتعلقة بتركيب الجزء القابل للاحتراق، وهو مايصعب عملية وضع صيغة كيميائية للتركيبات العضوية ، على العكس من ذلك فان تركيب الجزء اللاعضوي من الوقود مدروس بالتفصيل .

يتميز الوقود العضوي الصلب بتركيبه الابتدائي ، وهو عبارة عن مجموع العناصر والمركبات الداخلة في الوقود .

ويعطى التركيب الابتدائي على شكل نسبة مئوية من كل واحد كيلو غرام من الوقود ،

من المفهوم ان التركيب الابتدائي للوقود لايبين البنية الجزيئية والكيميائية للوقود ، ويمكننا كتابة التركيب الابتدائي للوقود الصلب والسائل على الشكل التالي :

$$C + H + S_v + O + N + W + A = 100\% \quad (1-2)$$

تنتمي العناصر C ، H ، S_v الى الجزء القابل للاحتراق

S_v - هي النسبة المئوية للكبريت القابل للانفلات، والذي يدخل في المركبات العضوية وفي مادة كبريت الحديد FeS_2

هناك جزء آخر من كبريت الوقود غير قابل للاحتراق ، ويدخل في المركبات مثل : ($CaSO_4$ ، $MgSO_4$ ، $FeSO_4$) ، وفي مركبات اخرى ، ويسمى بالكبريت السولفاتي .

في كتلة الوقود يدخل جزء غير قابل للاحتراق ، ويتألف من غاز الازوت N_2 والاوكسجين O_2 والرطوبة W ومن الرماد المتبقي

بعد الاحتراق A .

لدراسة خواص الوقود الصلب والسائل نميز بين الكتل والتركيبات العاملة ، الجافة ، المحروقة ، واخيرا الكتلة العضوية .

يقيم الوقود وتركيبه في حالته الجاهزة للاحتراق وبعد وصوله الى المستهلك ، بما يسمى بالكتلة والتركيب العاملين ، ويعطى الاخير بالصيغة التالية :

$$C^p + H^p + S_v^p + O^p + N^p + A^p + W^p = 100\% \quad (2-2)$$

في التركيب الجاف تختفي الرطوبة ويمكننا تمثيله على الشكل التالي:

$$C^c + H^c + S_v^c + O^c + N^c + A^c = 100\% \quad (3-2)$$

ويمكننا ايجاد النسب المئوية لمركبات الكتلة الجافة بدلالة النسب المئوية للكتلة العاملة :

$$C^c = C^p \frac{100}{100 - W^p} \quad ; \quad H^c = H^p \frac{100}{100 - W^p} \quad ; \qquad (4-2)$$

في الكتلة المحترقة للوقود تهمل النسب المئوية للشوائب الخارجية وهي الرماد والرطوبة :

$$C^g + H^g + S_v^g + O^g + N^g = 100\% \quad , \qquad (5-2)$$

جدير بالذكر هنا ان تسمية الكتلة المحترقة هي تعبير شرطي بحت وبالمقابل يعتبر التركيب المحترق احد اهم خصائص الوقود ويتعلق تركيب الكتلة المحترقة بشروط وطابع تكون الوقود العضوي وبعمره الجيولوجي ، يمكننا حساب النسب المئوية للكتلة المحترقة بدلالة نظائرها في الكتلة الجافة والعاملة بالعلاقات التالية :

$$C^g = C^c \frac{100}{100 - A^c} = C^p \frac{100}{100 - A^p - W^p} \quad : \quad (6-2)$$

تضم الكتلة العضوية للوقود على الكبريت الداخل في المركبات العضوية فقط :

$$C^o + H^o + S^o + O^o + N^o = 100\ \% \quad : \quad (7-2)$$

حيث ان

$$S^o = S^o_v - S^o_k \quad : \quad (8-2)$$

S^o_k – الكبريت الداخل في كبريت الحديد FeS_2

ويمكن حساب النسب المئوية للكتلة العضوية بالعلاقات التالية :

$$C^o = C^g \frac{100}{100 - S^g_k} \quad ; \quad H^o = H^g \frac{100}{100 - S^g_k} \quad : \quad (9-2)$$

في كافة الحسابات الحرارية التقنية يؤخذ بتركيب الكتلة العاملة

للوقود ، لانها تعكس بشكل دقيق حالته قبل الاحتراق .

٢- تركيب الوقود الغازي :

يتألف الوقود الغازي من مجموعة غازات قابلة للاحتراق (C_nH_{2n+2} ، C_nH_{2n} ، H_2 ، CO ، H_2S) ، ومن مجموعة اخرى عديمة الاحتراق (O_2 ، CO_2 ، N_2) كما يتضمن الوقود الغازي على الرطوبة d^g Kg/m^3 .

وتشكل المركبات الهيدروكربونية نسبة عالية من المركبات القابلة للاحتراق ، كمثال نذكر ان الغاز الطبيعي يحتوي 98 % من حجمه على غاز الميتان CH_4 .

يعين تركيب الوقود الغازي بدلالة النسب المئوية الحجمية لمختلف مركباته ، وبصورة عامة يمكننا كتابة التركيب الحجمي بدلالة الصيغ الكيميائية المجملة كما يلي :

$$\sum_{i=1}^{m} C_nH_{2n+2} + \sum_{i=1}^{m} C_nH_{2n} + H_2 + CO + H_2S + O_2 + N_2 + CO_2 = 100\% \quad (10-2)$$

تحسب النسبة المئوية الحجمية لمركبات الغاز الرطب من العلاقة التالية :

$$K^h = K^c \frac{0,805}{0,805 + d^g} \quad \% \quad ; \quad (11-2)$$

حيث ان K^h ، K^c - النسب المئوية الحجمية لمركبات الغاز الرطب

والجـــــاف .

0,805 - كثافة بخار الماء عند الشروط الفيزيائية النظامية . kg/m^3:

٢-٢ مميزات الوقود العضـــوي

١- الوقود الصلب

تعتبر نسب الرطوبة والرماد والمواد الطيارة من اهـــم المميزات التقنية للوقود فهي تحدد نوع وتصميم مولد البخـــــار والمعدات المساعدة له .

آ - الرمـــاد : يحتوي الوقود المستخرج على بعض الموادالمعدنية الغير قابلة للاحتراق ، وتتعرض هذه المواد بتأثير الاحتراق الى عدد من التحولات يتشكل الرماد بنتيجتها ، ويتشكل الخبث مـــــن الرماد المنصهر في حجرة الموقد .

تؤثر مواصفات الرماد الفيزيائية على اسلوب تنظيم عمليتي الاحتراق وطرح الرماد او الخبث ، كما يخفض الرماد من قيمة الوقود الحرارية ، ويزيد من تكاليف النقل والحفظ والاستخراج كما ويزيد من اهتراء واتساخ سطوح التسخين ويزيد من المقاومة الهيدروليكية لمسار غازات الاحتراق ويخفض من فعالية الانتقال الحراري ، ويهبط بالنتيجة مردود مولد البخـــار .

ب - الرطـــوبة : يميز عادة بين انواع الرطوبة: المتشتة ميكانيكيا ، والشعرية ، والغروية ، والبللورية .

ينتج النوع الاول المتشتت ميكانيكيا عن الاسباب الخارجية مثـــل

المطر ، ويتعلق على سطح الوقود ، ويتأثر بحجوم جزيئاته .

2 تدخل الرطوبة الشعرية في مسامات الوقود ، اما الرطوبتين الغروية والبللورية فتعتبران جزءا من الوقود .

3 يتبخر نتيجة للتجفيف كل من الرطوبة المتشبثة ميكانيكيا والشعرية وجزء من الرطوبة الغروية 4 اما الجزء المتبقي من الرطوبة فيمكن تبخيره عند درجات الحرارة العالية .

5 تتحدد رطوبة الوقود العامل W^a بطريقة التجفيف في المخبر عند درجة الحرارة 105 °C .

تشكل رطوبة الوقود عبئا اضافيا عليه ، فهي تزيد من تكاليف نقله وتخفض من قيمته الحرارية (حرارة الاحتراق الدنيا) وتزيد من حجم نواتج الاحتراق مما يؤدي الى زيادة المصروف الكهربائي على مراوح الامتصاص كما وتشكل عاملا مساعدا لاكسدة معادن سطوح التسخين وكما يمكن للرطوبة ان تغير من الصفات الفيزيائية للوقود فتتغير مثلا درجة سيلان مسحوق الفحم ضمن النواقل او قد يتجمد الوقود عند عند درجات الحرارة المنخفضة .

جـ - المواد الطيارة وفحم الكوك : يتحلل الوقود عند تسخينه بمعزل عن الهواء الى قسمين : اولهما غازات وابخرة طيارة ، وثانيهما جسم صلب هو فحم الكوك ، وتحدد كمية المواد الطيارة كنسبة من الكتلة المحترقة ، ويجري ذلك في شروط مخبرية بتسخين 1 g من الوقود عند درجة الحرارة 850°C بمعزل عن الهواء خلال سبعة دقائق وبمساعدة النفض في كتلة العينة المخبرية تتحدد نسبة المواد الطيارة .

تعتبر نسبة المود الطيارة في الوقود الصلب احدى اهم خصائصه حيث يتعلق بها طابع واسلوب تنظيم احتراق الوقود .

٢- الوقود السائل

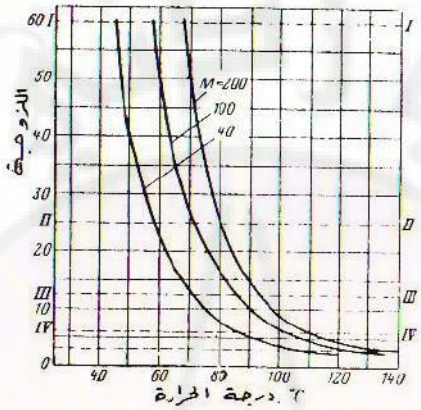
يعتبر البترول مصدرا اساسيا لاستخراج انواع الوقود الصناعية السائلة، كما يمكن الحصول على الوقود السائل من تقطير بعض انواع الفحم، ويشغل المازوت بأنواعه حيزا هاما بين مختلف الانواع الاخرى. وتؤثر نوعية المازوت على تصميم وعمل مولد البخار ولهذا السبب - تعتبر خواص المازوت : اللزوجة ، المميزات الحرارية ، الكثافة والرماد الناتج عنه كخواص تقنية .

آ- اللزوجة :

من اهم خواص المازوت التي تحدد امكانية وشروط استخدامه، وتقع في اساس تصنيفه . وتتعلق لزوجة المازوت بشكل اساسي بدرجة الحرارة (الشكل ٢- ١) ، وتظهر هذه العلاقة بشدة في حالة المازوت اللزج ، فمع انخفاض درجة الحرارة ترتفع اللزوجة مما يؤدي الى تماسكه او تجمده ، وتعتبر هذه الاجراءات مختلفة بطبيعتها فتماسك المازوت ينتج عن ارتفاع اللزوجة ويؤدي الى فقد الهيدروكربونات الغير متبلورة سيولتها . ويحدث التجمد للهيدروكربونات المتبلورة والتي يصعب انصهارها ، في الاستثمار يعتبر تجمد المازوت في الانابيب والحجوم اشد خطرا من التماسك .

★ توابع الشكل (٢- ١) تظهر انه عند التسخين العالي (فوق ٨٠ - ١٠٠ درجة مئوية) تتغير اللزوجة ببطء وذلك لمختلف انواع المازوت ، وهذا يعني ان تغير درجة الحرارة ضمن المجال المذكور

في الاستثمار لايؤدي الى اية صعوبات في وصول المازوت الى الموقد وليس هناك من مبررات لرفع درجة حرارته الى مستويات عالية .



الشكل (٢-١): المميزات الحرارية اللزوجية لبعض انواع المازوت وقيمة اللزوجة المفضلة لعمل المضخات المكبسية. I-I ، والمضخات النابذة II-II ، ومختلف الرذاذات

تؤثر لزوجة المازوت بشكل جدي على فعالية نقله بالانابيب ،ونوعية ترذيذه ، واحتراقه الكامل .

ب - درجة حرارة التجمد :

وتتمثل بدرجة الحرارة الصغرى التي تفقد المازوت خاصية السيولة الكافية لضخه وانصبابه ، وتتعلق درجة حرارة التجمد بالطبيعة الكيميائية للبترول الاساسي ، وبعمليات التكرير ، كما وتتعلق بالرطوبة المرافقة له .

تؤثر درجة حرارة التجمد تأثيرا مباشرا على اختيار المخطط التقني

لحفظ ونقل وتقديم المازوت الى الموقد .

* في حالات ارتفاع درجة التجمد تظهر صعوبات في انصباب المازوت من خزانات العربات الحديدية ، وهذا مما يتطلب تسخينه ، مما يزيد في المصاريف الاستثمارية وفي ضياع الوقت .

جـ ـ درجة حرارة الالتهاب :

(1) وتتحدد بدرجة الحرارة التي تلتهب من اجلها ابخرة المازوت ـ الممزوجة بنسبة محددة مع الهواء المحيط ، (2) وذلك عند تلامسها مع لهب مكشوف .

(3) يمتلك المازوت درجة الالتهاب ٨٠ـ١٤٠ درجة مئوية ، ولتجنب الحرائق في الجمل المفتوحة (4) يسخن المازوت الى ما دون درجة الالتهاب بنحو عشر درجات مئوية .

(5) في جمل التسخين المغلقة مثل المبادلات الحرارية المضغوطة يسمح بالتسخين الى مستوى درجة الالتهاب .

د ـ درجة حرارة الاشتعال :

وهي تلك الدرجة التي يتابع ـ المازوت من اجلها اشتعاله خلال خمسة ثوان بعد بدء الالتهاب ، وتزيد درجة الاشتعال بنحو ١٥ ـ ٢٠ درجة مئوية عن درجة الالتهاب .

هـ ـ الكثافة :

تتميز اغلب انواع المازوت بانخفاض كثافتها (اقل من الواحد) بينما يمتلك البعض كثافة اكبر من الواحد ، وتؤثر نسبة المازوت الى الماء على عملية فصل الرطوبة من المازوت .

تفصل رطوبة المازوت ذى الكثافة (عند درجة الحرارة $20\ ^{\circ}C$)

بالتركيد في الاحواض ، والامر اعقد بكثير بالنسبة $\rho^{20} < 1$ للمازوت ذى الكثافة $\rho^{20} > 1$ ، حيث يطفو الماء فوق المازوت ببطء شديد مما يعقد عملية الفصل ، خاصة اذا علمنا ان انواع المازوت ذات الكثافات العالية تمتلك لزوجة عالية ايضاً تتعلق كثافة المازوت بدرجة الحرارة . فمع ارتفاع الاخيرة تنخفض الكثافة كما تنخفض اللزوجة ايضا . والمفهوم ان كلا الامرين يؤديان الى تقوية اجراء فصل الرطوبة .

و – رماد المازوت :

تتألف الشوائب المعدنية للمازوت بشكل اساسي من الاملاح الحلولة في الماء ، والتي تختلط بالبترول من المياه البئرية ، كما وتدخل الاملاح في تركيب البترول بحد ذاته ، عند تكرير البترول تتجمع الاملاح المعدنية في التركيبات الثقيلة ، ومع ازدياد نسبة الاملاح في البترول تزداد نسبتها في المازوت ، وتتراوح نسبة الرماد في المازوت الجاف بنسبة $0,1 \div 0,3$ % .

يختلف تركيب الاملاح المعدنية في المازوت تبعا للبترول الاصل ولطريقة التكرير ، وتثير اكاسيد المعدن القلوية والفاناديوم الموجودة في المازوت الكبريتي صعوبات كبيرة ، حيث تشكل ترسبات قاسية على سطوح التسخين ، وتؤدي اكاسيد الفاناديوم الى اكسدة سطوح التسخين في ظروف حرارية معينة .

٣– الغـــاز الطبيعي

المميزات الاساسية التقنية للغاز الطبيعي هي الكثافة ، قابلية الانفجار ، السمومية ، عمليا اغلب انواع الغاز اقل كثافة من الهواء

ولهذا السبب تتجمع الغازات المتسربة ضمن الابنية تحت الاسقف .

آ- الكثافة : عمليا يستخدم مفهوم الكثافة النسبية للغاز الذي هو عبارة عن نسبة كثافة الغاز الى كثافة الهواء ويمكن اجراء التحويل كما يلي :

$$\rho = \frac{\rho_n}{\rho_a} \quad ; \quad (12-2)$$

حيث :

ρ - الكثافة النسبية للغاز (بالنسبة للهواء)

ρ_n - كثافة الغاز عند الشروط النظامية ؛ kg/m^3

ρ_a - كثافة الهواء عند الشروط النظامية وتساوي $1,293\ kg/m^3$

تعين كثافة الغاز الجاف عند الشروط النظامية بالاستفادة من قاعدة التجميع لكثافات مركبات الغاز :

$$\rho^c = 0,072\ CH_4 + 0,0136\ C_2H_6 + 0,0202\ C_3H_8 +$$

$$+ 0,0126\ C_2H_4 + \cdots + 0,0198\ CO_2 + 0,0125\ N_2 \quad , \quad (13-2)$$

حيث : CH_4 ؛ C_2H_6 ... الخ الحصص الحجمية لمركبات الغاز ، % .

الامثال 0,0072 ؛ 0,0136 ... الخ هي معاملات تساوي كثافات المركبات عند الشروط النظامية مقسمة على 100 ، بسبب تمثيل المركبات بالنسب المئوية .

كثافة الغاز الرطب عند الشروط النظامية :

$$\rho_h = \frac{\rho^c + d^g}{1 + \frac{d^g}{\rho_v}} \quad : Kg/m^3 \; ; (14-2)$$

حيث :

ρ^c ـ كثافة الوقود الغازي الجاف ، kg/m^3 ؛

d^g ـ الرطوبة في الغاز الجاف ، Kg/m^3 ؛

ρ_v ـ كثافة بخار الماء عند الشروط الفيزيائية النظامية .

ب ـ قابلية الانفجار :

يمكن لخليط الغاز الطبيعي مع الهواء الممزوج بنسب معينة ان ينفجر في حالة وجود النار ، ويرافق الانفجار انطلاق كمية كبيرة من الطاقة عند درجة حرارة عالية ، مما يعني امتلاك الخليط لقوة تفجير كبيرة ، وتقع التركيزات الحجمية الخطرة للغاز الطبيعي في المجال $4,5 \div 13,5$ % (عند $20^\circ C$) .

ج ـ السمومية :

يعتبر الغاز الطبيعي او بعض مركباته غازات سامة ، واهم هذه المركبات اوكسيد الفحم CO وكبريت الهيدروجين H_2S ويؤدي التركيز 1 % لغاز CO الى موت الانسان اذا تعرض له خلال ـ دقيقتين . ولهذا السبب يجري فحص هواء الصالات مرتين خلال الوردية

لمعرفة وجود غاز الميتان CH_4 ، لان ذلك يدل على وجـــود بقية المركبات السامة .

٢-٣ حرارة الاحتراق

تعتبر من اهم خصائص الوقود وهي بالتعريف : كمية الطاقـــة الحرارية الناتجة من الاحتراق الكامل لواحدة الكتلة (في حالة الوقود الصلب او السائل) او لواحدة الحجم (الوقود الغازي) محسـوبة عند الشروط الفيزيائية النظامية .

يمكننا التمييز بين حرارة الاحتراق الدنيا Q_b وحرارة الاحتراق العليا Q_h ويساوي الفرق بينهما الى الطاقة الحرارية التي يمكن تلقيها في حالة تكاثف بخار الماء الموجود ضمن نواتـــج الاحتراق ومن المعروف ان ابخرة الماء الخارجة مع غازات الاحتراق تنتج عن تبخر الرطوبة الداخلية للوقود ومن احتراق الهيدروجين ومن الرطوبة الداخلة مع هواء الاحتراق .

لحساب الفرق بين حرارتي الاحتراق الدنيا والعليا نقول ان حرارة تكاثف kg واحد من بخار الماء تساوي :

$$r_{H_2O} = 2500 \ kJ/kg$$

من المعادلة :

$$H_2 + 0{,}5\ O_2 = H_2O$$

ينتج انه عند احتراق واحد kg من H_2 نتلقى 9 kg ابخرة ماء، وبالنتيجة يمكننا حساب الطاقة الحرارية الناتجة مـــن تكاثف ابخرة الماء المتواجدة مع غازات الاحتراق كما يلي :

$$2500\left(\frac{W^p}{100}+9\frac{H^p}{100}\right) = 25\,W^p + 225\,H^p$$

ومنه نجد العلاقة المطلوبة بالنسبة لكتلة الوقود العاملة :

$$Q_b^p = Q_h^p - 25\,W^p - 225\,H^p \quad , \quad (15\text{-}2)$$

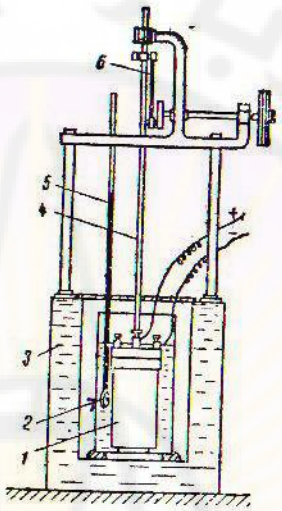
يمكننا تعيين حرارة الاحتراق مخبريا بالاستعانة بمختلف الاجهزة المعدة لهذا الهدف ، مثلا لقياس حرارة الاحتراق للوقود الصلب والسائل الثقيل يستعمل الجهاز المسعري المبين على الشكل (٢-٢) وهو عبارة عن وعاء فولاذي محكم الاغلاق 1 يسمى القنبلة ، يملأ عادة بالاوكسجين عند الضغط (3 MPc) ، ويحرق في الوعاء 1 g من عينة الوقود المختبر ، حيث توضع القنبلة داخل وعاء ممتلىء بالماء 2 ، يوضع الوعاء الاخير بدوره داخل جهاز الترموستات 3 . وتحسب حرارة الاحتراق الدنيا للكتلة العاملة Q_b^p بدلالة الفرق بين درجات حرارة الماء قبل وبعد الاحتراق والذي يمكن قراءته من الميزان الحراري 5 وعلى الشكل (٢-٢) يستعمل المازج 4 لتأمين التجانس الكافي في درجات الحرارة بين مختلف ارجاء الوعاء 2 ، ويحرك المازج بمساعدة ميكانيزم خاص 6 .

ثمة طرق نظرية تقريبية لحساب Q_h^p ، Q_b^p للوقود الصلب والسائل ، ويمكننا كتابة العلاقات التجريبية التالية لحساب

هذه الكميـــــات :

$$Q_R^P = 340\,C^P + 1260\,H^P - 109\,(O^P - S_o^P) \quad : (16-2)$$

$$Q_b^P = 340\,C^P + 1035\,H^P - 109\,(O^P - S_o^P) - 25\,W^P \quad : (17-2)$$



الشكل (٢-٢) : الجهاز المسعري.

★ للمقارنة بين مختلف انواع الوقود من حيث قيمتها الحراريـــة استنبط مفهوم الوقود العياري الذي تساوي حرارة الاحتراق الدنيا له $Q_{b,c}^P = 29300\ KJ/kg$.

★ لحساب مصروف الوقود العياري بدلالة نظيره للوقود المستخدم – نستفيد من العلاقة التالية :

$$Q_{b,c}^P \cdot B_c = Q_b^P \cdot B$$

حيث : B ، B_c – مصروف الوقود العياري والمستخدم kg/Sec

Q_b^p ، $Q_{h,c}^p$ - حرارة الاحتراق الدنيا لهما

٢-٤ عناصر نظرية الاحتراق

احتراق الوقود عبارة عن اجراء فيزيائي وكيميائي بآن واحد ويتفاعل فيه الجزء القابل للاحتراق من الوقود مع المؤكسد ويتتج عن ذلك انطلاق طاقة حرارية وضوئية ونواتج احتراق غازية (مثل CO_2 ، H_2O) وبقايا صلبة او سائلة (رماد او خبث) . وقد لايتم الاحتراق بشكل كامل ، وفي هذه الحالة تتشكل مواد الاحتراق الناقص (مثل C ، H_2 ، CO) .

تبعا لطوري مادة الوقود والمؤكسد يمكننا التمييز بين نوعين من اجراءات الاحتراق :

١- الاحتراق احادي الطور . مثال على ذلك احتراق الوقود الغازي ويعطى على الشكل التالي (غاز + غاز) .

٢- الاحتراق ثنائي الطور (في حالة الوقود الصلب والسائل) ويمكن تمثيله كما يلي (سائل + غاز) او (جسم صلب + غاز) .

الاحتراق قبل كل شيء تفاعل كيميائي ، يجري عند درجات الحرارة العالية ، ويتغير فيه تركيب المواد الداخلة في التفاعل ، ويدرس علم الترموديناميك الكيميائي الجانب الكيميائي منه ويبين العوامل التي تؤثر في سرعة التفاعل وعمقه ، واتجاهات حدوثه ، ويمكن للاحتراق ان يتم بسرعة كبيرة لولا تأثير العوامل الفيزيائية التي تحد من سرعة التفاعل ، وهذه العوامل هي بالاساس سرعة الحمل الحراري ، والانتقال الانتشاري للمواد الداخلة في التفاعل .

★ وباختصار تتحدد سرعة الاحتراق بالقيمة الدنيا من بين قيم السرعات المؤثرة ، اى سرعة التفاعل الكيميائي وسرعة الانتقال الانتشاري وسرعة الحمل الحراري .

★ بشكل عام يمكننا اعتبار زمن الاحتراق مساويا مجموع الازمان اللازمة للعمليات الفيزيائية والكيميائية :

$$\tau_b = \tau_{ph} + \tau_{ch} \qquad ; \qquad (19-2)$$

حيث :

1 - τ_b - الزمن اللازم للاحتراق

2 - τ_{ph} ، τ_{ch} - الازمان اللازمة للعمليات الكيميائية والفيزيائية

٩ - احتراق الوقود الغازي

★ ان الشرط اللازم لاحتراق الوقود الغازي هو اختلاطه مع المؤكسد O_2 ولبدء الاحتراق يتوجب تحقيق شروط معينة ، ذلك ان سرعة التفاعل تكون صغيرة عند درجات الحرارة المنخفضة ، وعند رفع درجة حرارة المزيج الوقودي الى قيمة ما معينة يبدأ بالالتهاب وفي نفس الوقت ترتفع سرعة التفاعل الكيميّائي حتي يصل المزيج الملتهب الى حالة ما تصبح كمية الحرارة الناتجة عن الالتهاب كافية لمتابعة الاحتراق ، ويحدث ذلك عند درجة حرارة الاشتعال .

★ تتعلق الاخيرة بعوامل عديدة منها نسبة الوقود في المزيج الغازي وشروط الاحتراق ، الخواص الفيزيائية الحرارية للوقود الغازي .. الخ

★ يأخذ اللهب الناتج عن احتراق المزيج الوقودي شكل الشعلة التي تتألف من حجم الغازات المتحركة ويجري فيها الاحتراق .

ويمكننا التمييز بين طريقتين لاحتراق الغاز مع المؤكسد في الشعلة ، وهما الطريقة الكينيماتيكية والطريقة الانتشارية ـ (النفوذية) ، ثمة حالات وسطية تقع بين الطريقتين المذكورتين .

★ في الطريقة الكينيماتيكية يتم مزج الوقود الغازي مع المؤكسد قبل بدء الاحتراق ، وذلك في جهاز المزج التابع للحراق ،وتتعلق سرعة الاحتراق في هذه الحالة بشكل اساسي بسرعة التفاعلات الكيميائية ومنه نستنتج ان الزمن اللازم للاحتراق يساوي بشكل تقريبي الزمن اللازم للتفاعلات الكيميائية فقط ($\tau_b \approx \tau_{ch}$) .

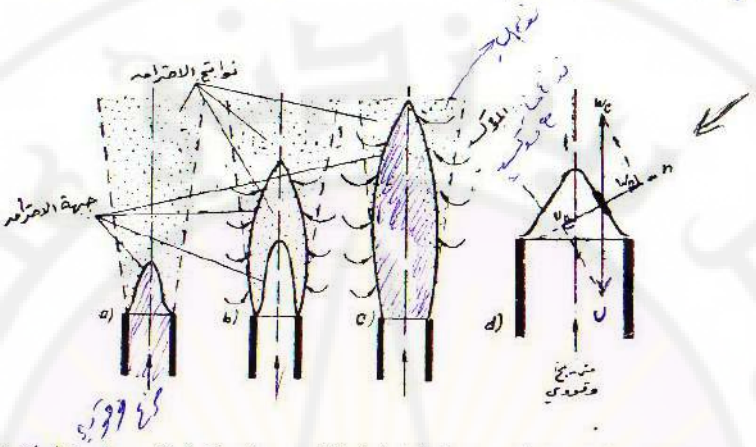
★ في طريقة الاحتراق الانتشارية تتم عمليتا المزج والاحتراق في آن واحد ، وبذا فان زمن الاحتراق يساوي الوقت اللازم للعمليات الفيزيائية $\tau_b = \tau_{ph}$.

★ في حالات الاحتراق الكينيماتيكي ـ الانتشاري يمزج الغاز المحترق جزئيا مع ما يسمى بالهواء الاولي ، وينضم الهواء الثانوي فيما بعد الى المزيج الملتهب في غرفة الاحتراق .

★ من المعلوم ان بنية الشعلة وطولها متعلقان الى حد كبير بنظامي الجريان المعروفين الصفائحي والمتهيج (عدد Re) ويحدث الاحتراق في منطقة صغيرة تسمى جبهة الاحتراق ، ففي حالة الاحتراق الكينيماتيكي تأخذ جبهة الاحتراق شكل السطح العازل بين المزيج الغازي الوقودي وبين نواتج الاحتراق .

★ في الاحتراق الانتشاري يتشكل ما يسمى بجبهة الاحتراق الانتشاري التي تعتبر فاصلا بين نواتج الاحتراق وبين مزيج الغاز مع نواتج الاحتراق التي تتحرك للقاء الغاز .

في الاحتراق الوسطي تتشكل كلا جبهتي الاحتراق السابقتين .



الشكل (٢-٣): بنية الشعلة الكينيماتيكية a ؛ والمختلطة b ؛
والانتشارية c ، ومخطط جبهة الاحتراق d .
w_e - سرعة الجريان ، U_n - سرعة انتشار اللهب الناظمية ،
w_n - مسقط w_e على الناظم n .

على الشكل (٢-٣) تبين بنية شعلة الاحتراق في الحالات المذكورة ويتسخن المزيج المندفع نحو الجبهة بفعل الانتقال الحراري الاشعاعي والتوصيلي ، ويلتهب المزيج الساخن حتى درجة الاشتعال في الجبهة ذاتها ، ثم تغادر نواتج الاحتراق هذه المنطقة .

تتأثر وضعية جبهة الاحتراق بعوامل عديدة منها : تركيز الوقود الغازي داخل المزيج ، سرعة جريان المزيج ، والشكل الهندسي لمقطع انبوبة الحراق والخواص الفيزيائية للغاز .

تتحرك جبهة الاحتراق في الاتجاه الناظم لسطحها ، ويستمر ذلك

التحرك حتى تتحقق المساواة بين كمية المزيج الوقودي الوافد وبين كمية نواتج الاحتراق ، عند ذاك يتحقق ايضا التوازن الحراري ، وهذا يعني ان الطاقة الحرارية المنبعثة من الجبهة تتساوى مع الحرارة المنقولة مع المزيج الوقودي البارد .

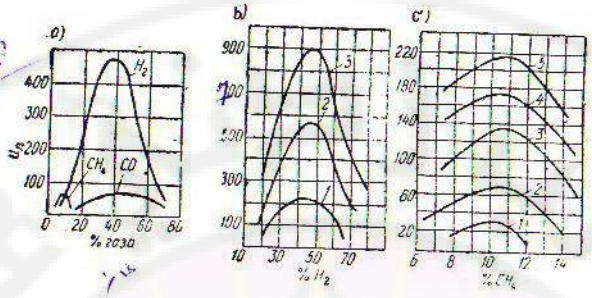
★ من المعروف ان اللهب يسير بسرعة تساوي U ، واذا اخذنا مسقط السرعة المذكورة على الاتجاه الناظمي لسطح جبهة الاحتراق ، تشكل لدينا ما يسمى بسرعة اللهب الناظمية U_n والتي تعتبر من اهم خواص احتراق الوقود الغازي ، عند تساوي السرعة U_n مع مسقط سرعة تيار المزيج الوقودي على الاتجاه الناظمي للجبهة $\bar{W}_n$ يقال بان جبهة الاحتراق اصبحت ثابتة بالنسبة لمقطع الانبوبة .

★ تتعلق السرعة U_n بعوامل عديدة منها النشاط الكيميائي للغاز الطبيعي ؛ تركيزه في المزيج الوقودي ؛ درجة حرارة التسخين الابتدائي (الشكل ٢-٤) ، كما يلعب تركيز الوقود داخل المزيج دورا هاما في عمليات الاحتراق ، ففي الحالة عندما يكون اقل من حده الادنى او اكثر من الاعلى فان لهب الاحتراق يخبو ثم ينطفئ

★ تتحدد قابلية الغاز للتفاعل بمستوى طاقة التنشيط ، وهي كمية الطاقة التي يتوجب تقديمها للغاز بهدف رفع المستوى الطاقوي لجزيئاته الى الحد الذي يمكنها من قطع الروابط بين الذرات في الجزيئة .

★ تتعلق كمية الحرارة المطروحة في جبهة الاحتراق ودرجة الحرارة فيها بتركيز الغاز ضمن المزيج الوقودي ★ ويؤدي التسخين الابتدائي للمزيج الى رفع درجة الحرارة في الجبهة .

Damascus University



الشكل (٢-٤): تابع سرعة انتشار اللهب الناظمية بالنسبة لتركيز الغاز في المزيج a ٪ وبالنسبة لدرجة حرارة تسخين المزيج c ، b .

583 K	-٣	463 K	-٢	293 K	-١ : b
623K	-٣	473 K	-٢	293 K	-١ : c

ب- احتراق الوقود الصلب :

تتألف عملية احتراق الوقود الصلب من المراحل التالية :

(١) تجفيف الوقود وتسخينه حتى بدء انتشار الغازات الطيارة

(٢) التهاب الغازات الطيارة واشتعالها

(٣) تسخين فحم الكوك حتى التهابه

(٤) احتراق المواد القابلة للاحتراق في فحم الكوك

يستغرق احتراق فحم الكوك زمنا طويلا وذلك بالمقارنة مع الازما اللازمة لاحتراق المواد الاخرى ، والسبب في ذلك يعود الى توافق عمليتي احتراق فحم الكوك والمواد الطيارة ، علما بأن الاخيرة

تلعب دورا مزدوجا ، فمن ناحية يؤدي احتراقها الى التسخين السريع لفحم الكوك نفسه ، ومن ناحية اخرى فان ذلك يعني تشكل غيمة من نواتج الاحتراق تحيط بجزيئة الفحم وتعيق احتراقها .

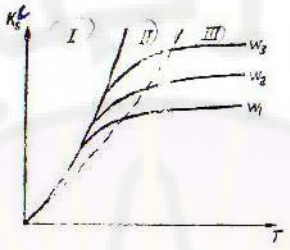
★ من كل ذلك نستنتج ان احتراق الوقود الصلب الذي ينشر قليلا من المواد الطيارة يتطلب وقتا طويلا نسبيا بالمقارنة مع الوقود الذي ينشر كثيرا منها . مثلا الطورب الذي يذهب زمن احتراقه بكامله تقريبا على احتراق المواد الطيارة .

★ تتزايد سرعة احتراق الوقود الصلب وهي بالتعريف كتلة الجزيئة المحترقة منسوبة الى سطحها وواحدة الزمن ($K_s^c [Kg/m^2.sec]$) مع ارتفاع كل من : النشاط الكيميائي للوقود ، درجة الحرارة ، تركيز المادة المؤكسدة ، سرعة التهوية لجزيئة الوقود .

ومن المفهوم ان تناقص ابعاد جزيئة الوقود يؤدي الى تزايد سرعة الاحتراق .

تتعلق سرعة احتراق الجزيئة بسرعة التفاعلات الكيميائية وسرعة الاجراءات الفيزيائية . وتتحدد سرعة الاحتراق بسرعة الاجراءات الاكثر بطئا بينهما ، واعتمادا على ذلك يمكننا التفريق بين ثلاثة مجالات لتابع سرعة احتراق جزيئة الوقود الصلب (الشكل ٢-٥) . وهي I المجال الكينيماتيكي و II الوسطي و III الانتشاري . في المجال الاول تتعلق سرعة الاحتراق بدرجة حرارة التفاعل او بكلمة اخرى تتعلق بسرعة التفاعل الكيميائي ، في المجال الوسطي تأخذ سرعة التفاعل الكيميائي وسرعة الانتشار قيما متكافئة وهذا يعني ان كمية المؤكسد تصرف بأكملها على الاحتراق .

ولزيادة الاخيرة يتوجب رفع سرعة التهوية w من w_1 الى w_2 ؛ w_3 .



الشكل (٢–٥): تابع سرعة احتراق الوقود الصلب (الانتراسيت) بالنسبة لدرجة الحرارة T وسرعة التهوية w.
مناطق الاحتراق : I – كينيماتيكية ، II – مختلطة
III – انتشارية . سرعات التهوية $w_3 > w_2 > w_1$.

ج – احتراق الوقود السائل :

في الوقت الحاضر تنتشر بشكل واسع طريقة احراق الوقود السائل بشكله الهرذن ،ذلك ان ترذيذ الوقود السائل يسرع الى حد كبير عملية احتراقه نظرا للازدياد الكبير لسطح التماس بين الوقود وبين الاوكسجين ومن الامور الهامة في احتراق الوقود السائل ان درجة حرارة غليانه تقل عن درجة حرارة اشتعاله الذاتي، اي درجة الحرارة الدنيا التي يبدأ عندها التهاب الوقود ومن ثم اشتعاله بمعزل عن اي مصدر حراري آخر . ان درجة الحرارة الاخيرة اعلى من تلك التي يحترق فيها الوقود بمساعدة المصدر الحراري

الجانبي .

* وعلى ذلك تتفهم ميكانيزم احتراق الوقود السائل ، الذي يتطلب وجود المادة المؤكسدة وتحول الوقود السائل الى الحالة البخارية .

* مما سبق نستنتج ان احتراق الوقود السائل يتطلب المراحل التالية

١- تسخين الوقود ومن ثم تبخيره

٢- مزج بخار الوقود مع المؤكسد

٣- اشتعال المزيج الوقودي المتشكل

٤- احتراق المزيج .

* عند وصول قطرة الوقود الى الفراغ المسخن لدرجة حرارة اعلى من درجة الاشتعال تتبخر جزئيا ، ومن ثم تمتزج مع الهواء مشكلة المزيج الجاهز للاحتراق ، يبدأ الاشتعال بعدها عندما يصل تركيز الوقود الى نسبة اعلى من الحد الادنى اللازم للاشتعال ، في المرحلة التالية تتزايد سرعة الاحتراق، الذي يعتمد اكثر فأكثر على حرارته الذاتية ، مما يتسبب في تزايد بخر الوقود وارتفاع الحرارة الابتدائية للموقد .

* مما سبق ينتج ان عملية احتراق الوقود السائل تتضمن اجرائين متفاعلين منفصلين ، احدهما فيزيائي بطبيعته وهو تبخر قطرات الوقود والثاني كيميائي وهو احتراق المزيج الجاهز للاحتراق .

* وتتعلق سرعة الاحتراق بكلا الاجرائين ولذا فان الزمن اللازم لعملية الاحتراق يتحدد بالاجراء الاكثر بطئا ، ويشغل زمن البخر اغلبية زمن الاحتراق ومنه نستنتج ان زيادة دقة ترذيذ السائل تعني تخفيض الزمن اللازم لاحتراقه داخل الموقد .

٢-٥ حساب هواء الاحتراق والغازات الناتجة

تتفاعل مواد الوقود مع اوكسجين الهواء حسب تناسبات كمية محددة بالتفاعلات الكيميائية للاحتراق .

آ- حساب هواء الاحتراق للوقود الصلب والسائل

من المعادلات الكيميائية للوقود الصلب والسائل ينتج :

$$C + O_2 = CO_2 \quad ; \quad (20-2)$$

$$12\ kg\ C + 32\ kg\ O_2 = 44\ kg\ CO_2$$

$$1\ kg\ C + \frac{32}{12}\ kg\ O_2 = \frac{11}{3}\ kg\ CO_2$$

ويحترق الكبريت حسب المعادلة :

$$\underset{32}{S} + \underset{32}{O_2} = \underset{64}{SO_2} \quad ; \quad (21-2)$$

$$1\ kg\ S + 1\ kg\ O_2 = 2\ kg\ SO_2$$

الهيدروجين :

$$2H_2 + O_2 = 2H_2O \quad ; \quad (22-2)$$

$$4\ Kg\ H_2 + 32\ kg\ O_2 = 36\ kg\ H_2O$$

$$kg\ H_2 + 8\ kg\ O_2 = 9\ kg\ H_2O$$

اعتمادا على النسب المئوية للكتلة العاملة للوقود نقول ان واحد kg منه يحوي على :

C^p/100 kg فحم : S_v^p/100 kg كبريت طيار ؛ H^p/100 kg هيدروجين ؛ O^p/100 kg اوكسجين ، ومنه نستنتج ان كمية الاوكسجين الكلية واللازمة نظريا لاحتراق kg واحد من الوقود تساوي :

$$M_{O_2}^{\circ} = \frac{\frac{8}{3} C^p + 8 H^p + S_v^p - O^p}{100} \quad ; \quad (23-2)$$

اذا علمنا ان نسبة الاوكسجين الكلية داخل الهواء هي 0,232 فيمكننا حساب كتلة الهواء اللازمة لاحتراق kg واحد من الوقود :

$$M_a^{\circ} = \frac{2,67\, C^p + 8 H^p + S_v^p - O^p}{100} \cdot \frac{100}{23,2}$$

$$M_a^{\circ} = 0,115 \left(C^p + 0,375\, S_v^p \right) + 0,345\, H^p - 0,043\, O^p \quad ; \quad (24-2)$$

من الجداول نجد ان كثافة الهواء عند الشروط الفيزيائية النظامية $\rho_a = 1,293$ kg/m^3 ؛ ومنه يمكننا حساب المصروف الحجمي اللازم نظريا لاحتراق kg من الوقود الصلب او السائل :

$$V_a^{\circ} = \frac{M_a^{\circ}}{1,293} \quad m^3/kg$$

او كما يلـــــي :

$$V_a^\circ = 0,0889\,(C^p + 0,375\,S_o^p) + 0,265\,H^p - 0,033\,O^p \quad ; \quad (24-2)$$

ب ـ حساب هواء الاحتراق للوقود الغازي

يمكن حساب المصروف الحجمي الهوائي اللازم لاحتراق m^3 واحد من الوقود الغازي باستخدام مفهوم النسب الحجمية لمركبات الوقود الغازي . نكتب اولا المعادلات الكيميائية اللازمة :

$$H_2 + 0,5\,O_2 = H_2O$$

$$CO + 0,5\,O_2 = CO_2$$

$$CH_4 + 2\,O_2 = CO_2 + 2H_2O \quad ; (25-2)$$

$$H_2S + 1,5\,O_2 = SO_2 + H_2O$$

$$C_mH_n + \left(m + \frac{n}{4}\right) O_2 = m\,CO_2 + \frac{n}{2}\,H_2O$$

اذا علمنا ان الاوكسجين يشغل نسبة 21 % من حجم الهواء في الشروط الفيزيائية النظامية فيمكننا حساب المصروف النظـــري الحجمي بالعلاقة التالـــــية :

$$V_a^\circ = 0,0476\left[0,5\,CO + 0,5\,H_2 + 2\,CH_4 + 1,5\,H_2S + \sum\left(m + \frac{n}{4}\right) C_mH_n - O_2\right] \; ; \; m^3/m^3 \quad (26-2)$$

في الشروط الحقيقية لعمل الموقد لاتؤدي النسبة النظرية لمصروف الهواء دورها المرجو وذلك لسوء توزيع الهواء على كافة ارجاء الموقد لذا يضخ اليه كمية من الهواء تزيد عن حاجة الاحتراق النظرية V_a° .

اما نسبة حجم الهواء الفعلي الى الحجم النظري V_a° فتسمى معامل فائض الهواء α :

$$\alpha = \frac{V_r}{V_a^\circ} \qquad (27-2)$$

عند تصميم غرف الاحتراق او الموقد يختار المعامل α في المجال :

$$\alpha = 1{,}02 \div 1{,}5$$

ج) تركيب وكمية نواتج الاحتراق التام للوقود الصلب والسائل

تحتوي نواتج الاحتراق عندما تكون α مساوية الواحد على الغازات ثلاثية الذرات SO_2 ، CO_2 وعلى بخار الماء H_2O الناتج عن احتراق الهيدروجين ، وغاز الازوت N_2 الناتج عن تحلل الوقود ، والازوت الداخل مع هواء الاحتراق .

عدا عن ذلك تحتوي نواتج الاحتراق على الماء الناتج عن تبخر الرطوبة الداخلية للوقود ، او الآتية مع هواء الاحتراق . كما يمكن للنواتج ان تحتوي على بخار الماء المستعمل لترذيذ المازوت .

في الحالة عندما تكون $\alpha > 1$ ، تتضمن نواتج الاحتراق على كمية اضافية من الاوكسجين والازوت ورطوبة الهواء .

لنعط النسب المئوية الحجمية للغازات الرموز التالية : CO_2 ، N_2 ، SO_2 كما نرمز V_{CO_2} ، $V^{\circ}_{N_2}$ ، V_{SO_2} على الحجوم الناتجة عن احتراق واحدة الكتلة (kg) او الحجم (m^3) من الوقود وذلك عندما تكون $\alpha = 1$ (العلامة $^{\circ}$ تشير ان $\alpha = 1$)وبذلك نكتب التركيب المئوي لغازات الاحتراق كما يلي :

$$CO_2 + SO_2 + N^{\circ}_2 + H_2O = 100\% \quad ; (28-2)$$

وايضا : حجم الغازات الناتجة عن احتراق kg او m^3 من الوقود :

$$V^{\circ}_g = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V^{\circ}_{N_2} + V^{\circ}_{H_2O} \quad ; \quad (29-2)$$

في العلاقة (29-2) V°_g - الحجم الكلي لنواتج احتراق واحدة الكتلة (او الحجم) عند الشروط الفيزيائية النظامية : m^3/kg أو m^3/m^3 .

للتبسيط نقول ان حجم الغازات الجافة ثلاثية الذرات يساوي :

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} \quad ; \quad (30-2)$$

حجم الغازات الجافة يساوي :

$$V^{\circ}_{c.g} = V_{RO_2} + V^{\circ}_{N_2} \quad ; \quad (31-2)$$

ومنه يكون لدينا :

$$V^{\circ}_{g} = V^{\circ}_{c.g} + V^{\circ}_{H_2O} \quad ; \quad (32-2)$$

حيث ان : $V^{\circ}_{N_2}$ ؛ $V^{\circ}_{H_2O}$ ؛ $V^{\circ}_{c.g}$ ؛ V°_{g} ؛ V_{RO_2} –

هي الحجوم النظرية للغازات الناتجة عن احتراق kg واحد من الوقود الصلب او السائل .

يمكننا حساب كتلة الغازات الجافة ثلاثية الذرات حسب العلاقة التالية :

$$M_{RO_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{C^p}{100} + \frac{64}{32} \cdot \frac{S^p_v}{100}$$

من الجداول نجد كثافة غازات CO_2 ، SO_2 عند الشروط الفيزيائية النظامية : $\rho_{CO_2} = 1,964 \ kg/m^3$ ؛ $\rho_{SO_2} = 2,86 \ kg/m^3$

وبذلك يمكننا حساب حجم الغازات الانفة الذكر :

$$V_{RO_2} = \frac{\frac{44}{12} \cdot \frac{C^p}{100}}{1,964} + \frac{\frac{64}{32} \cdot \frac{S^p_v}{100}}{2,86}$$

$$V_{RO_2} = 1,87 \ \frac{C^p + 0,375 \ S^p_v}{100} \quad ; \quad (33-2)$$

يعطى الحجم الكلي لابخرة الماء بالعلاقة التالية ($\alpha = 1$) :

$$V^{o}_{H2O} = V^{g}_{H_2O} + V^{c}_{H_2O} + V^{f}_{H_2O} + V^{a}_{H_2O}$$

تمثل الحدود الواردة في العلاقة السابقة على الترتيب حجوم ابخرة الماء الناتجة عن احتراق الهيدروجين ومن الرطوبة الداخلية للوقود والبخار المستخدم لترذيذ المازوت ومن الرطوبة الآتية مع الهواء .

وتتحدد هذه الكميات بالعلاقات التالية :

$$V^{g}_{H_2O} = \frac{\frac{36}{4}\,\frac{H^p}{100}}{0,805} = 0,111\ H^p$$

$$V^{c}_{H_2O} = \frac{\frac{W^p}{100}}{0,805} = 0,0124\ W^p$$

$$V^{f}_{H_2O} = \frac{W_f}{0.805} = 1,24\ W_f$$

$$V^{a}_{H_2O} = \frac{V^{o}_{a}\,\frac{d^a}{1000}}{0,805} = 0,0161\ V^{o}_{a}$$

العدد (0.805) يمثل كثافة بخار الماء عند الشـــــروط الفيزيائية النظامية Kg / m^3 .

d^a - نسبة رطوبة الهواء وتفرض ان $d^a = 13\ g / m^3$

W_f - مصروف بخار الماء المكرس لترذيذ المازوت بخار

$W_f = 0,3 \div 0,35$ Kg/Kg ، وبعد التعويض يكون لدينا

ما يلي :

$$V^{\circ}_{H_2O} = 0,111\ H^p + 0,0124\ W^p + 1,24\ W_f + \\ + 0,0161\ V^{\circ}_a \qquad (34-2)$$

حجم الازوت الخارج مع نواتج الاحتراق :

$$V^{\circ}_{N_2} = V^{\circ}_a \cdot 0,79 + \frac{N^p}{100 \cdot \rho_{N_2}} \quad : (35-2)$$

حيث : ρ_{N_2} — كثافة الازوت عند الشروط الفيزيائية النظامية

$\rho_{N_2} = 1,25$ Kg/m^3

نسمي حجوم نواتج الاحتراق في الحالة عندما يكون معامل فائض الهواء $\alpha > 1$ بأنها فعلية ، وعندئذ يضاف حجم الهواء الفائض الى الحجم الناتج عن الاحتراق نظريا ، ومنه يكون لدينا الحجم الفعلي لابخرة الماء :

$$V_{H_2O} = V^{\circ}_{H_2O} + 0,0161 \cdot V^{\circ}_a\ (\alpha - 1) \quad : (36-2)$$

وللغازات ثنائية الذرات :

$$V_{R_2} = V^{\circ}_{N_2} + (\alpha - 1)\ V^{\circ}_a \quad : (37-2)$$

وللغازات الجافـــة :

$$V_{c.g} = V_{RO_2} + V_{N_2} + (\alpha - 1) V_a^\circ \quad : \qquad (38-2)$$

الحجم الفعلي لنواتج الاحتراق التام :

$$V_g = V_{c.g} + V_{H_2O}$$

$$V_g = V_{RO_2} + V_{N_2}^\circ + V_{H_2O}^\circ + 1{,}0161\, V_a^\circ (\alpha - 1) \quad : (39-2)$$

من العلاقة نستنتج ان حجوم الغازات الجافة ثلاثية الذرات لا تتأثر من تغير معامل فائض الهواء α .

د - تركيب وكمية نواتج الاحتراق التام للوقود الغازي

عند احتراق الغازات المكونة للوقود الغازي وهي :

CH_4 ؛ $C_m H_n$ ؛ CO ؛ H_2 ينتج غاز الفحم CO_2 وابخرة الماء ، اما غاز الكبريت H_2S فينتج غاز SO_2 -

يمكننا حساب حجم الغازات الجافة ثلاثية الذرات باتباع نفس الطرق السابقة وذلك عندما يكون $\alpha = 1$:

$$V_{RO_2} = 0{,}01 \left[CO_2^a + CO + H_2S + \sum C_m H_n \right] ;$$

$$\frac{m^3}{m^3} \; ; \; \frac{\text{غاز احتراق}}{\text{وقود غازي}} \; ; \qquad (40-2)$$

حجم بخار الماء عند $\alpha = 1$:

$$V^{o}_{H_2O} = 0{,}01\left[H_2S + H_2 + 2\,CH_4 + 0{,}124\, d^{g} + \right.$$
$$\left. + \sum \frac{n}{2}\, C_mH_n + 1{,}61\, V_a^{o} \right] \cdot m^3/m^3 \quad : (41\text{-}2)$$

في العلاقات السابقة :

d^{g} - رطوبة الغاز ، g / m^3 ؛

CO_2^{c} - النسبة المئوية الحجمية لغاز ثاني اوكسيد الكاربون الموجود ضمن الوقود الغازي يعطى الحجم الفعلي لنواتج الاحتراق التام للوقود الغازي عند $\alpha > 1$ بالعلاقة :

$$V_g = V_{RO_2} + V^{o}_{H_2O} + 1{,}0161\,(\alpha - 1) + V^{o}_{N_2} \quad ; (42\text{-}2)$$

في العلاقة الاخيرة :

V_a^{o} – مصروف الهواء الحجمي اللازم لاحتراق m^3 واحد من الوقود الغازي ؛ m^3/m^3

$V^{o}_{N_2}$ - حجم غاز الآزوت عندما يكون $\alpha = 1$ ويحسب بصورة مشابهة لحسابات الوقود الصلب والسائل .

هناك طرق اخرى لمعرفة التركيب الكيميائي لنواتج الاحتراق ، منها مثلا التحليل الكيميائي الغازي الذي يستعمل بصورة دائمة لمراقبة جودة الاحتراق . ولتحقيق ذلك تستخدم الاجهزة الصناعية المكرسة خصيصا لهذا الهدف .

٦-٢ تسرب الهواء الى مسار غازات الاحتراق

يعمل مسار غازات الاحتراق عادة تحت التخلخل ، الذي يأخذ قيما متحولة ، فهو يساوي في اعلى الموقد حوالي 20 Pa ، بينما يزداد قبل مروحة الامتصاص حتى 2000 ÷ 3000 Pa .

تبلغ مساحة مولد البخار حسب الابعاد الخارجية 4000 m^2 ÷ 2000 . وتحتوي سطوح المولد على عدد كبير من النوافذ والفتحات ، التي تكون غير محكمة الاغلاق ، كما توجد بعض الشقوق ضمن جدران المرجل وفي امكنة خروج الانابيب وفي امكنة اخرى .

يؤدي تسرب الهواء خلال الشقوق الى زيادة معامل فائض الهواء وبذلك يزداد حجم نواتج الاحتراق اعتبارا من الموقد وحتى المقطع الخروجي لمولد البخار .

الشكل (٢-٦) يبين تغير فائض الهواء على مسار غازات الاحتراق في مولد البخار .

1) معامل فائض الهواء عند مخرج الموقد :

$$\alpha_t = \alpha'_{s.c}$$

2) خلف المحمص الاولي :

$$\alpha''_{s.c} = \alpha'_{s.c} + \Delta\alpha_{s.c}$$

$$\alpha''_{s.c} = \alpha_t + \Delta\alpha_{s.c}$$

3) خلف المحمص الوسطي :

$$\alpha''_{np} = \alpha_t + \Delta\alpha_{s.c} + \Delta\alpha_{np}$$

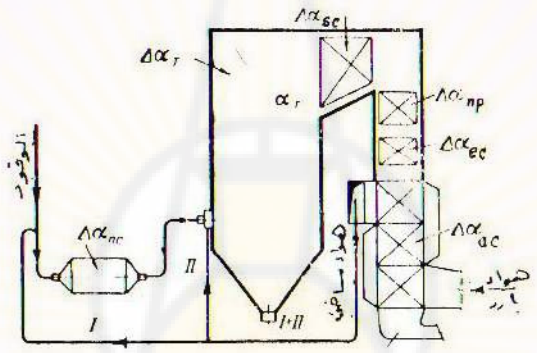
4) خلف الموفـــر :

$$\alpha''_{ec} = \alpha_t + \Delta\alpha_{sc} + \Delta\alpha_{np} + \Delta\alpha_{ec}$$

5) خلف مسخن الهواء :

$$\alpha''_{ac} = \alpha_{yx} = \alpha_t + \Delta\alpha_{sc} + \Delta\alpha_{np} + \Delta\alpha_{ec} + \Delta\alpha_{ac}$$

يجري تثبيت معامل فائض الهواء انطلاقا من الشروط الاقتصادية



الشكل (٢-٦) : تسرب الهواء الى منشأة مولد البخار .

١- الهواء الاولي ، ٢- الهواء الثانوي .

للاحتراق ، وتتعلق نسبة الهواء المتسرب بتصميم وبنوعية تجميع مولد البخار ، وكذلك الامر بشروط الاستثمار ، وفي الشروط الاعتيادية تتراوح التسربات في الحدود $\Sigma\ \Delta\alpha = 0,2 \div 0,3$ ، وعادة يعطى اكبر الاهمية لمنع تسرب الهواء البارد الى جوف مولد البخار.

يعدل معامل فائض الهواء α_t بسبب التسربات الى الموقد $\Delta\alpha_t$ ؛ والى جملة تحضير غبار الفحم $\Delta\alpha_{nc}$ ؛ ومن مسخن الهواء $\Delta\alpha'_{ac}$ ؛ ولهذا السبب تعطى قيمته عند مدخل المسخن كما يلي :

$$\alpha_{ac} = \alpha_t - \Delta\alpha_t - \Delta\alpha_{nc} + \Delta\alpha'_{ac} \quad ; \quad (\text{o .43-2})$$

★ مراقبة تسرب الهواء :

• يكون تركيب الوقود في مرحلة تصميم مولد البخار معينا ، اما معامل فائض الهواء فيتحدد بالاعتماد على معدلات التجربة العملية وبالاستناد على الحساب الحراري؛الذي يحدد ايضا حجم غازات الاحتراق

• بالنسبة لمولدات البخار الواقعة في الاستثمار ، يكون تركيب الوقود المستخدم محددا ايضا ، الا ان معامل فائض الهواء يظل مجهولا وهناك عدد من العلاقات لتحديده نورد فيما يلي اكثرها استخداما

(1) علاقة غاز الفحم

عند الاحتراق الكامل للوقود تتحقق مساواة معامل فائض الهواء للواحد $\alpha = 1$ ، وتتكون نواتج الاحتراق من $RO_2 + N_2 = 100\,\%$ ؛ واذا ورد غاز الازوت فقط من الهواء فانه يشكل نسبة 79 % حجما عندئذ تكون القيمة العظمى للمركبات RO_2 مساوية $RO_2^{max} = 21\,\%$ ، عمليا ينتقل الازوت الداخل في الوقود الى نواتج الاحتراق ، مما يؤدي الى زيادة نسبة الآزوت

فيها ويكون $RO_2^{max} < 21\ \%$.

في الشروط العملية ترد الى الموقد كمية من الهواء اكبر من القيمة اللازمة نظريا للاحتراق ، عدا عن ذلك يتسرب هواء اضافي الى ممرات الغازات ومنه ينتج ان $RO_2 < RO_2^{max}$.

لنبرهن ان نسبتهما تمثل معامل فائض الهواء ولهذا نشكل الجدول التالي :

الجدول ٢-١

معامل فائض الهواء	حجم الهواء m^3/kg	حجم RO_2 m^3/kg	حصة RO_2 في نواتج الاحتراق ، % .
$\alpha = 1$	V_a°	V_{RO_2}	$RO_2^{max} = \frac{V_{RO_2}}{V_{c.g}} \cdot 100 \approx \frac{V_{RO_2}}{V_a^\circ} \cdot 100$
$\alpha > 1$	αV_a°	V_{RO_2}	$RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{c.g}} \cdot 100 \approx \frac{V_{RO_2}}{\alpha V_a^\circ} \cdot 100$

من الجدول ينتج ان :

$$\alpha = \frac{RO_2^{max}}{RO_2} \quad ; \quad (44-2)$$

علاقة الفحم المذكورة بسيطة وسهلة الاستعمال لسهولة طرق تحديد RO_2 في نواتج الاحتراق ، وتتعلق دقة تحديد α بدقة تحديد RO_2^{max} ، لان تركيب الوقود المزود يمكن ان يتغير ، وبالتالي تتغير الكمية RO_2^{max} ، مماسبق نستنتج ان تثبيت RO_2 في الاستثمار لا يؤدي دائما الى العمل على نظام الاحتراق الامثل .

(٢) العلاقة الاوكسيجينية

يمكن تمثيل حجم الهواء اللازم نظريا للاحتراق كما يلي :

$$V_a^{\circ} = V_a - \Delta V_a$$

V_a ؛ ΔV_a - حجم الهواء الفعلي وفائض الهواء .

ومنه نستنتج :

$$\alpha = \frac{V_a}{V_a - \Delta V_a} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta V_a}{V_a}} \quad ; \quad (45-2)$$

بافتراض ان حجم الغازات الجافة يساوي 100 %

نكتب النسب التالية :

$$\frac{O_2}{100} = \frac{V_{O_2}}{V_{c.g}} \quad ; \quad \frac{N}{100} = \frac{V_{N_2}}{V_{c.g}} \quad ; \quad (46-2)$$

نكتب حجم الهواء الفائض بدلالة حجم الاوكسجين الحر

$$\Delta V_a = V_{O_2} \cdot \frac{100}{21} \quad ; \quad (47-2)$$

ويكون حجم كمية الهواء الفعلية بدلالة الآزوت ، الذي انتقل الى نواتج الاحتراق من الهواء المزود للاكسدة كما يلي :

$$V_a = V_{N_2} \cdot \frac{100}{79} \quad ; \quad (48-2)$$

وبالاستناد الى (46 - 2) نكتب العلاقات (47 - 2 و (48 - 2) كما يلي :

$$\Delta V_a = \frac{O_2}{21} \cdot V_{c.g} \quad ; \quad (49-2)$$

$$V_a = \frac{N_2}{79} \cdot V_{c.g} \quad ; \quad (50-2)$$

وبعد تعويض (49-2) و (50 - 2) في (45 - 2) نجد ما يلي :

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2}{N_2}} \quad ; \quad (51-2)$$

العلاقة الاخيرة صحيحة في حالة الاحتراق الكامل للوقود ، وفي حالة وجود نواتج الاحتراق الناقص (CO) ، لايعتبر كل الاوكسجين

فائضا ، لان قسما منه قد استهلك على اكسدة CO ، الذي يتحول الى CO_2 ، وبالتالي ستتناقص نتيجة لذلك كمية الاوكسجين الفائضة ، والمعلوم انه لمتابعة احراق واحد كيلو مول يتطلب نصف كيلو مول اوكسجين ، وبذلك تصبح كمية الاوكسجين الحر $(O_2 - CO/2)$ ، وبذلك تصبح العلاقة (2 - 51) كما يلي :

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79\,\frac{O_2 - 0{,}5\,CO}{N_2}} \quad ; \quad (52-2)$$

لا تتعين في نواتج الاحتراق كمية الآزوت N_2 ، وانما تستبدل بالشكل التالي :

$$N_2 = 100 - (RO_2 + O_2 + CO) \ : \ \%$$

واخيرا نحصل على ما يلي :

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79\,\frac{O_2 - 0{,}5\,CO}{100 - (RO_2 + O_2 + CO)}} \quad ; \quad (53-2)$$

باهمال وجود الازوت في الوقود عندئذ يتوجب حساب آزوت الهواء $(79\ \%)$ وبذلك تصبح (2 - 51) كما يلي :

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2} \quad ; \quad (54-2)$$

ي ان معامل فائض الهواء يتمثل بنسبة حجم الاوكسيجين 21 %
لداخل الى الموقد الى حجم الاوكسيجين المستهلك % $(21 - O_2)$

تتميز العلاقة الاوكسيجينية بأن معامل فائض الهواء فيها متعلق بتواجد الاوكسيجين الحر في نواتج الاحتراق ، بينما لاينعكس تركيب الوقود بالعلاقة تقريبا،وان ذلك الامر يسمح بتوجيه عملية الاحتراق ومراقبتها بوثوقية اكبر .

من العلاقات (2 - 51) و (2 - 53) نستنتج انه لتحديد معامل فائض الهواء يتوجب معرفة التركيب المئوي لنواتج الاحتراق ويحدث ذلك عمليا بالتحليل الغازي المؤتمت الاوكسيجيني او الكيميائي. عند تجريب مولدات البخار تستخدم اجهزة تحليل الغازات المخبرية وتعتبر طرق التحليل اللوني (كروماتوغرافي) اكثر عصرية في الوقت الحاضر وخاصة بالنسبة لاحراق المازوت والغاز .

يمكن التحليل الغازي من تنظيم الاحتراق ، ومن مراقبة كثافة الغازات فبعد ان نعين تركيب ونسب مركبات المزيج الغازي تجريبيا يمكننا حساب حجم نواتج الاحتراق .

٢-٧ انتالبي نواتج الاحتراق الغازية

يمكن كتابة انتالبي الحجم النظري لبعض مركبات نواتج الاحتراق كما يلي :

للغازات ثلاثية الذرات : $\bar{I}^{\circ}_{RO_2} = V_{RO_2} \cdot (C\vartheta)_{RO_2}$

للآزوت : $I^{\circ}_{N_2} = V^{\circ}_{N_2} \ (C\vartheta)_{N_2}$

لابخـــرة الماء :

$$I^{\circ}_{H_2O} = V^{\circ}_{H_2O} (c\vartheta)_{H_2O}$$

حيث :

ϑ - درجة حرارة نواتج الاحتراق ؛ °C

C - السعة الحرارية لنواتج الاحتراق عند درجة الحرارة المعطاة ، $KJ / m^3.K$.

ويكون الانتالبي الاجمالي للحجم النظري كما يلي :

$$I^{\circ}_g = V_{RO_2} (c\vartheta)_{RO_2} + V^{\circ}_{N_2} (c\vartheta)_{N_2} +$$

$$+ V^{\circ}_{H_2O} (c\vartheta)_{H_2O} \quad ; \quad KJ/Kg \; ; \; KJ/m^3 \; ; \; (55-2)$$

عند احراق الوقود الصلب الغباري ، والذي يخلف الكثير مـــن الرماد يتوجب حساب كمية الحرارة الخارجة مع غازات الاحتراق ، وبذا تأخذ العلاقة الاخيرة الشكل التالي :

$$I^{\circ}_g = V_{RO_2} (c\vartheta)_{RO_2} + V^{\circ}_{N_2} (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O} (c\vartheta)_{H_2O} +$$

$$+ \frac{A^p}{100} . a_v (c\vartheta)_z \quad ; KJ/Kg \; ; \qquad (56-2)$$

حيث :

a_v - حصة رماد الوقود المحمولة مع غازات الاحتراق ؛

C_z - السعة الحرارية للرماد المحمول $KJ / Kg.K$.

يتعلق انتالبي الحجم الفعلي للغازات بمعامل فائض الهواء :

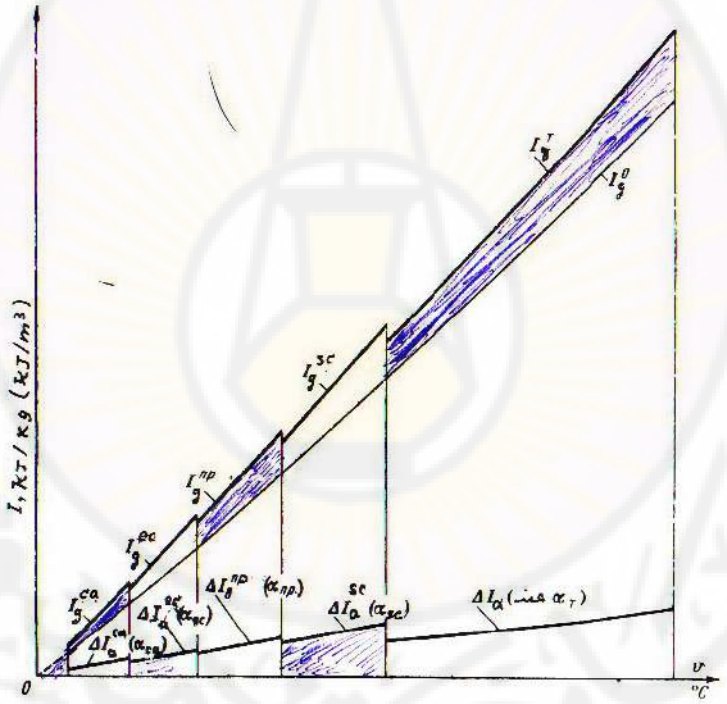
$$I_g = I^{\circ}_g + \Delta I_a = I^{\circ}_g + (\alpha - 1) I^{\circ}_a \; ; \; (57-2)$$

علما بان انتالبي الهواء النظري يحدد بالعلاقة :

$$I_a^\circ = V_a (C\vartheta)_a \; ; \; KJ/kg \; ; \; KJ/m^3 \; , \; (58\text{-}2)$$

C_a - السعة الحرارية للهواء عند درجة حرارة غازات الاحتراق ϑ ، $KJ/m^3.^\circ K$.

يعطى التمثيل التحليلي لانتالبي نواتج الاحتراق وانتالبي الهواء الفائض على شكل جداول او منحنيات بيانية (الشكل ٢-٧) متعلقة بدرجة الحرارة ϑ ومعامل فائض الهواء .



الشكل (٢-٧) : مخطط $I-\vartheta$ للغازات .

الفصـــــل الثـــالث

الميزان الحراري لمولدات البخار وفعالية استهلاك الوقود

٣-١ معادلة الميزان الحراري :

★ يضع الميزان الحراري الصلة بين الطاقة الحرارية المبذولة في مولد البخار ، وبين الطاقة الحرارية التي يكتسبها جسم التشغيل واعتمادا على الميزان الحراري يمكننا معرفة اتجاهات التدفقات الحرارية التي تحدث في المولد ونسبها كما ويمكن حساب مردود المولد ومصروفات الوقود .

★ في موقد مولد البخار تتحول الطاقة الكيميائية الكامنة في الوقود الى طاقة حرارية تنتقل مع نواتج الاحتراق وتستعمل لتسخين الماء او لانتاج البخار المحمص .

★ من المفهوم ان بخار الماء الناتج في المرجل يتلقى جزءا فقط من الطاقة الحرارية المبذولة ، اما الجزء الاخر فيضيع بتأثيـــــر عوامل عديدة منها الطاقة الحرارية الضائعة مع غازات الاحتراق الخارجة الى الوسط الخارجي ، وانخفاض فاعلية الاحتراق ورداءة نقل الطاقة الى جسم التشغيل (الماء او البخار) .

تنسب معادلة الميزان الحراري عادة لواحدة كتلة الوقود (Kg)

او لواحدة حجمه (m^3) في حالة الوقود الغازي ، وتكتب على الشكل التالي :

$$Q_p^p = Q_1 + \sum Q_n : KJ/Kg \quad (1-3)$$

او

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 : (2-3)$$

حيث ان :

- Q_p^p ـ الطاقة الحرارية المستملكة والمنسوبة لواحدة الكتلة او الحجم للوقود ؛
- Q_1 ـ الطاقة الحرارية المستعملة او المفيدة ؛
- $\sum Q_n$ ـ الضياع الطاقي الكلي ويساوي الى مجموع الضياعات ؛
- Q_2 ـ الناتجة في التجهيز المرجلي ؛
- Q_3 ـ ضياع الطاقة الحرارية المحمولة مع غازات الاحتراق ؛
- Q_4 ـ الضياع الناتج عن رداءة الاحتراق الكيميائية ؛
- Q_5 ـ الضياع الناتج عن التبادل الحراري بين مولد البخار والوسط الخارجي ؛
- Q_6 ـ ضياع الطاقة الحرارية الفيزيائية للرماد .

اذا قسمنا حدود المعادلة السابقة على Q_p^p واخذنا النسبة المئوية يكون لدينا :

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100\% : (3-3)$$

في المعادلة الاخيرة يمثل الحد الاول q_1 مردود المولد

القائم ؛ اي ذلك الذي لايعكس مصروف الطاقة الكهربائية المبذول — لتدوير مراوح الامتصاص والتهوية ومضخات التغذية .

تتشكل الطاقة المستملكة في الميزان الحراري من المصادر التالية :

$$Q_p^p = Q_b^p + Q_a + Q_s + Q_{ph} \quad ; \quad (4-3)$$

حيث ان :

Q_a – الطاقة الحرارية الداخلة الى مولد البخار مع هواء الاحتراق وتنسب لواحدة كتلة الوقود ، تحسب في الحالات عندما يسخن الهواء اوليا خارج المولد ، اي في المسخنات الكهربائية او ما شابه ذلك .

Q_s – الطاقة الحرارية الداخلة مع بخار الترذيذ ؛

Q_{ph} – الطاقة الحرارية الفيزيائية لواحد كيلوغرام من الوقود (او لواحد m^3 من الوقود الغازي).

لحساب الكمية Q_a نستعمل العلاقة :

$$Q_a = \beta \cdot V_a^\circ \cdot C_p' (T_{2a} - T_{1a}) \quad ; \quad (5-3)$$

C_p' – السعة الحرارية الحجمية الوسطية للهواء المحسوبة بثبوت الضغط ؛

T_{2a} – الحرارة المطلقة للهواء المسخن ؛

T_{1a} – حرارة الهواء البارد المطلقة ؛

β – معامل فائض الهواء المحسوب عند مدخل مسخن الهواء

الى الكمية النظرية اللازمة للاحتراق .

✱ تحسب الطاقة الحرارية الداخلة مع بخار الترذيذ على الشكل التالي :

$$Q_s = W_f \ (i_s - r) \qquad ; \ (6-3)$$

W_f – استهلاك البخار المستعمل للترذيذ ، Kg/Kg ؛

r – حرارة البخـــــر ، KJ/Kg .

✱ الطاقة الحرارية الفيزيائية للوقود

$$Q_{ph} = C_t \ (T_t - 273) \qquad ; \ (7-3)$$

حيث :

C_t – السعة الحرارية الكتلية للوقود ، KJ/Kg.K ؛

T_t – درجة الحرارة المطلقة للوقود ، °K .

٣-٢ ضياعات الحرارة مع الغازات الخارجة

✱ وتظهر بسبب عدم تبريد نواتج الاحتراق الغازية حتى درجة حرارة الهواء الخارجي ، حيث تمتلك الغازات الخارجة درجة حرارة عالية سببها طرح حرارة الاحتراق في الموقد ويمكن حساب ضياع الحرارة مع غازات الاحتراق بالمعادلة التالية :

$$Q_2 = I_{ex} - I_{a.f} \qquad ; \ (8-3)$$

حيث :

I_{ex} – انتالبي الغازات الخارجة ، KJ/Kg ؛

$I_{a.f}$ – انتالبي الهواء البارد ، KJ/Kg .

يمكن كتابة العلاقة (3 - 8) على الشكل التالي :

$$Q_2 = (\Sigma V \cdot C\vartheta)^{\circ}_{ex} + (\alpha_{ex} - 1) I^{\circ}_{a} - I_{a.f} \quad ; \quad (3-9)$$

في العلاقة الاخيرة

$(\Sigma V \cdot C\vartheta)_{ex}$ – انتالبي الغازات الخارجة من اجل $\alpha = 1$ ، KJ/Kg

أو KJ/m^3 ؛

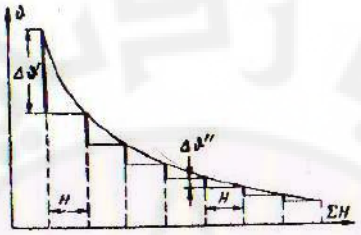
$(\alpha_{ex} - 1) I^{\circ}_{a}$ – انتالبي الهواء الفائض ، $\alpha > 1$ ، KJ/m^3 ، KJ/Kg .

* من العلاقة الاخيرة نتبين ان درجة الحرارة ϑ_{ex} هي المؤثر الاساسي على Q_2 . وبدورها تتعلق درجة الحرارة ϑ_{ex} بكمية سطوح التبادل الحراري وبشدة الانتقال الحراري فيها وتمثل هذه العلاقة بيانيا على الشكل (٣-١) .

* يعتبر اختيار درجة الحرارة النهائية لغازات الاحتراق مسألة تقنية اقتصادية فتخفيض بسيط لدرجة الحرارة ϑ_{ex} في المجال المنخفض ، يتطلب تزايدا كبيرا لسطح التبادل الحراري بينما يؤدي طرح الغازات العالية الحرارة الى زيادة الضياعات الحرارية والى استهلاك غير مبرر للوقود .

* وتحل المسألة المذكورة بتحديد القيمة الدنيا للمصاريف السنوية الحسابية حيث يؤدي تغيير ϑ_{ex} الى تغيير مصاريف الوقود ومصاريف المعدن الذاهب على سطوح التسخين فمع ازدياد درجة الحرارة ϑ_{ex} تنخفض مصاريف المعدن وتزداد مصاريف الوقود ، وبالتالي تتوافق درجة الحرارة المثلى ϑ^{opt}_{ex} مع القيمة الدنيا

للمصاريف السنوية C .



الشكل (٣-١) : تغير درجة حرارة الغازات ϑ الخارجة مع تزايد كمية سطوح التسخين H .

(الشكل ٣-٢) التي تعطى بالعلاقة التالية :

$$C = U_a + h K \qquad ; \quad (10-3)$$

تعطى المصاريف السنوية U_a بالعلاقة :

$$U_a = B_a \cdot P_t + a K \qquad ; \quad (11-3)$$

حيث :

K ـ المصاريف على معدن مولد البخار، بالليرة ؛

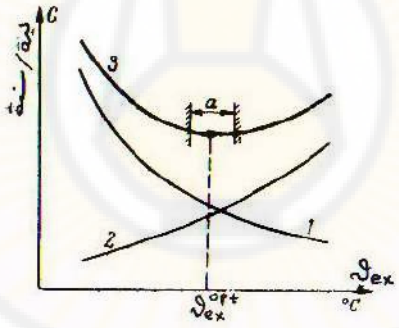
h ـ المعامل الاعتيادي لفعالية توظيف رأس المال ويساوي تقريبا 0,15 بالسنة ؛

B_a ـ مصروف الوقود السنوي ، Kg .

P_t – سعر الوقود (ليرة / كغ)

a – معامل الحسومات (على التلف ، والصيانة الجارية ومصاريف اخرى) بالسنة .

تلعب رطوبة الوقود دورا هاما في اختيار درجة حرارة خروج الغازات ϑ_{ex} فمع از دياد الرطوبة ترتفع القيمة المثلى لدرجة الحرارة ϑ_{ex}^{opt} كما يزداد حجم نواتج الاحتراق ، وتزداد ايضا السعة الحرارية الوسطية لغازات الاحتراق ، وتتراوح حرارة الغازات – الخارجة بالنسبة للتجهيزات الضخمة في المجال (160 ÷ 110 °C) حيث تأخذ الحرارة القيمة الدنيا بالنسبة لانواع الوقود قليلة الرطوبة ويجري رفعها الى القيمة العظمى في المجال المذكور بالنسبة لانواع الوقود عالية الرطوبة .



الشكل (٣–٢) : التحديد التقني الاقتصادي لدرجة حرارة الغازات المثلى ϑ_{ex}^{opt} . ١– مصاريف المعدن

٢– مصاريف الوقود ، ٣– المصاريف الحسابية السنوية

. a – منطقة القيم المفضلة لدرجة الحرارة ϑ_{ex}^{opt}

✸ يلعب تسرب الهواء ومعامل فائض الهواء α_{ex} دورا كبيرا في رفع مستوى الضياعات Q_2 ، فمع ازدياد α_{ex} يزداد حجم نواتج الاحتراق ، وينخفض النقل الحراري الى سطوح التسخين ، مما يؤدي في نهاية الامر الى ازدياد الضياعات .

✸ تعتبر قيمة الضياعات Q_2 اكبر من كافة الضياعات الاخرى ، وتساوي عادة $5 \div 10$ % ، ويمكن الحصول على القيمة الحسابية لها عندما تكون سطوح التسخين نظيفة وعمليا تتسخ سطوح التسخين بالرماد والخبث مما يؤدي الى ازدياد Q_2 .

٣-٣ ضياعات الحرارة لرداءة الاحتراق الكيميائية

يمكن لنواتج الاحتراق الغازية ان تحتوي على مواد الاحتراق الناقص للوقود المستخدم مثل CO ؛ H_2 ؛ CH_4 وغازات اخرى ، ولايمكن لهذه الغازات متابعة احتراقها خارج غرفة الموقد بسبب عدم كفاية درجة الحرارة ، وتدعى كمية الحرارة التي يمكن اطلاقها فيما لو تم الاحتراق بضياعات الحرارة لنقص الاحتراق الكيميائي وتعطى بالعلاقة :

$$Q_3 = V_{CO} \cdot Q_{CO} + V_{H_2} \cdot Q_{H_2} + V_{CH_4} \cdot Q_{CH_4} \; ; \; KJ/Kg \cdot (12-3)$$

حيث :

V_{CH_4} ؛ V_{H_2} ؛ V_{CO} - حجوم الغازات القابلة للاحتراق في نواتج الاحتراق ،

Q_{CH_4} ؛ Q_{H_2} ؛ Q_{CO} - حرارة احتراق الغازات على الترتيب

عند احراق الوقود الصلب او السائل يهمل وجود H_2 ، CH_4 وتحدد ضياعات الحرارة الكيميائية بنسبة الغاز CO في نواتج الاحتراق ، وبعد تعويض $Q_{CO} = 12700 \quad KJ/m^3$ ، وايجاد الحجم V_{CO} بدلالة النسبة المئوية في نواتج الاحتراق الغازية ، اي $V_{co} = V_{c.g} \cdot CO/100$ ، وبالاستفادة من العلاقة (3 - 12) نحصل على العلاقة التالية :

$$Q_3 = 237\left(C^p + 0{,}375\, S_v^p\right) \cdot \frac{CO}{RO_2 + CO} \quad ; \quad KJ/kg \cdot (13\text{-}3)$$

يسهل استخدام العلاقة الاخيرة في معالجة نتائج التجريب الحراري التقني لمولد البخار .

* عند تصميم مولد البخار تقدر ضياعات رداءة الاحتراق الكيميائية بالاعتماد على المعدلات المعروفة تجريبيا . وهي صغيرة نسبيا . وتتعلق بنوع الوقود المستخدم وباسلوب الاحراق .

* ويمكن للضياعات الكيميائية ان تزداد بشدة في حالة خرق نظام الاستثمار واهم العوامل المؤثرة على كمية Q_3 هي :

١- عدم كفاية هواء الاحتراق ٢- المزج السيء بين الوقود والهواء ، ٣- انخفاض فترة بقاء الغازات في الموقد .

* عادة تحدد فترة بقاء الغازات في الموقد بنحو ١٫٥ - ٢ ثانية وخلال هذا الوقت يتوجب على الغازات ان تحترق بشكل كامل .

* ويؤدي انخفاض حجم الموقد وعدم امتلائه باللهب وازدياد كمية الوقود الواردة اليه الى ازدياد نسبة ضياعات الحرارة لاسباب كيميائية .

٣-٤ ضياعات الحرارة لرداءة الاحتراق الميكانيكية

- يحدث هذا النوع من الضياعات لان قسما من الوقود الوارد الى الموقد لاسباب مختلفة لايشارك في كافة مراحل اجراء الاحتراق ، ويطرح من الموقد دون ان يقدم كمية الحرارة التي يمكن ان يطرحها فيما لو احترق ، ان هذه الكمية هي ضياعات الحرارة لرداءة الاحتراق الميكانيكية .
- ويتصف هذا النوع من الضياعات بوجود مواد غير محترقة او ناقصة الاحتراق ضمن الطور الصلب لنواتج الاحتراق (الرماد او الخبث)
- ويمكن الافتراض ان الجزء من الوقود الخارج مع الرماد والذى بقي فترة من الوقت ضمن جوف الموقد قد استطاع طرح المركبات الطيارة الداخلة فيه ، وظل يحتوي على الفحم والرماد فقط .
- في حالة الاحراق الفرني يتألف ضياع الحرارة الميكانيكي من الضياع مع الخبث ، والضياع المحمول مع الغازات ويحدث النوع الاول بسبب غرق جزيئات الوقود ضمن الخبث السائل ، الذي يطرح فيما بعد كخبث متصلب ، اما الجزء الثاني فيحدث بسبب تطاير جزيئات الوقود الدقيقة مع غازات الاحتراق ويترسب قسم منه على الجزء الحملي من المبادلات الحرارية ، بينما يحبس القسم المتبقي في جهاز تنقية غازات الاحتراق (اللاقط) .
- تتاثر ضياعات الحرارة مع الخبث بعوامل عديدة منها خواص الوقود نسبة الماء فيه ، درجة حرارة انصهار الرماد نسبة المواد الطيارة

طريقة الاحراق ، شروط الاستثمار ، دقة طحن الوقود .

* اما العوامل المؤثرة بالضياعات المحمولة فيمكن تعدادها كما يلي : دقة طحن الوقود ، نسبة المواد الطيارة درجة حرارة الموقد وفترة البقاء فيه ، ايروديناميك الموقد ومعامل فائض الهواء .

عند تصميم مولد البخار يجري وضع نسبة ضياعات الحرارة لرداءة الاحتراق الميكانيكية بناء على الارشادات التجريبية .

٣-٥ ضياعات الحرارة بسبب التبريد الخارجي

تمتلك عناصر مولد البخار الملامسة للوسط الخارجي (الجدران، الغطاء العازل ، الحلة ، النواقل ، الانابيب) درجة حرارة اعلى من درجة الهواء الخارجي مما يؤدي الى التبادل الحراري معه ومع المعدات المحيطة بمولد البخار ، ولهذا السبب يتوجب عزل مختلف السطوح الخارجية بحيث لاتزيد درجة حرارتها عن 55°C .

تتعلق الضياعات Q_5 بالابعاد الخارجية للمولد ، وبالضاغط الحراري الواقع بين سطوح التبريد والهواء المحيط وبمعاملات النقل الحراري بالحمل وبالاشعاع من سطوح التبريد الى الهواء والمعدات .

$$Q_5 = \frac{1}{B} \cdot \sum H_i \left\{ \alpha_c (t_m - t_o) + c\left[(t_m + 273)^4 - (t_\infty + 273)^4 \right] \right\} , \; KJ/Kg \; ; \; KJ/m^3 \quad ; \quad (14-3)$$

حيث :

$\sum H_i$ – سطح مولد البخار حسب الابعاد الخارجية ، m^2 ؛

t_m – درجة حرارة السطوح الخارجية ، $°C$ ؛

t_a – درجة حرارة الهواء ، $°C$ ؛

t_x – درجة حرارة الاشياء التي يجري معها التبادل الحراري، $°C$

α_c – معامل النقل الحراري بالحمل ، $KW/m^2.degree$ ؛

C – معامل الاشعاع المحول للجملة ، $KW/m^2.°K^4$.

لاتزيد الضياعات النسبية بسبب التبريد الخارجي عن $0,4 \div 0,5$ % من مصروف الوقود ، ولكنها تأخذ $q_{v5} = \frac{Q_5}{Q_p^p} .100\%$ قيماً مطلقة كبيرة بحيث تساوي تقريباً 5 KW لكل واحد ميغاوات من الاستطاعة الحاصلة .

يصعب تقدير Q_5 بالعلاقة الاخيرة ، لذا يمكن تبسيطها لتأخذ الشكل التالي :

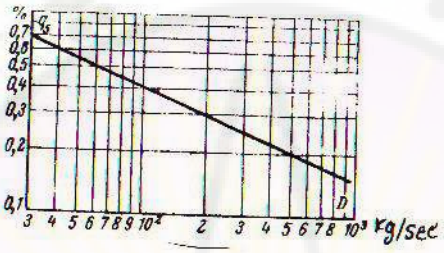
$$BQ_5 = q \sum H_i \quad ; \quad (9 \cdot 14-3)$$

حيث تمثل الكمية q ضياع الحرارة خلال متر مربع واحد من السطح، في الحسابات التقريبية

في الحسابات التقريبية تستخدم القيمة الوسطية للضياع الحراري النوعي خلال سطح العازل $q = 200 \div 300 w/m^2$.

تزيد قيمة ضياعات الحرارة المطلقة BQ_5 في مولدات البخار الضخمة عنها بالنسبة للمولدات الصغيرة ، بينما يكون الامر معكوسا عند مقارنة الضياعات النسبية ، والامر مفهوم ذلك لان السطوح

الخارجية تزيد بشكل يتناسب مع مربع الابعاد الخطية ، بينما يزداد الحجم بشكل متناسب مع مكعب الابعاد الخطية ، وهذا مايفسر سبب انخفاض الضياعات النسبية مع ازدياد الاستطاعة (الشكل ٣-٣) .



الشكل (٣-٣) : تابع ضياعات الحرارة النسبية بسبب التبريد q_5 بالنسبة للانتاجية .

٣-٦ ضياعات الحرارة الفيزيائية مع الخبث

يتشكل هذا النوع من الضياع بسبب الحرارة المرتفعة للخبث او الرماد المطروح من الموقد ، وهذا يعني تضمين الخبث على الحرارة الفيزيائية التي يمكن حسابها على الشكل التالي :

$$Q_6 = a_r \frac{A^p}{100} (Ct)_r + q_a$$

حيث :

q_a ـ الطاقة الحرارية لانصهار الخبث ،

$$q_a = 240 \div 280 \quad KJ/Kg$$

a_r ـ حصة رماد الوقود الذاهب مع الخبث؛

C_r – السعة الحرارية للخبث عند درجة حرارة طرحه ،

. KJ/Kg. degrée

يتوجب حساب ضياع حرارة الخبث الفيزيائية ، عندما يطرح بشكله السائل ، او عندما يكون الوقود كثير الرماد .

٣-٧ مردود مولد البخار ومنشأة توليد البخار

بشكل عام تحدد كمية الحرارة المفيدة بالعلاقة التالية :

$$Q_1 = \frac{1}{B}\cdot\left[D(i_{s.c} - i_{ne}) + D_{rt}(i_{rt}^{ex} - i_{rt}^{en}) + D_v(i' - i_{ne})\right] \cdot KJ/Kg \; ; \; KJ/m^3 \cdot (16-3)$$

حيث :

D – انتاجية مولد البخار ، Kg/Sec ؛

D_{rt} – تصريف البخار خلال مكرر التحميص ، Kg/Sec ،

D_v – تصريف المياه زائدة الملوحة ؛ Kg/Sec ؛

i_{ne} ، i' ، $i_{s.c}$: انتالبي البخار المحمص ومياه الحلة ، ومياه التغذية عند درجات الحرارة والضغوط الموافقة ؛

i_{rt}^{ex} ، i_{rt}^{en} : انتالبي البخار عند دخوله وخروجه من مكرر التحميص عند الحرارة والضغط الموافقين ، KJ / Kg ؛

B – مصروف الوقود ، Kg/Sec .

من المعادلات (3 - 2) و (3 - 16) يكون لدينا :

$$D(i_{s.c}-i_{ne})+D_{rt}(i_{rt}^{ex}-i_{rt}^{en})+D_v(i'-i_{ne})=$$
$$=BQ_p^p\left(1-\frac{\sum_{i=2}^{i=6}Q_i}{Q_p^p}\right)=$$
$$=BQ_p^p\cdot\eta_{s.g} \qquad (17-3)$$

حيث :

η_{sg} ـ مردود مولد البخار القائم

مماسبق نكتب :

$$\eta_{s.g}=\frac{D(i_{s.c}-i_{ne})+D_{rt}(i_{rt}^{ex}-i_{rt}^{en})+D_v(i'-i_{ne})}{BQ_p^p} \qquad (18-3)$$

لمولدات البخار ذات الجريان المباشر حيث $D_v=0$ نكتب مايلي

$$\eta_{s.g}=\frac{D(i_{s.c}-i_{ne})+D_{rt}(i_{rt}^{ex}-i_{rt}^{en})}{BQ_p^p} \qquad (19-3)$$

يمكن تحديد المردود القائم بطريقة الميزان المعاكس :

$$q_1=100-\sum_{i=2}^{i=6}q_i=\eta_{s.g}\ ,\% \qquad (20-3)$$

حيث يتوجب في هذه الحالة معرفة كافة الضياعات النسبية $\sum_{i=2}^{i=6}q_i$ اولا وبعد ذلك يمكن تحديد $\eta_{s.g}$.

الفصـــــــــل الرابـــــع

اجهزة الايـــــــــــــــقاد (المواقد)

تمهيد : تقوم اجهزة الايقاد بوظيفة تنظيم عمليات الاحتراق في مولدات البخار ، وفيها يتم تحويل الطاقة الكيميائية للوقود الى طاقة حرارية تنتقل بدورها الى جسم التشغيل ، وتأخذ المواقد اشكالا مختلفة تتعلق بنوع الوقود المستخدم وخواصه الفيزيائية ، وعلى ذلك توجد تصنيفات عديدة لاجهزة الايقاد ويميز تصنيف المواقد حسب اسلوب الاحتراق بين انواع المواقد الطبقية والغرفيـــــــة والدوامية .

يحرق الوقود الصلب في الانواع الثلاثة ، بينما يحرق الوقود السائل والغازي في المواقد الغرفية .

* يتطلب من اجهزة الايقاد تحقيق المواصفات التالية :

١- تأمين الحد الممكن من الاحتراق الكامل مع تخفيض معامل فائض الهواء الى الحد الادنى .

٢- تحقيق الانتقال الحراري الجيد لسطوح التسخين .

٣- الوثوقية في العمل والبساطة في الاستثمار .

٤- وجود نظام للتحكم يحقق التجاوب مع تغيرات الحمولة

٥- التقليل ما امكن من الترسبات الخبثية على جدران الموقد وعلى سطح التسخين .

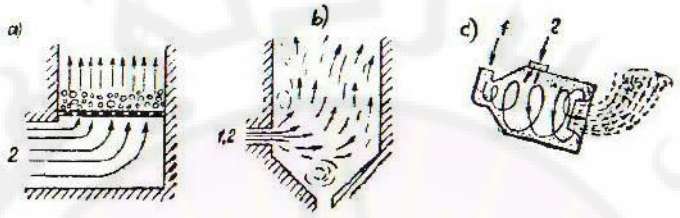
٤-١ أجهزة ايقاد الوقود الصلب :

طرق احراق الوقود الصلب :

يمكننا التمييز بين ثلاثة طرق لاحراق الوقود الصلب وهي : الطريقة الطبقية والمشعلية والدوامية (الشكل ٤ - ١) ، في حالة الايقاد الطبقي يمر الهواء الى طبقة الوقود من اسفل الغربال في طريقة الاحراق المشعلية يهشم الوقود الصلب اوليا الى قطع صغيرة ، ومن ثم يمر على مطاحن خاصة يحول فيها الى هباب فحمي يمزج مع الهواء ، ثم يضخ المزيج الناتج الى الموقد عبر الحراق ولا يمر وقت طويل على بقاء المزيج في جوف الموقد (1,5 ÷ 2. sec) حتى يحترق ، ويطحن الوقود الى درجات مختلفة من النعومة تتعلق في الاساس بنوع الوقود ، ومن المعروف انه مع هبوط ابعاد جزيئة الوقود يزداد السطح النوعي لتماس الوقود مع المادة المؤكسدة ، وهذا ما يؤدي الى زيادة درجة الحرارة في الشعلة ، وهو يعني في نهاية الامر اشتداد الالتهاب .

تعتمد طريقة الايقاد الدوامية على استعمال الجريان اللولبي للمزيج الوقودي الهوائي حيث تدور جزيئات الوقود حسب مدارات معينة خلال الزمن اللازم لاحتراقها التام ، وبتأثير القوى النابذة تتشكل طبقة كثيفة من جزيئات الوقود التي تسير حسب مسارات لولبية مجاورة لجدران الحراق وتمتزج بشدة مع الهواء

الثانوي الذي يصح حسب الاتجاه المماسي لقطر الاسطوانة .



الشكل (٤-١) : طرق احراق الوقود الصلب

a - الطبقية ، b - المشعلية ، c - الدوامية

١- الوقود ، ٢- هواء الاحتراق

★★★ آ - المواقد الطبقية ★★★

تشغل عمليتا امداد الوقود الصلب وطرح الرماد حيزا هاما من نظام الايقاد في المواقد الطبقية ، وعلى ذلك تصنف تبعا لمستوى المكننة فيها الى : المواقد اليدوية ، والنصف ممكنة ، والممكننة ويقصد في التعبير اسلوب المكننة مدى تدخل الالة في عمليتي امداد الوقود وطرح الخبث الصلب او السائل .

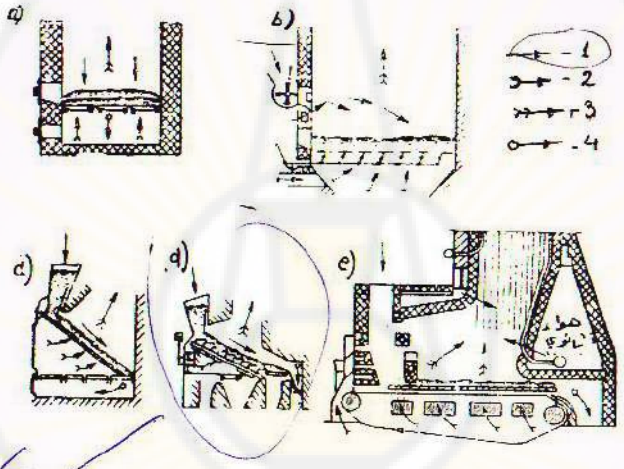
في المواقد الطبقية النصف ممكننة يقوم الانسان والالة معا بالعمليات المذكورة ، وفي حالة المواقد الممكننة تقوم الالة بكافة عمليات امداد الوقود وطرح الرماد .

تقسم المواقد الطبقية من حيث نظام احراق الوقود الى الانواع التالية :

(١) المواقد الطبقية ذات الغربال الثابت وطبقة الوقود الثابتة ايضا (الشكل ٤ – ٢ ، a ، b) .

(٢) المواقد ذات الغربال الثابت مع طبقة الوقود المتحركة (الشكل ٤ – ٢ ، c ، d) .

(٣) مواقد الغربال المتحرك مع طبقة الوقود المتحركة (الشكل ٤ – ٢ ، e) .



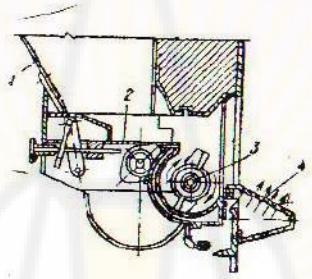
الشكل (٤–٢): مخطط المواقـــد الطبقية

a – الموقد في طبقة الوقود الثابتة ، b – المجهز بقاذف الوقود مع الغربال المتحرك ، c – ذي الشبكة المائلة ، d – ذي الشبكة المائلة المترددة ، e – ذي الشبكة المتحركة ،

١– الوقود ، ٢– الهواء ، ٣– نواتج الاحتراق الغازية،

في الموقد (الشكل ٤ – ٢ ، a) يتم امداد الوقود وطرح الرماد بشكل يدوي ، وبسبب المجهود الكبير المبذول على تلك العمليات تستعمل المواقد اليدوية على نطاق ضيق في مراجل الانتاجية المنخفضة (حتى 0.5 kg / sec) .

على الشكل ٤ – ٢ ، b نرى مخططا تمثيليا للموقد الطبقي النصف ممكنن والمجهز بقاذف الوقود الميكانيكي الهوائي الشكل (٤ – ٣) .



الشكل (٤–٣) : قاذف الوقود الميكانيكي الهوائي.

١– القمع ، ٢– المغذي ، ٣– الدوار القاذف ، ٤– الشبكة البوقية.

في الموقد (الشكل (٤ – ٢ ، b) يتم التخلص من الرماد بتدوير الغربال حول محوره يدويا بالاستعانة بالعتلة المبينة على الشكل .

في الموقد (الشكل ٤ – ٢، c) يتم امداد الوقود بتأثير وزن الوقود ، ويستعمل الموقد ذو الغربال المائل بزاوية 45° لاحراق النفايات الخشبية .

في الموقد (الشكل ٤–٢ ، d) تتم عملية الغربلة لخليط الفحم مع

مع الرماد الناتج عن الاحتراق عن طريق الحركة الترددية المستمرة للغربال المائل ، وتستعمل المواقد الاخيرة في حالة الوقود كثير الرماد .

على الشكل ٤ – ٢ ، e نرى نموذجا للموقد الطبقي الذي يستعمل وقود الطورب المقولب ، ويحتوي الموقد على غرفة مخصصة لتجفيف الوقود ، حيث يرد الهواء الساخن اليها عبر فتحات خاصة متوضعة على الجانب الايسر للموقد .

يتم امداد الوقود الى الغربال ، الذي يتحرك ببطء ، والمتألف من سلسلة على هيئة بساط ناقل يدور ببطء بمساعدة الطنبوريـــــن المبينين على الشكل ، وتصل السرعة الخطية لحركة السلسلة السطحية الى 30 م / سا . تبعا للمراحل التي يمر فيها الوقود على السلسلة يمكننا التمييز بين ثلاثة مناطق وهي اولا : منطقة تجفيف الوقود وتحرر الغازات ثانيا : منطقة احراق فحم الكوك الناتـــج ثالثا : منطقة اكمال عملية الاحتراق . ويرد الهواء الساخن الـــى اسفل السلسلة السطحية عبر نوافذ خاصة ، ويمكن تغيير كميـــات الهواء الساخن الواردة على مختلف مناطق السلسلة السطحية ، وذلك تبعا لنوع الوقود ولوظيفة كل منطقة من المناطق الثلاث . كما يرد الهواء الثانوي الساخن عبر فتحات خاصة ، وذلك لتحسين شروط الاحتراق ولتخفيض نسبة الضياعات الناتجة عن ردائتي الاحتراق الميكانيكية والكيميائية .

ب – مواقد احراق الوقود الطب الغرفية تستخدم المواقد المذكورة في مولدات البخار ذات الانتاجيـــة

المتوسطة (10 ÷ 40 kg/sec) والعالية اي اكثر من (40 kg/sec)

ويمكننا حصر مميزاتها فيما يلي :

١- يمكنها استعمال كافة انواع الوقود الصلبة ومن ضمنها الانواع الرديئة ؛

٢- تمزج جيدا الهواء مع الوقود ، مما يجعل ممكنا تخفيض معامل فائض الهواء ؛

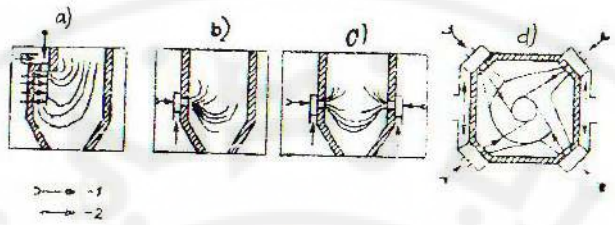
٣- يمكنها بسهولة زيادة الاستطاعة

٤- وتمتلك نظام تحكم بسيط نسبيا مما يسهل عملية الاتمتة في مولد البخار .

تصنف مواقد الغبار الفحمي من حيث وضعية الحراقات الى مواقد الحراقات السقفية والجانبية والمواقد ذات الحراقات المتقابلة والقطرية المماسية (الشكل ٤ - ٤ ، a ، b ، c ، d)

على الترتيب يستخدم تصميم المواقد المبينة على الشكل ٤ - ٤ a ، b في مولدات البخار ذات الانتاجية حتى 35 kg/sec ويستحسن استخدام الانواع (الشكل ٤ - ٤ ، c ، d) في التجهيزات ذات الاستطاعة الاعلى ، وذلك نظرا لازدياد حدة الاحتراق في جوار الموقد ، ويشكل التصميم الاخير دوامة شديدة في وسط الموقد ، مما يؤدي الى ارتفاع جودة المولد .

في المواقد الغرفية تتوضع الحراقات شاقوليا على عدة طبقات او على طبقة واحدة .

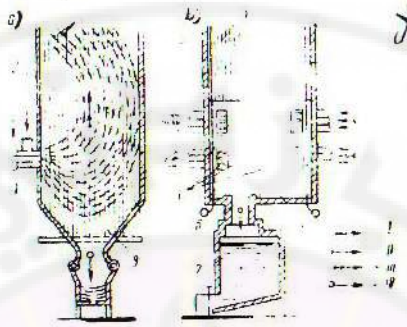


الشكل (٤-٤): تشكيلات الحراقات في غرفة الموقد

a - توضع سقفي ، b - جبهي ، c - متقابل d - قطري مماسي ، ١- هواء اولي مع غبار الفحم ، ٢- الهواء الثانوي .

★ تقسم المواقد التي تستعمل الوقود الصلب من حيث اسلوب طرحها للرماد الى مواقد الخبث السائل والجامد ، على الشكل ٤ - ٥ ، b ، d نرى مخططين اساسيين لعمل كلا نوعي المواقد المذكورة . في المواقد التي يطرح فيها الخبث بشكله الجامد تستعمل انواع الوقود التي تطرح كمية كبيرة من الرماد ، مثال على ذلك الفحم الحجري ، في المواقد التي يطرح فيها الرماد بشكله السائل يستحسن استخدام انواع الوقود ذات النشاط الكيميائي المنخفض .

★ تغطى جدران الموقد الغرفي في كافة جبهاتها بما يسمى انابيب المعاكس ، التي تلعب دور سطوح البخر ، وتتلقى الاخيرة الطاقة الحرارية عن طريق الاشعاع ، مما يجعلها اكثر اجزاء المرجل اجهادا ، كما تنتقل الطاقة الحرارية ايضا بالحمل ، لكن نسبة الانتقال الحراري الاخير تظل قليلة بالمقارنة مع النوع الاول ،وذلك نظرا لانخفاض سرعة الغازات داخل الموقد .



الشكل (٤–٥): المواقد المشعلية لاحراق غبار الفحم
a – مع طرح الخبث الصلب ، b – مع طرح الخبث
السائل ، ١– الحراق ، ٢– انابيب المعاكس الامامي
٣– انابيب المعاكس الجانبي ، ٤– انابيب المعاكس
الخلفي ، ٥– حوض الخبث السائل ، ٦– المصب ، ٧–
حوض استقبال الخبث ، ٨– القمع البارد ،
I – الوقود ، II – الهواء ، III – نواتج الاحتراق
الغازية ، IV – النواتج الصلبة والمنصهرة .

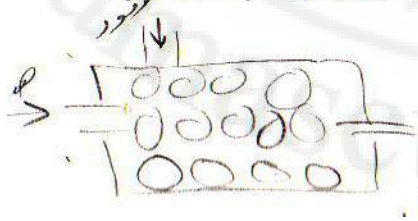
مما سبق نستنتج ان واحدة سطح التسخين لانابيب المعاكس تنتج كمية من البخار اكثر بمرات من مثيلتها في حالة النقل بالحمل ، وهذا يعني ان المراجل ذات المواقد المغطاة داخليا بالعواكس تحقق انتاجية للبخار اعلى من اجل سطوح التبادل الحراري اقل نسبيا وذلك بالمقارنة مع الاساليب الاخرى للتسخين ، وبالنتيجة فان حجم المواقد نفسها يكون اقل نسبيا . والجدير بالذكر ان رفع درجة الحرارة داخل الموقد يؤدي الى نفس التأثير الذى تظهره انابيب

المعاكس .

من المفهوم ان درجة حرارة غازات الاحتراق عند المقطع الخارجي للموقد اقل من نظيرتها في غرفة الموقد ، ومنه نستنتج انه عندما تنخفض درجة الحرارة في غرفة الموقد عن درجة تجمد الرماد السائل يترسب الاخير على انابيب المعاكس مما يسيء لفعالية عمل الموقد في المستقبل / وجدير بالذكر هنا ان احد عيوب مواقد الفحم الغباري هي ان النسبة الكبرى من الرماد تذهب مع نواتج الاحتراق الغازية (85 %) ، ان ذلك يؤدي الى التلف السريع للانابيب والمبادلات الحرارية المتواجدة على مسار الغازات .

* ان كل ذلك دعا في السنوات الاخيرة الى الانتشار الواسع للمواقد التي يطرح فيها الرماد بشكله السائل (الشكل ٤ – ٥ ، b) ،
* وتمتاز امثال هذه المواقد بان القسم الاسفل من انابيب المعاكس مغطى بمادة مقاومة للنيران ، مما يجعل ممكنا رفع درجة الحرارة في القسم السفلي من غرفة الاحتراق الى مستوى اعلى من درجة انصهار الخبث (اكثر بمائة درجة مئوية) ، ان ذلك يعطي الخبث قابلية جيدة للسيلان على جوانب غرفة الاحتراق الى حوض استقبال الخبث (على الشكل ٤ – ٥ الوضعية ٧).

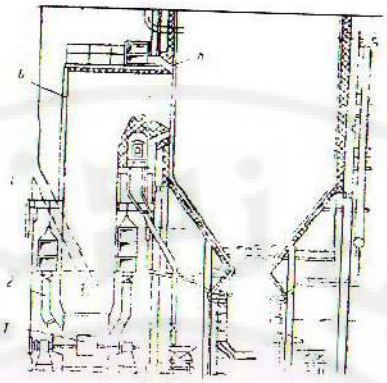
يمر الوقود الصلب على عدة مراحل قبل ادخاله الى الموقد وهي: التكسير الى قطع صغيرة ابعادها بين 10 ÷ 12 mm ، ومن ثم التجفيف والتنعيم في مطاحن خاصة حتى الحالة الغبارية (اقل من 0,2 mm) .



ويمكن تقييم نوعية الوقود الغباري بمجموعة جزيئاته وتجانسه الحجمي وتقدر دقة الغبار الفحمي بالكمية المتبقية بعد غربلة المسحوق في مصاف تتراوح ابعاد ثقوبها بين 1.0 mm ÷ 0,06 .

وبصورة عامة مع ازدياد دقة المسحوق تزداد قابليته للامتزاج مع الهواء ، وبالتالي تنخفض نسبة الضياع الميكانيكي . ومن ناحية اخرى مع ازدياد دقة الغبار تزداد مصاريف الطحن ، ومنه نستنتج ان هناك درجة مثلى لدقة المسحوق ، ويتم اختيار المطحنة عادة على اساس الدرجة المثلى لدقة غبار الفحم وقساوة الفحم المستخدم .

★ اما مطحنة الوقود الصلب فهي عبارة عن اسطوانة فولاذية ، تدور حول محورها بسرعة تتراوح بين ١٥–٢٥ دورة في الدقيقة ، وطولها 2,5 ÷ 8 m وقطرها 2 ÷ 4 m وتسلح الاسطوانة من الداخل بالواح فولاذية سميكة ، ويعبأ ثلث حجمها بكرات فولاذية ، وعند دوران الاسطوانة ترتفع الكرات الى حد معين ، ثم تسقط محطمة قطع الفحم . ويمكن للمطحنة ان تشكل جزءا متمما لمولد البخار ،حيث يتم فيها تحضير الغبار الفحمي الذي ينتقل بعد ذلك مباشرة الى الموقد لاحتراقه (الشكل ٤ – ٦) .



الشكل (٤-٦): تشكيل الموقد مع المطحنة

١- المطحنة ، ٢- ورود الهواء للمطحنة ، ٣- مسيل الوقود ، ٤- منجم الفحل ، ٥- فتحة ، ٦- ابواق الهواء الثانوى .

★★★★★ احراق الوقود الصلب في الشعلة

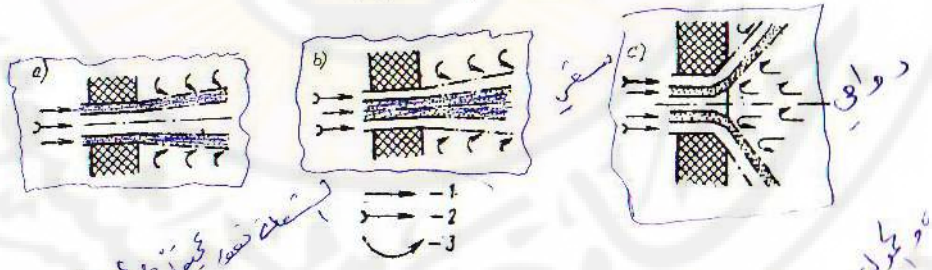
يحتل الحراق مركزا هاما في عملية تصميم وبناء المواقد الغبارية ، ولذا فان الشروط الفنية المطلوبة منه عديدة واهمها: تأمين المزج الكافي للوقود مع الهواء ، ضمان اشتعال المزيج الوقودى الهوائي في كل لحظة ، املاء فراغ الموقد بالشعلة ، سهولة التحكم الالي في نظام الاحتراق وذلك ضمن المجال المحدد للانتاجية .

في الوقت الحاضر يستخدم الحراق الدوامي المشعلي لاحراق الوقود الصلب بشكل واسع هناك ايضا نوع آخر هو الحراق الشقي ، الذي يصل المزيج الوقودي اليه عبر شقوق ضيقة ، ومن ثم يقذف منهـا

في عمق الموقد ، ولذا يستعمل النوع الاخير في التشكيلات القطرية والمتقابلة لحراقات الموقد الغرفي .

يركب الحراق الدوامي على جوانب الموقد ، ويتميز عن الحراق الشقي بأن شعلته لا تغور بعيدا في العمق ، على الشكل ٤ – ٧ تظهر مختلف اساليب امداد المزيج الوقودي في الحراقات المشعلية من المفهوم ان تصميم الحراق a اكثر عقلانية من التصميم b ذلك لان الغبار الفحمي في النوع الاول يمر عبر الانبوبة الخارجية للحراق ومن ثم يحتك مباشرة مع الغازات الساخنة مما يسرع في عملية الاحتراق .

على الشكل ٤ – ٧ ، c نرى مخططا لامداد المزيج الوقودي والهواء الثانوي عبر الحراق الدوامي ، حيث يخرج المزيج الوقودي من خلال الانبوبة الحلقية الداخلية للحراق ، اما الهواء الثانوي المفتول فيصل عبر الانبوبة الحلقية الخارجية ، هذا وبالامكان حرف المزيج الوقودي بواسطة جهاز التوجيه ، وذلك لدفعه نحو تيار الهواء الثانوي بهدف التحكم في نظام الاحتراق .



الشكل (٤–٧) : مخططات حراقات الوقود الفحمي الغباري
a ، b – حراقات اندفاعية . c – حراق دوامي ،
1– هواء ثانوي ، 2– مزيج وقودي ، 3– دوران الغازات

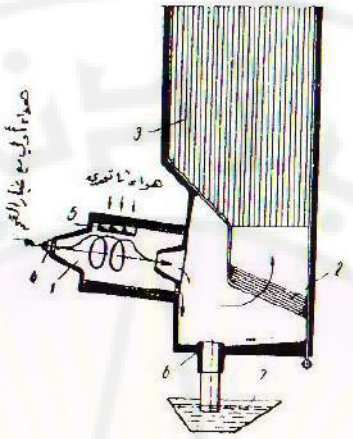
★★★ ج – مواقد احراق الوقود الصلب الدوامية ★★★

يتمتع اسلوب الايقاد الدوامي بمميزات خاصة تتلخص في امكانية المناورة المرنة الواسعة بحمولة مولد البخار ، ان هذا الامر يحمل اهمية كبيرة في حالة ائتلاف مولد البخار مع التوربين وتشكيلهما مجموعة واحدة .

تتألف المواقد الدوامية من حجرات دوامية (افقية ، مائلة او شاقولية) ومن غرف تبريد ملحقة يجري فيها متابعة نقل الطاقة الحرارية الى غازات الاحتراق .

في المواقد ذات الدوامة الافقية يدخل التيار الهوائي الثانوي بشكل مماسي بالنسبة لنصف قطر الاسطوانة بسرعة كبيرة (100÷150m/sec) بينما يرد المزيج الوقودي حسب اتجاه محور الاسطوانة ،فتتشكل دوامة بفعل التيار المماسي للهواء الثانوي (الشكل ٤–٨) ، وتتحرك جزيئات الوقود تحت تأثير محصلة القوى الشابذة والاندفاعية ، وتحترق الجزيئات الدقيقة منها بسرعة كبيرة وتتحرك بجوار محور الاسطوانه ،اما الجزيئات الثقيلة الكبيرة الحجم فلا تستطيع الخروج من الدوامة بسبب الفتحة المركزية الضيقة لخروج الغازات ، وتظل ملامسة لسطح الاسطوانة الداخلي الى ان يتم احراقها بشكل كامل .

يتغطى السطح الداخلي للاسطوانة بمادة مقاومة للنيران ، وبسبب الطرح الحراري العالي ترتفع درجة الحرارة الى مستوى عال ، مما يسمح بانصهار الخبث وخروجه عبر فتحة خاصة .



الشكل (٤–٨) : مخطط الموقد الدوامي.

١– غرفة الاحتراق ، ٢– حزمة اصطياد الخبث ، ٣– حجرة التبريد ، ٤– الحراق ، ٥– ابواق الهواء الثانوي ، ٦– مصب الخبث ، ٧– حوض تبريد وطرح الخبث .

٤–٢ اجهزة ايقاد الوقود السائل والغازي

آ– الحراقات المازوتية : يحرق الوقود في طوره البخاري ، ولهذا السبب يعمد الى تصغير قطرات المازوت المتساقطة في غرفة الموقد الساخن ، مما يزيد من سرعة تبخرها فيه ، ولترذيذ المازوت تستخدم انواع الرذاذات البخارية والميكانيكية والمركبة .

في الرذاذات البخارية تستخدم الطاقة الحركية لنافورة البخار الخارج من الرذاذ وفي الانواع الميكانيكية تستخدم الطاقة الحركية لنافورة المازوت ، التي تتشكل بمساعدة المضخة الوقودية ، ويترذذ

المازوت نتيجة لتمريره من خلال ثقب صغير بسرعة كبيرة .

عدا عن الانواع البخارية والميكانيكية للرذاذات هناك انواع مركبة تستخدم الاساليب الميكانيكية والبخارية بآن واحد .

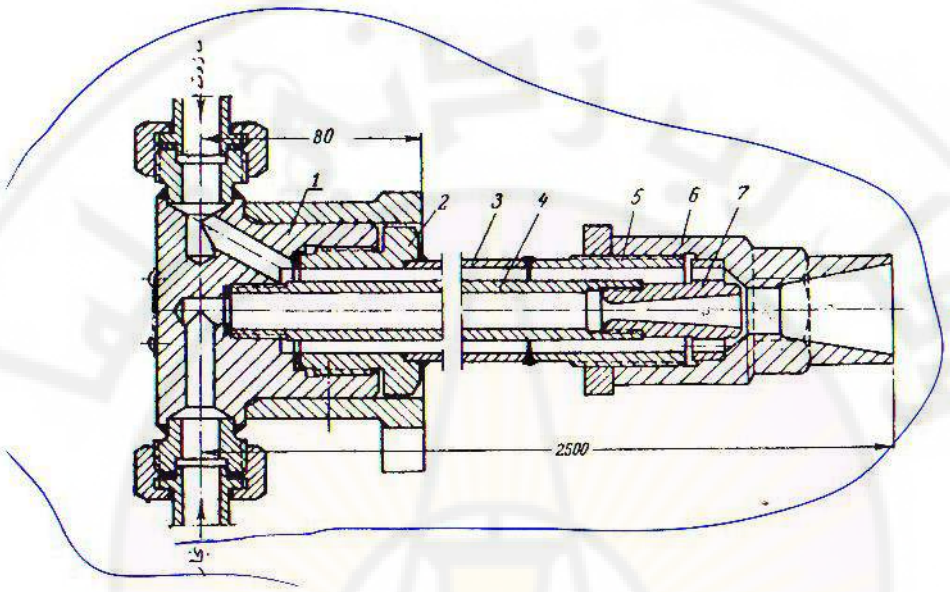
الرذاذات البخارية : ويتم فيها الحصول على فعالية عالية للترذيذ نتيجة لسرعة انفلات البخار الكبيرة (حتى 1000 m/sec) الذي يجر وراءه المازوت .

على الشكل ٤ – ٩ تبين احدى التصميمات الشائعة للرذاذات البخارية ،يمرر البخار تحت ضغط 5 ÷ 25 bar من خلال الاسطوانة الداخلية ، التي تنتهي بالنفاثة المتوسعة ، ويرد المازوت حسب القنال الحلقي ، ويسحب الجريان البخاري المازوت وراءه من القنال الحلقي ،ثم يمرر المزيج البخاري المازوتي عبر الناشر ليصل الى الموقد .

تتميز الرذاذات البخارية ببساطتها التصميمية وبترذيذها الجيد للمازوت ضمن مجال واسع لتغير الانتاجية (١٠٠ ٪ ÷ ٢٠) ، ويستخدم فيها البخار المشبع او المحمص قليلا ، اما عيوب الرذاذات البخارية فمتعددة منها : (1) الاستهلاك الكبير للبخار(٣ ÷ ٥ ٪ من انتاجية مولد البخار) ، (2) الانتاجية المنخفضة (3) الازدياد الكبير لحجم نواتج الاحتراق (4) الضجة الكبيرة المرافقة (5) انخفاض درجة حرارة الموقد بسبب الفعل التبريدي للبخار .

تستخدم الرذاذات البخارية في المنشآت ذات الاستطاعة الصغيرة ، او في الحالات التي يتطلب تحسين ترذيذ المازوت المار على الرذاذات الميكانيكية وذلك عند عمل مولدات البخار الضخمة على

الحمولة الجزئية الصغيرة .



الشكل (٤-٩): رذاذ مازوتي عامل على البخار.

١- الهيكل ، ٢- سدادة مسننة ، ٣- الانبوبة الخارجية

٤- الممر المركزي ، ٥- سن خارجي لتثبيت الناشر

٦- الناشر ، ٧- البوق .

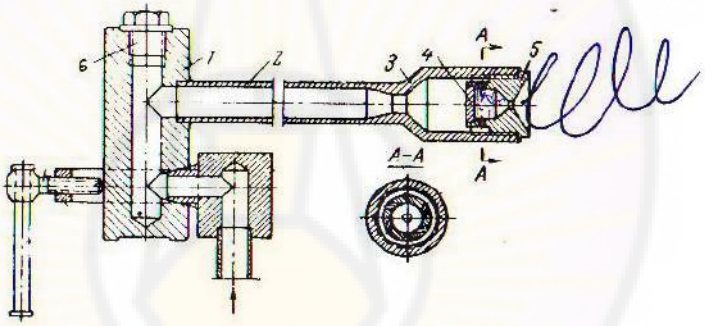
الرذاذات الميكانيكية

على الشكل ٤ - ١٠ يمثل نموذج لرذاذ ميكانيكي ، يرد المازوت المضغوط حتى 20 ÷ 35 bar الى الرأس المرذذ ، الذي يحتوي على عدة ثقوب مماسية مدورة للجريان ، يخرج المازوت من الثقوب

الى الحجرة المركزية للرأس المرذذ ومنها يصل الى الموقد عبر الثقب الضيق المركزي بسرعة هائلة مشكلا شريحة مخروطية .

تهتز الاخيرة تحت تأثير الوسط الغازي وتتحول الى رذاذ دقيق الابعاد .

(1) تعتبر الرذاذات الميكانيكية اكثر اقتصادية من مثيلتها البخارية ولايزيد استهلاكها الطاقي عن ٥,٤ ٪ من انتاجية المولد . (2) وتصل انتاجية الرذاذات الميكانيكية الضخمة حتى 3 Kg / sec (4) واكثر من ذلك . (3) بينما تتراوح انتاجية الانواع البخارية بين 0,5 الى 0,14 kg / Sec .



الشكل (٤-١٠) : الرذاذ الميكانيكي المازوتي.

١- الهيكل ، ٢- الحامل ، ٣- الرأس ، ٤- الرنديلة

٥- الغالة الدوامية ، ٦- سدادة .

(11) تتعلق دقة الترذيذ اي القطر المتوسط للقطرات d^m بضغط المازوت P قبل الرذاذ ،

وتمثل هذه العلاقة كما يلي :

$$\frac{d_2^m}{d_1^m} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{0,135} \quad , (1-4)$$

تؤثر الابعاد الهندسية للرذاذ على دقة الترذيذ وفي هذا الصدد يتميز مقطع الثقب المركزي بتأثيره البالغ حيث يؤدي تصغير المقطع الى زيادة دقة الترذيذ وفي نفس الوقت يؤدي ذلك الى خفض الانتاجية

تنظيم انتاجية الرذاذات

يجري التحكم بالانتاجية عن طريق تغيير ضغط المازوت امام الرذاذات العاملة او بايقاف قسم منها عن العمل .

- يستخدم اسلوب الايقاف الجزئي للرذاذات دون تخفيض ضغط المازوت بشكل واسع ، ولكن يستحسن استخدامه في حالة وجود عدد كبير من الرذاذات ذات الانتاجية الصغيرة والتي يتحكم بها يدويا .
- تجهز المنشآت الضخمة بعدد قليل من الرذاذات ذات الانتاجية العالية ، وفي هذه الحالة يؤدي فصل عدد من الرذاذات الى تشويه الحقل الحراري في الموقد ورداءة في توزع الجريان فيه . ولهذا السبب في مولدات البخار الضخمة يستخدم اسلوب تغيير الضغط قبل الرذاذات . الا ان هذا الاسلوب لا يمكن من التحكم الواسع بالتصريف وبالفعل نكتب العلاقة بين تصريف المازوت والضغط قبل الرذاذ :

$$\frac{B_2}{B_1} \approx \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} \qquad , \quad (2-4)$$

حيث :

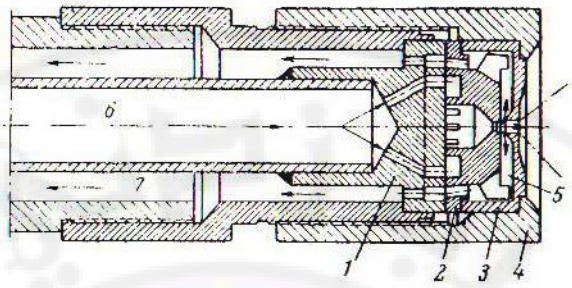
P_1 ، B_1 ـ ضغط المازوت وتصريفه في الحالة الاسمية ،

P_2 ، B_2 ـ نفس الكميات عند نظام عمل جزئي .

العلاقة (4 ـ 2) تظهر ان تخفيض الضغط اربع مرات يغير تصريف المازوت مرتين فقط ، ان هذا الامر يعني تضييق حدود التحكم بالتصريف (70 ÷ 100 %) .

★★★ لتوسيع حدود التحكم تستخدم رذاذات اخرى ذات تصميمات خاصة منها الميكانيكية مع التدوير المازوتي ، والشنائية الاطر ، والبخارية ـ الميكانيكية ، وذات الرذاذ الدائر .

الشكل ٤ـ ١١ يبين مقطع الرذاذ الميكانيكي ذي الدوران المازوتي ، يرد المازوت من خلال الاسطوانة المركزية ، ثم يمر على الجلبة الموزعة ونظيرتها المرذذة ، واخيرا ينفلت من الثقب النهائي ليدخل الى الموقد . ويجري التحكم بانتاجية الرذاذ عن طريق اعادة جزء من المازوت من حجرة التدوير عبر الفراغ الحلقي الى انبوب الاستقبال في المضخة الوقودية ، ويتغير الضغط في المجرى السيلاني الاخير حيث تتغير انتاجية الرذاذ .



الشكل (٤-١١) : الرذاذ الميكانيكي المعد لتدوير الوقود السائل.

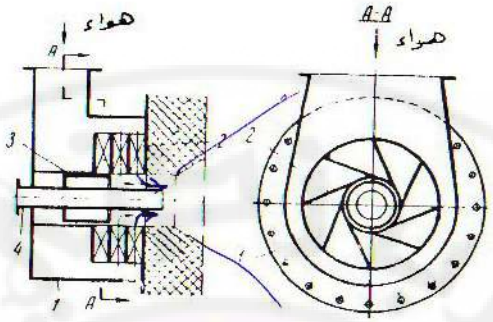
١- رنديلة التوزيع ، ٢- فالة الترذيذ ، ٣- الغطاء ٤- عزقة تثبيت ، ٥- الحجرة الدوامية ، ٦- الانبوب المركزي ، ٧- المجرى الحلقي لاعادة المازوت .

★ الموجهات الهوائية ★

لزيادة فعالية احراق المازوت المرذذ يتوجب مزجه بشكل جيد مع الهواء،ويتم ذلك بمساعدة الموجهات الهوائية التي تستقبل الهواء المدفوع من مروحة التهوية ، وتقوم الموجهات الهوائية بتدويره ودفعه بسرعة 25 ÷ 30 m/sec عبر الفتحات الضيقة .

وفي حالة الانتاجية الكبيرة تستخدم انواع الموجهات المبينة على الشكل ٤-١٢.

يحتوي الموجه الهوائي على قنال خاص بالرذاذ المازوتي 4 ويقوم الجهاز النصلي 2 بتدوير الهواء ودفعه نحو الممر الحلقي ليندفع بعد ذلك الى جوف الموقد .



الشكل (٤-١٢) : الموجه الهوائي النصلي .

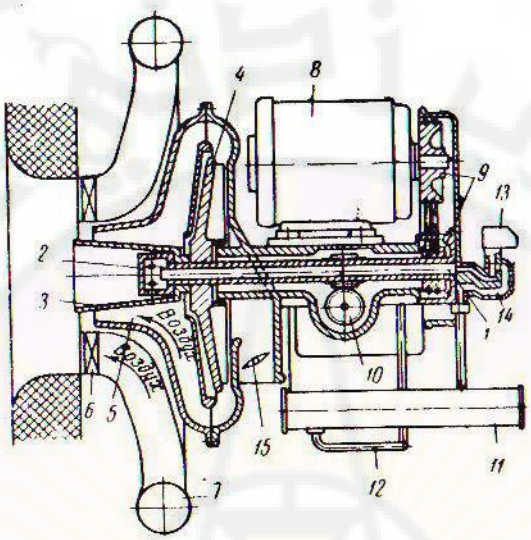
١- الغلاف ، ٢- الجهاز النصلي الموجه ، ٣- الطبلة

٤- قنال الرذاذ المازوتي .

★ الحراق ذي الرذاذ الدائر ★

على الشكل ٤-١٣ يبين المقطع الطولي لجهاز الحراق ذي الرذاذ الدائر ، يصل المازوت المسخن حتى ٥٠ ÷ ٧٥ °C والواقع تحت ضغط فائض قدره ٠,٢ ÷ ٠,٥ bar الى المحور المفرغ الذي يدور بسرعة كبيرة ، من المحور المفرغ يمر المازوت عبر الموزع الى الكأس الدائر مع المحور فتتشكل طبقة على السطح الداخلي للكأس ويندفع المازوت الى الامام بسبب الشكل المخروطي ، ثم ينفلت من طرف الكأس حيث يتقاطع مع جريان الهواء الآتي من مروحة الحراق ،وبالنتيجة يتشكل مزيج وقودي متجانس ، ثم يمتزج فيما بعد مع تيار الهواء المتبقي والمفتول والآتي عبر القنال الدوراني . تؤمن السرعة الكبيرة للكأس الدائر (٦٠٠٠ ÷ ٧٠٠٠ دورة / دقيقة) ترذيذا جيدا للمازوت وتصل الانتاجية حتى واحد Kg /Sec وذلك في مجال

واسع لتغيير الانتاجية (100 % ÷ 20) .



الشكل (٤-١٣) : الحراق ذي الرذاذ الدائر .

١- محور مفرغ ، ٢- الموزع ، ٣- كأس مخروطي ، ٤- المروحة ، ٥- الشق الحلقي ، ٦- الجهاز النصلي ، ٧- القنال الحلقي ، ٨- محرك كهربائي ، ٩- حزام لنقل الحركة ، ١٠- ناقل لولبي للحركة ، ١١- المسخن الكهربائي للمازوت ، ١٢ - انبوب نقل المازوت ، ١٣- صمام مغناطيسي ١٤- قنال امداد المازوت الى الصمام (١٣) ، ١٥- الحاجز المنظم .

ب ـ الحراقات الغازية

تبعا لطريقة امداد هواء الاحتراق تقسم الحراقات الغازية الى نوعيـــن :

١ـ الحراقات الامتصاصية ، ومنها يستفاد من الفعل الامتصاصي لتيار الغاز في جر هواء الاحتراق اللازم

٢ـ الحراقات القسرية وفيها يرد الهواء الى الحراق قسرا من مروحة التهوية ، ويجري امدادها بالغاز ذي الضغط المنخفض مما يرفـــع من مستوى الامن في المنشأة ، وتتلخص عيوب الحراق القسري في استهلاك القدرة الكهربائية على تدوير مروحة التهوية ، وفي انعدام نواظم التحكم الذاتي بنسبة مزج الهواء مع الغاز .

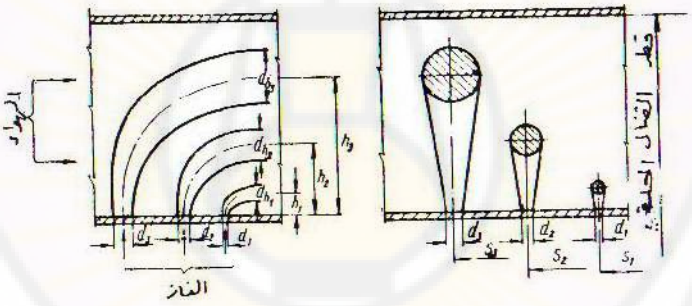
★ ففي الحالة الحدية عندما ينقطع امداد الهواء (بسبب تعطل مروحة التهوية) يخمد اللهب في الموقد ، وعند محاولة اعادة الاشتعال بدون تهوية اولية يتشكل خطر حدوث انفجار كبير القوة ذي تأثير تخريبي ،ولهذا السبب تجهز مولدات البخار ذات الحراقات الغازية القسرية بجمل التحكم الآلي بامداد الهواء وفقا لتصريف الغاز وبالتوقف الآلي عن امداد الغاز في حالة انخفاض تصريف الهواء دون الحدود المقبولة .

★ ولتشكيل المزيج الوقودي تستعمل طريقتان ١) بتقسيم جريان الغاز الاساسي الى تيارات صغيرة ٢) أو برفع تهييج الجريان الهوائي الغازي .

تتميز عملية احراق الغاز الطبيعي بالحاجة الى مزجه مع الهواء بنسب حجمية متفاوتة بشكل كبير ، فواحد m^3 من الغاز يحتاج الى

حوالي $20\ m^3$ من الهواء الساخن ، ان هذا الامر يسمح بامداد الغاز على شكل نوافير صغيرة بسرعة 100 m/Sec تصب في جريان الهواء الضخم الذي يسير بسرعة 20 ÷ 40 m/sec ؛ ويمكن ادخال نوافير الغاز في الهواء المفتول او الذي يسير بحركة اندفاعية ؛ علما بأن المزج في الحالة الاولى افضل من الحالة الثانية .

* لضمان توزيع الغاز المتجانس في الحراقات عالية الانتاجية ، ذات المقطع الكبير لقنال الهواء ، يتوجب على نوافير الغاز ان تدخل بأعماق مناسبة ضمن قنال الهواء (الشكل ٤-١٤) لتتوزع على طبقتين هوائيتين او ثلاث طبقات .



الشكل (٤-١٤) : مخطط نمو النوافير الغازية عند مختلف اقطار ثقوب انفلات الغاز .

* ويتحدد العمق النسبي لدخول نافورة الغاز في المقطع العرضي لجريان الهواء بالعلاقة التالية :

$$\star \frac{h}{d} = k_s \cdot k_\alpha \cdot \frac{w_g}{w_a} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_a}} \qquad ; (3-4)$$

حيث :

1- w_g ـ سرعة انفلات الغاز من الثقوب ؛

2- w_a ـ سرعة الهواء في مكان الالتقاء مع نوافير الغاز ؛

3- ρ_a ، ρ_g ـ كثافات الغاز والهواء ؛

4- d ـ قطر ثقب انفلات الغاز ؛

5- k_s ـ معامل لا واحدي ، يتعلق بالنسبة s/d ، للنوافير المنتظمة في صف وللنافورة المفردة :

$$S/d = \infty \quad , \quad k_s = 2,2$$

6- k_α ـ معامل لاواحدي متعلق بزاوية الاندفاع ، عند $\alpha = 90^\circ$

$$k_\alpha = 1 .$$

★ من العلاقة (3-4) نتبين انه عندما تتماثل سرعات انفلات الغاز في جريان الهواء ذي التصريف الثابت وذلك من اجل مميزات البوق α ، s/d المفترضة يكون العمق النسبي لكافة النوافير متماثلا :

$$\star \frac{h_1}{d_1} = \frac{h_2}{d_2} = \frac{h_3}{d_3} \qquad , (4-4)$$

تشير العلاقة الاخيرة على ان اعماق غور نوافير الغاز تتناسب طردا مع اقطار ثقوب انفلات الغاز ، وتدل التجربة العملية على

Damascus University

نسبة اقطار النوافير d_h الى عمق الغور في الجريان h تظل ثابتة :

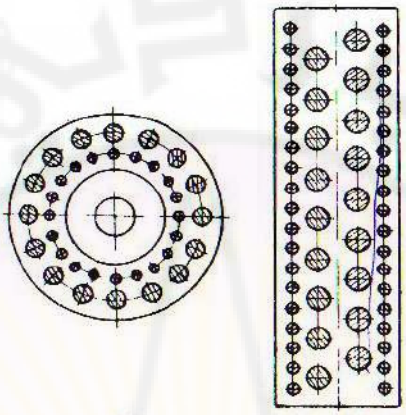
$$\frac{d_h}{h} = 0,75 \quad (5-4)$$

★ يجري اختيار المسافات بين الثقوب انطلاقا من شروط منع التصاق نوافير الغاز المختلفة ، ويوزع الغاز على شكل نوافير دقيقة في الحراقات الاسطوانية الدوامية او الاندفاعية ، ويجري امداد الغاز من اطراف الاسطوانة باتجاه المحور ، وقد يحدث العكس حيث يمر الغاز منطلقا من محور الاسطوانة باتجاه الاطراف (الشكل ٤-١٥،أ،ب)

★ تصنف الحراقات الغازية تبعا لاسلوب تشكيل المزيج الهوائي الغازي الى كينيماتيكية يجري فيها مزج الهواء مع الغاز قبل ورودهما الى الحراق ، وانتشارية تصل فيها تيارات الغاز والهواء الى الموقد بشكل منفصل لتمتزج فيه .

★ وتتميز مواقد احراق الوقود الغازي بأن الشعلة تضيء فيها حسب درجات مختلفة ، ويتعلق هذا الامر بشكل اساسي بشروط تشكيل المزيج الوقودي ، فالحراقات الكينيماتيكية ذات المزج الاولي الجيد والمتجانس لاتخلف هباب الفحم وتنتج شعلا غير مضيئة ، بينما تسوء شروط المزج والاحتراق في الحراقات الانتشارية فتخلف هباب الفحم وتزداد اضاءة الشعلة ، في مواقد مولدات البخار الضخمة تفضل الحلول الوسطية التي يتم بموجبها مزج الغاز مع الهواء الاولي الاساسي ويتابع المزيج المحترق اختلاطه مع الهواء الثانوي في الموقد ويؤمن هذا الاسلوب الاضاءة الكافية للشعلة مما يعني زيادة الانتقال الحراري

في الموقد بحد ذاته .



الشكل (٤-١٥): مخطط نمو النوافير الغازية .

a – في الحراق الحلقي مع امداد الغاز المركزي ؛

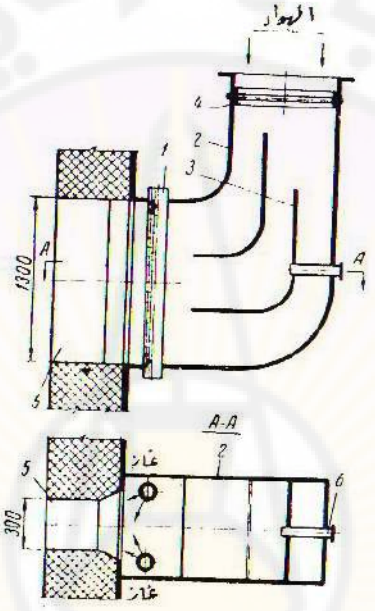
b – في الحراق الشقي مع امداد الغاز الطرفي .

جـ – تصميم الحراقات الغازية

في الشكل ٤-١٦ يبين تصميم الحراق ذي الفتحة الشقية ، يرد الغاز الى الحراق ويوزع عبر انبوبين يحتويان على عدد كبير من الثقوب (قطر 6 mm) متوضعة على صفين بشكل شطرنجي ، ويخرج الغاز من الثقوب بسرعة 40 m/sec ليشكل مع جريان الهواء المزيج الوقودي ، ويدخل الاخير الى الموقد من خلال نافذة مستطيلة الشكل . يرد الهواء عبر قنال يحتوي على انصال موجهة تساعد

في تجانس سرعة الهواء في مقطع القنال قبل الامتزاج مع الغاز .

تشكل الحراقات ذات الفتحات الشقية شعلا قصيرة اللهب ضعيفة الاضاءة



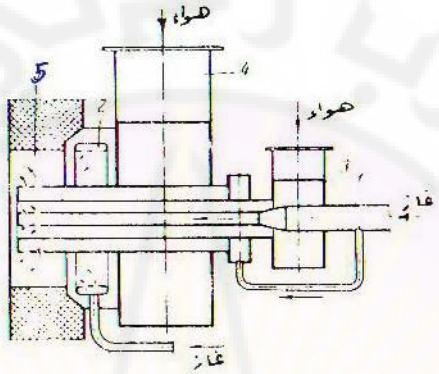
الشكل (٤-١٦) : الحراق الشقي ذو الامداد الطرفي للغاز.

١- انبوب توزيع الغاز الشاقولي ، ٢- قنال الهواء

٣- الانصال الموجهة ، ٤- الحاجز المنظم ، ٥- شق مستطيل الشكل ، ٦- قنال لجهاز الاشعال .

الشكل ٤-١٧ يبين مثال لتصميم حراق غازي يمكن فيه التحكم بشدة اضاءة الشعلة ،وهو ما يعني التحكم بكميات الحرارة الاشعاعية والحملية الصادرة عن شعلة الحراق ، يحتوي التصميم المذكور على حرافيـــــن

متداخلين مع امرار مستقل للهواء والغاز لكل منهما .



الشكل (٤-١٧): الحراق الحلقي الثلاثي.

١- حراق غازي ثنائي الجريان يمد اليه الغاز مركزيا ويمزج مع الهواء خارج الحراق ، ٢- حراق غازي يمد اليه الغاز طرفيا ويمزج مع الهواء داخله ، ٣- قنال امداد هواء المزج الخارجي ، ٤- قنال امداد هواءالمزج الداخلي ، ٥ - نافذة الحراق .

د - انظمة عمل واستثمار المواقد المازوتية الغازية

يمكن تعداد مؤشرات انظمة عمل المواقد على الشكل التالي :

١) معامل فائض الهواء في الموقد ، ٢) تماثل امداد الهواء والوقود مع الزمن الى كافة الحراقات العاملة على التوازي (التوافق) ، ٣) الطرح الحراري في فراغ الموقد ، ٤) وتؤثر قيم مؤشرات الانظمة في

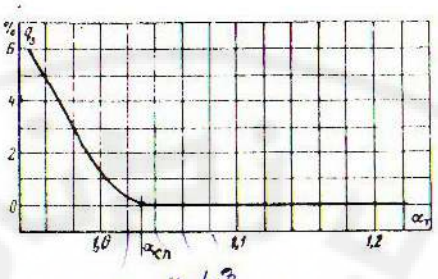
الحسابات الحرارية كما هو وارد في الجدول ٤–١

الجدول ٤–١

نوع الوقود	معامل فائض الهواء عند مخرج الموقد α_t	الطرح الحراري $\frac{BQ_b^p}{V_f}$ Kw/m³	ضياعات الحرارة q_3+q_4 ، %
مازوت	1,1	290	0,5
غاز	1,1	350	0,5

فائض الهواء في الموقد

* لاتتعلق نوعية المزيج الوقودي بشروط مزج الوقود مع الهواء فقط وانما تتعلق ايضا بكمية الهواء المقدم للاحتراق في الموقد، وينعكس هذا الامر بوضوح على الضياعات الحرارية لاسباب كيميائية (الشكل ٤–١٨) حيث يتضمن التابع التجريبي $q_3(\alpha)$ على انعطاف حاد عند $\alpha = \alpha_{cr}$. في المجال $\alpha > \alpha_{cr}$ يختفي نقص الاحتراق الكيميائي والواضح انه في الشعلة المهيجة يمكن الحصول على الاحتراق الكامل للغاز عند $\alpha = 1,03$ وفي شروط الاستثمار العملية يتوجب زيادة معامل فائض الهواء حتى $\alpha = 1,05$ بسبب عدم تجانس امداد الهواء في المواقد التي تحرق المازوت الذي يحتوي على نسبة عالية من الكبريت يؤخذ معامل فائض الهواء $\alpha_t = 1,02 \div 1,03$.



الشكل (٤–١٨): تأثير معامل فائض الهواء α_t على ضياعات رداءة الاحتراق الكيميائية q_{v3}.

الارقام الواردة لمعامل فائض الهواء اصغر من المعدلات المعتمدة ، والسبب في ذلك هو ان تخفيض معامل فائض الهواء يزيد من وثوقية عمل مولد البخار ،ويرفع مردوده والامر يحمل اهمية خاصة في حالة احراق المازوت ذى النسبة العالية من الكبريت.

في شروط الموقد وعند وجود الاوكسجين الحر $\alpha_t > 1$ تتشكل غازات SO_2 و SO_3 ، ويتفاعل الاخير مع ابخرة الماء لتتشكل ابخرة حمض الكبريت وتتكاثف الاخيرة على سطوح التسخين التي تكون درجة حرارتها دون درجة حرارة نقطة الندى ، ونتيجة لذلك تتشكل شروط مناسبة لتخريب سطح التسخين بالاكسدة .

وتتعلق كمية غاز SO_3 المتشكلة وبالتالي شدة الاكسدة الناتجة عن حمض الكبريت بوجود الاوكسجين الحر في نواتج الاحتراق ، اي بالمعامل α_t ، علما بأن ازدياد α_t يزيد من كمية SO_3 المتشكلة كما يرفع من درجة الندى (الشكل ٤–١٩) ، ولهذا السبب يمكن تقليص الاكسدة المنخفضة الحرارة بتخفيض معامل فائض الهواء في الموقد α_t ويتطلب هذا الامر تحقيق الشروط

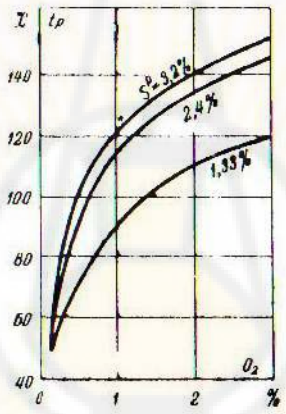
التالية :

١- تنظيم مراقبة مصروف الوقود والهواء على كافة الحراقات لتأمين التجانس في نسب الوقود والهواء ؛

٢- تنظيم مراقبة درجة حرارة سطوح التسخين وبخاصة مسخن الهواء ؛

٣- التوافق في امداد الوقود والهواء خلال الحراقات العاملة على التوازي .

ويصعب تحقيق الشرط الاخير بدقة عالية لعدة اسباب منها عدم امكانية مراقبة التصريف بدقة كافية .



الشكل (٤-١٩): تأثير فائض الاوكسجين على درجة الندى عند احراق المازوت ذي الاحتواء المتنوع للكبريت.

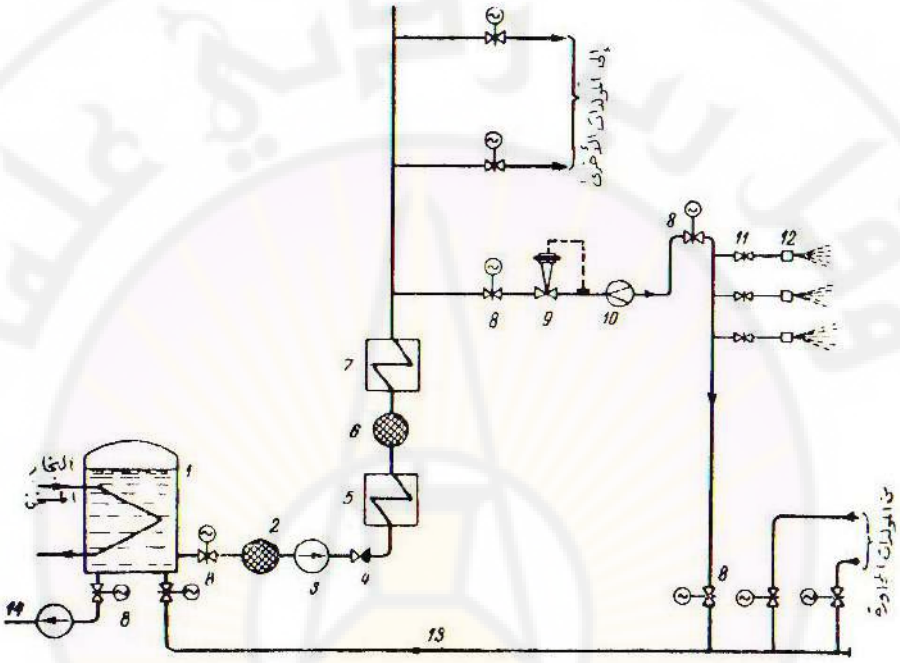
٤-٣ اعداد المازوت والغاز الطبيعي

آ - المازوت : يتطلب اعداد المازوت للاحراق اجراء عمليات طرح الرطوبة والشوائب الميكانيكية والتسخين لتخفيض لزوجته قبل دفعه للحراقات .

على الشكل ٤-٢٠ يبين مخطط اعداد المازوت من اجل التزويد الميكانيكي . يسخن المازوت في خزان الوقود 1 حتى 50 ÷ 60°C وبفضل ذلك تتحسن شروط طرح الماء ويسهل نقل المازوت في الانابيب ويؤدي وصول الماء الى الموقد الى زيادة احتمال اخماد اللهب ، والى رداءة الاحتراق بشكل عام . اما الشوائب الميكانيكية فتؤدي اغلب الاحيان الى سد الاقنية الصغيرة التابعة لاجهزة التزويد ولمنع حدوث ذلك توضع المصافي الشبكية (الفيلترات) ذات الثقوب الكبيرة 2 ، والمرشحات الدقيقة 6 ، كما وتوضع المسخنات 5 ، 7 ، 9 ، يكون عدد المصافي والمسخنات مزدوجا للاحتياط . وتصل درجة حرارة التسخين في الخزانات المفتوحة حتى 80 ÷ 100 °C ويمكن تسخين المازوت اللزج في الخزانات المغلقة حتى 110 ÷ 130 °C ، ويجب الا تزيد درجة حرارة التسخين عن درجة الغليان ، وذلك لمنع تشكل الطور الغازي .

يمكن للمازوت ان يتبرد في الانبوب الواقع بين المسخنات والرذاذات ولذلك يعزل الانبوب بشكل مشترك مع انبوب البخار الذي يسخن المازوت على طول المسار الذي يشتركان فيه ، يحتوي المخطط على الخط العائد 13 الذي يؤمن دوران المازوت المتواصل بما في ذلك

اوقات توقف مولد البخار عن العمل ، او توقف بعض اجهزة التزفيد ويؤدي ذلك الى منع تصلب المازوت .



الشكل (٤-٢٠): مخطط اعداد المازوت.

١- حوض الوقود ، ٢- المرشح الاولي ، ٣- المضخة الوقودية
٤- صمام معاكس ، ٥-و٧ - المسخنات ، ٦ - المرشح الدقيق
٨- صمام اغلاق ، ٩- منظم التصريف ، ١٠- مقياس التصريف
١١- صمام ، ١٢- رذاذ ، ١٣- الخط العائد ، ١٤- مضخة التصريف

يتطلب ترذيذ المازوت الحفاظ على ضغطه ولزوجته ضمن حدود معينة

والشكل ٢-١ يبين لزوجة المازوت المفضلة اقتصاديا لترذيذه ولضخه في المضخات .

عادة يجري التحكم بلزوجة المازوت بمساعدة درجة الحرارة ، الا ان تثبيت درجة الحرارة قد لا يفي بالغرض المطلوب ولذلك يمكن استخدام منظم اللزوجة ويجري تثبيت الضغط بمساعدة منظم الضغط الذي يتحكم بالصمامات التحكمية لخطوط ضغط المضخات .

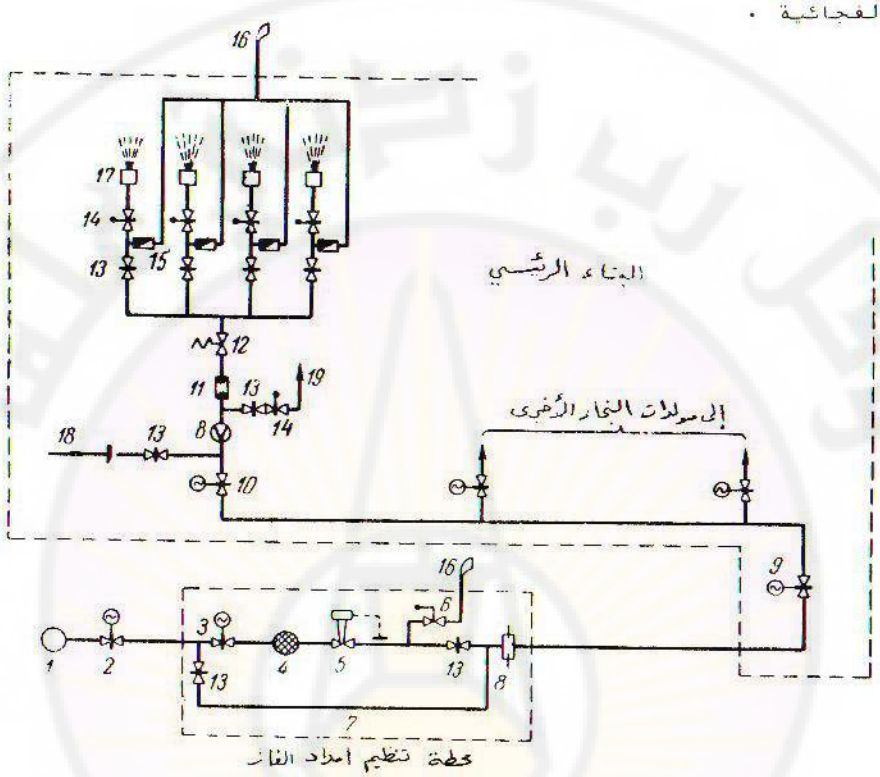
في حالة الترذيذ البخاري يصل المازوت الى الرذاذات بالسيلان الذاتي ، ولاحاجة هنا للمضخات ،ولا لتسخين المازوت قليل الزوجة .

ويصبح التسخين ضروريا بالنسبة للمازوت عالي اللزوجة ، وذلك انطلاقا من شروط النقل في الانابيب ، تتميز مخططات اعداد المازوت حسب الترذيذ البخاري ببساطتها ، ذلك انه لاحاجة هنا للمرشحات وذلك لكبر اقنية الرذاذات البخارية .

ب - الغاز الطبيعي : يتطلب اعداد الغاز الطبيعي الترشيح والحفاظ على الضغط المناسب بالخنق ، يكون ضغط الغاز في انبوب الامداد حوالي 5÷6 bar ويتغير هذا الضغط ضمن مجال واسع ولتأمين امدادالغاز الثابت يجري خنقه وتخفيض ضغطه حتى 1,1÷1,3 bar .

في الشكل ٤-٢١ يبين مخطط امداد الغاز الطبيعي ، لمنع حدوث الانقطاع في امداد الغاز تجهز المخططات بخط اضافي يفتح بشكل مؤتمت في حالات التوقف الفجائي لامداد الغاز . ويجري استخدام الخط الاحتياطي في حالات اجراء الصيانة ، يحتوي انبوب الغاز على تفرعات عديدة لامداد وتنظيم تغذية التجهيزات بالغاز ويقوم الصمام

السريع الاغلاق 11 يفصل التجهيز الذي تظهر فيه الاعطال الفجائية .



الشكل (٤-٢١): مخطط امداد الغاز.

١- انبوب امداد الغاز ، ٢ ، ٣ ، ٩ ، ١٠ ، صمامات ذات محركات كهربائية ٤- مصرشح، ٥- منظم الضغط ، ٦- صمام امان ، ٧ - انبوب مساعد ، ٨ - مقياس التصريف ، ١١- صمام عديم العطالة ، ١٢- حاجز منظم التصريف ، ١٣- صمام غالق ، ١٤- صمام منظم ، ١٥ - صمام معاينة ، ١٦ - الشمعة ، ١٧- الحراق الغازي ، ١٨ - خط الهواء ١٩- خط امداد الغاز الى حهاز الاشعال الغازي .

تجري تهوية الانابيب الغازية من خلال الاجزاء ذات النهايات المسدودة ، وذلك بمساعدة الانابيب التي تخرج الغاز المحصور الى الامكنة البعيدة عن الناس .

ويجري طرح الهواء من خلال الشموع قبل الايقاد، وخلال التوقفات يطرح الغاز المحصور في الاجزاء المفصولة من المخطط ، تنفذ انابيب الغاز بوجود ميل افقي يحول دون تجمع السائل كما ويسمح هذا الميل بطرح السوائل دوريا من خلال طارحات السائل المتكاثفة

الفصل الخامس

اسس الحساب الهيدروليكي لمولدات البخار والنظام الحراري لسطوح التسخين

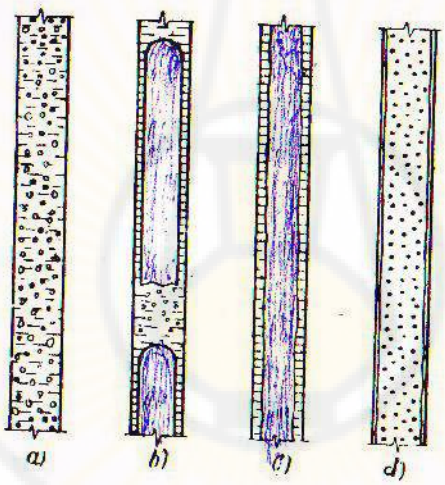
تمهيد : لكي نضمن عمل مولد البخار بثبات يتوجب امتصاص الحرارة من سطوح التسخين بشكل موافق لسخونتها ، في الموفر والمحمص يجري تثبيت نظام الجريان بتثبيت سرعة الماء والبخار فيهما ضمن حدود معينة ويتم بذلك الحفاظ على استقرار سطوح التسخين فيهما ، في عناصر توليد البخار يتحقق ذلك بالتبليل المستمر لسطوح التسخين بالماء وبالحفاظ على السرعة الكافية للمزيج البخاري المائي .

٥-١ انظمة الجريان المائي البخاري

تؤثر انظمة جريان المزيج المائي البخاري في انابيب توليد البخار تأثيرا كبيرا على شدة امتصاص الحرارة ، وتتعلق انظمة الجريان بحد ذاتها بكيفية توضع الانابيب في الفراغ (شاقولية ام افقية او منحنية) .

الانابيب الشاقولية : في حالات صغر كل من نسبة البخار وسرعة المزيج البخاري المائي تكون فقاعات البخار صغيرة (عدة مليمترات) وتتوزع بشكل متساو في مقطع الانبوب الشاقولي ، ويأخذ الجريان عندئذ تسمية نظام الجريان الفقاعي (الشكل ٥ – ١ ، a) .

مع ازدياد حصة البخار في المزيج تتوحد الفقاعات الصغيرة في اخرى اكبر حجما ، تشبه القذيفة بشكلها الخارجي ، ولذلك تدعى هذه الحالة بنظام الجريان القذائفي (الشكل ٥ – ١ ، b) .



الشكل (٥–١) : انظمة جريان المزيج البخاري المائي في الانابيب الشاقولية.

a – فقاعي ، b – قذائفي ، c – عمودي ، d – المستحلب

مع متابعة زيادة حصة البخار تضمحل السدادات المائية الواقعة بين

الفقاعات القذائفية مشكلة في نهاية الامر عمودا بخاريا متواصلا يتحرك حسب محور الانبوب . ويحاط هذا العمود بشريحة مائية حلقية تقوم بتبريد الجدار الداخلي للانبوب ، تدعى الحالة الاخيرة بنظام الجريان العمودي (الشكل ٥ - ١ ، c) .

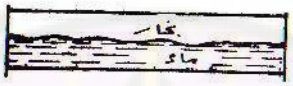
تتحدد سماكة شريحة الماء الحلقية بنسبة تصريف الماء والبخار وعندما تكون سرعة البخار كبيرة والضغط عاليا تختفي شريحة الماء ويمتزج بخار الماء بالقطرات المائية ويبقى على جدران الانبوب طبقة رقيقة وهو ما يدعى بنظام الجريان المستحلب (الشكل ٥ - ١ ، d)

عند انخفاض الضغط يعتبر نظام الجريان القذائفي اكثر استمرارية .

اما النظام العمودي فيلاحظ عند تواجد البخار بنسبة كبيرة فقط ، مع ازدياد الضغط تنخفض قوى الشد السطحي وبالتالي يزداد انقسام الفقاعات ويتحول النظام القذائفي ببطء وعند الضغط 30÷40 bar يظهر النظام القذائفي الفقاعي ويتوسع مجال النظام الفقاعي ، وعند الضغط 100 bar يختفي النظام القذائفي تماما ، ويسيطر مكانه النظام الفقاعي ، الذي يتحول بدوره عند ازدياد نسبة البخار فوق 60% الى النظام العمودي، وعند ازدياد السرعة يتحول الاخير الى النظام المستحلب .

(2) الانابيب الافقية : الامر المميز للجريان المائل البخاري في الانبوب الافقي هو عدم تجانس توزيع البخار والماء في المقطع . وبسبب صغر كثافة البخار يسير الاخير دائما بجانب المولد العلوي للانبوب بينما تسير الكتلة العظمى للماء بجانب المولد السفلي .

ومع هبوط السرعة يحدث انقسام واضح في طبقتي البخار والماء (الشكل ٥-٢) .

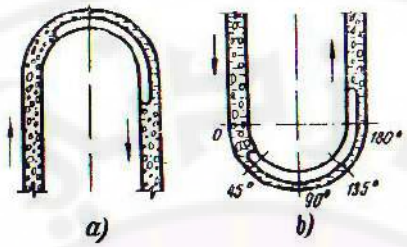


الشكل (٥-٢): نظام الجريان الطبقي
في انبوبة توليد البخار الافقيـــة .

(3) انحناءات الانابيب : يجري التمييز عادة ما بين الانحناءات العلوية والسفلية ،في النوع الاول يغير جسم التشغيل حركته الصاعدة نحـــو الاعلى الى حركة متجهة نحو الاسفل (الشكل ٥ – ٣ ، a) ويحدث العكس في الانحناءات السفلية المعاكسة (الشكل ٥ – ٣ ، b) في اماكن الانحناءات يسوء تبلل جدران الانبوب ، ويتعلق هـــذا الامر بتذبذب تصريف البخار خلال الانبوب وبالقوى النابذة التي تدفع الماء الى الجهة الاكثر بعدا عن مركز الانحناء ، ويمكن ان تؤدي هذه الحالة الى نقص التبريد في الجانب الداخلي من منحني الانبوب .

٥-٢ مؤشرات الجريان المائي البخاري

١- سرعة الدوران w_0 ،وهي سرعة الماء عند درجة حرارة الاشباع الموافقة لتصريف جسم التشغيل في الانابيب :



الشكل (٥-٣) : شنيات الانابيب .

a – النوع العلوي ، b-السفلـــــــي

$$w_o = \frac{G_{mix}}{f \cdot \rho'} \quad , \quad m/sec \quad , \quad (1-5)$$

حيث :

G_{mix} – التصريف الكتلي للمزيج البخاري المائي خلال جملة الانابيب، (Kg / sec) ؛

f – مساحة مقطع جسم التشغيل ، m^2 ؛

ρ' – كثافة الماء عند درجة حرارة الاشباع .

٢– سرعة الماء المشتقة w_o' : وهي السرعة الممكنة للماء فيما لوشغل مقطع انبوب توليد البخار بكامله :

$$w_o' = \frac{G_w}{f \rho'} \quad . \quad m/sec \quad , \quad (2-5)$$

٣- السرعة المشتقة للبخار w_0'' : وهي السرعة الممكنة للبخار فيما لو شغل مقطع الانبوب بكامله :

$$w_0'' = \frac{G_s}{f \rho''} \quad , \ m/sec \quad , \quad (3-5)$$

حيث :

G_s ، G_w - تصريف الماء والبخار خلال جملة الانابيب، kg/sec

ρ'' - كثافة بخار الماء .

٤- سرعة البخار النسبية w_r : في الجريان الصاعد يتحرك البخار بسرعة اكبر من سرعة الماء $w_s > w_w$ وفي الجريان الهابط يحدث العكس $w_s < w_w$ ويساوي تفاضلهما في الحالتين سرعة البخار النسبية .

$$w_r = w_s - w_w \quad , \ m/sec \quad , \quad (4-5)$$

٥- سرعة المزيج البخاري المائي w_{mix} : باستخدام العلاقة (1 - 5) نحصل على ما يلي :

$$w_0 = \frac{G_{mix}}{f \rho'} = \frac{G_s + G_w}{f \cdot \rho'} \quad , \ m/sec \quad , \quad (5-5)$$

ويمكن تحديد التصاريف الكتلية للماء والبخار كما يلي :

$$G_w = V_w \cdot \rho' = w_o' \cdot \rho' \cdot f \quad , \quad kg/sec$$

$$G_s = V_s \cdot \rho'' = w_o'' \cdot \rho'' \cdot f \quad , \quad kg/sec$$

حيث : V_w ، V_s - التصاريف الحجمية للماء والبخار ، m^3/sec ، وبعد تعويض G_w ، G_s في (5 - 5) نحصل على ما يلي :

$$w_o = w_o' + w_o'' \cdot \rho''/\rho' \quad , \quad m/sec \quad , \quad (6-5)$$

تكتب سرعة المزيج البخاري المائي باعتبارها حاصل قسمة مجموع التصاريف الحجمية للمركبات الى مساحة المقطع الاجمالي :

$$w_{mix} = \frac{V_s + V_w}{f}$$

او مع الاخذ بعين الاعتبار G_w ، G_s تكتب :

$$w_{mix} = w_o' + w_o'' \quad , \quad (a \, , 7-5)$$

وبتعويض w_o' من المعادلة (5 - 6) في المعادلة (5 - 7) نجد اخيرا :

$$w_{mix} = w_o + w_o'' \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right) \, , \, m/sec. \quad (b, 7-5)$$

٦- السرعة الكتلية للجريان $w\rho$: لايتعلق التأثير التبريدي للجريان فقط بالسرعة w وانما ايضا بالكثافة ρ ، ويجري عادة تقييم الفعل التبريدي للجريان بالجداء ρw اى بالسرعة الكتلية ρw $Kg/m^2\,sec$ وتحسب كحاصل قسمة التصريف الكتلي الى مساحة المقطع :

$$w\rho = \frac{G}{f} \quad , \quad Kg/m^2.sec \quad , \qquad (8-5)$$

٧- حصة البخار الكتلية في الجريان المائي البخاري (كسر الجفاف)

$$x = \frac{G_s}{G_{mix}}$$

ويمكن حساب الحصة الكتلية للبخار كما يلي :

$$x = \frac{i_y - i'}{r}$$

حيث :

i_y - انتالبي الجريان في المقطع المعني من جملة الانابيب ، KJ/Kg ؛

i' - انتالبي الماء على منحني الاشباع الموافق للضغط في المقطع ، KJ/kg ؛

r - حرارة البخر عند الضغط ذاته ، KJ/Kg .

٨- حصة البخار الحجمية في الجريان : عند تساوي سرعتي البخار والماء تدعى حصة البخار الحجمية بحصة تصريف البخار الحجمية :

$$\beta = \frac{V_s}{V_s + V_w} \quad , (9-5)$$

في العلاقة الاخيرة بعد تعويض $V_w = w_o' \cdot f$ و $V_s = w_o'' \cdot f$ نجد ما يلي :

$$\beta = \frac{w_o''}{w_{mix}} \quad , (a \cdot 9-5)$$

ومع الاخذ بعين الاعتبار العلاقة (b ، 7 - 5) يكون لدينا مايلي:

$$\beta = \frac{w_o''}{w_o + w_o''\left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right)} \quad , (b \cdot 9-5)$$

٩- حصة البخار الحقيقية في الجريان φ - وهي نسبة مقطع الانبوب المشغول بالبخار f_s الموافقة للسرعة الحقيقية للماء والبخار :

$$\varphi = \frac{f_s}{f} \quad , (10-5)$$

١٠- الكثافة التصريفية للمزيج البخاري المائي

وهي الكثافة الموافقة للسرعات المماثلة للبخار والماء:

$$\rho_{mix} = \frac{G_s}{w_o'' f} + \frac{G_w}{w_o' f} \cdot kg/m^3 \quad , (11-5)$$

١١- الكثافة الحقيقية للمزيج البخاري المائي ρ_r الموافقة للقيم الحقيقية لسرعات البخار والماء، وتتحدد اعتمادا على مايلي : لندرس عنصر الانبوب ذى الارتفاع Δh والمملوء بالمزيج البخاري المائي ، نرمز الى مساحات اقسام المقطع المشغولة بالماء والبخار f_w ، f_s على الترتيب ومجموعهما f وتكون كتل المركبات $f_w \cdot \Delta h \cdot \rho'$ ، $f_s \cdot \Delta h \cdot \rho''$ ومجموعهما يساوي كتلة العنصر المدروس $f \cdot \Delta h \cdot \rho_r$ ومنه نحصل على علاقة الكثافة الحقيقية :

$$\rho_r = \rho' - \varphi(\rho' - \rho''), kg/m^3, \qquad (12-5)$$

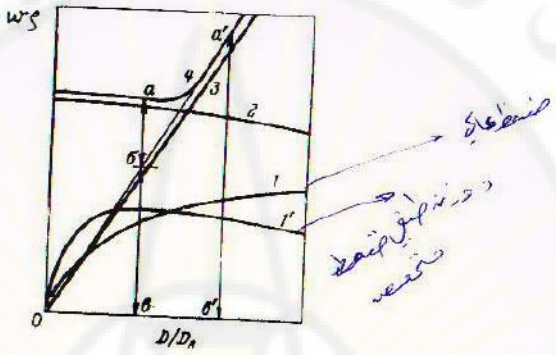
١٢- مضاعف الدوران k : وهو مقلوب كمية النسبة المئوية الكتلية للبخار ويعكس كمية المياه الدائرة الى كمية البخار الناتجة خلال نفس الوقت :

$$k = \frac{1}{x}, \qquad (13-5)$$

٥-٣ شروط تبريد معدن سطح التسخين

تنظم حركة المزيج البخاري المائي في مختلف انواع مولدات البخار بطرق متنوعة ، وهذا يعني تنوع طرق تبريد انابيب توليد البخار (الشكل ٥-٤) ، في مولدات البخار ذات الدوران الطبيعي الذي يتشكل نتيجة لتسخين الانابيب ، في شروط الضغط

المنخفض وازدياد الحمولة على مولد البخار تزداد في البدء السرعة الكتلية (في مدخل انبوب توليد البخار) بشدة وبعد الوصول الى القيمة الاعظمية تستقر تقريبا او تتناقص ببطء ، والسبب في ذلك هو ان توليد البخار المتزايد يؤدي من اجل الحجم النوعي الكبير للبخار الى ازدياد مقاومة الانبوب (المنحني 1 الشكل ٥-٤)



الشكل (٥-٤): تأثير حمولة مولد البخار على السرعة الكتلية . ١- دوران طبيعي (ضغط عالي) ١- دوران طبيعي (ضغط منخفض) ، ٢- دوران قسري عديد ، ٣- جريان مباشر ، ٤- دوران مركب .

في حالة الضغط العالي (المنحني 1) تتزايد السرعة الكتلية ببطء ويمكن لها في حالة الحمولة المغيرة ان لا تفي بالغرض المطلوب من حيث تبريد انابيب المعاكس .

تؤدي طريقة اقلاع مولد البخار عالي الضغط ، العاملة على المؤشرات

المنزلقة الى زوال هذا النقص في حالة الحمولة الصغيرة ذلك انه حتى في هذه الحالة (صغر السرعة الكتلية) تكون السرعة الحجمية كبيرة بالقدر الكافي

في مولدات البخار ذات الدوران القسري المضاعف ، تحدث حركة الماء والمزيج البخاري المائي بمساعدة مضخة الدوران القسري ، ولهذا السبب وبغض النظر عن قيمة الحمولة تكون السرعة الكتلية ثابتة تقريبا حتى انها تتناقص مع ازدياد الحمولة (المنحني 2) .

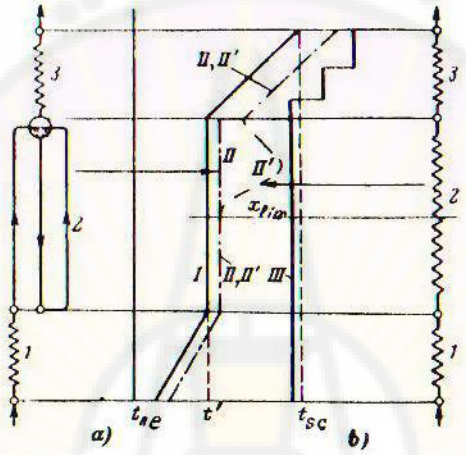
في مولدات البخار المباشرة تتناسب السرعة الكتلية مع الحمولة (المنحني 3) ، وهذا مما يؤدي الى تخريب الانابيب ولهذا السبب يمنع تخفيض الحمولة الى ما دون 30 % من القيمة الاسمية .

المنحني 4 يوافق مميز مولد البخار الذي تنظم فيه حركة جسم التشغيل وفقا لمبدأ الدوران القسري المضاعف في حالة الحمولة الصغيرة ، والضغط تحت الحرج ، وفي حالة الحمولة الكبيرة يعمل مولد البخار وفقا للجريان المباشر .

الشكل ٥-٥ يبين تغيرات درجة حرارة جسم التشغيل حسب مساره في مولدات البخار ذات الحلة وذات الجريان المباشر ، في كافة المولدات يمكن لدرجة حرارة مياه التغذية t_{ne} ان ترتفع في الموفر حتى درجة الاشباع كحد اعظمي .

في انابيب توليد البخار تصرف الحرارة على توليد البخار ، وذلك من اجل حرارة ثابتة للمزيج t' ، في المحمص ترتفع درجة الحرارة الى القيمة المطلوبة t_{sc} .

* في نظام العمل المستقر يجري المحافظة على سلامة سطوح التسخين بواسطة الامتصاص الحراري الفعال والمضمون بواسطة الماء او المزيج البخاري المائي او البخار المحمص ، ومن اجل ذلك يتطلب منع رفع درجة حرارة معدن الانابيب فوق المستوى المقبول .



الشكل (٥-٥) : تغير درجة الحرارة في المسار المائي للمولد ذى الحلة (٩) ؛ ومولد الجريان المباشر (b) . ١- الموفر ، ٢- انابيب البخر ، ٣- المحمص I - درجة حرارة جسم التشغيل ، II - درجة حرارة جدران انابيب المولد ذي الحلة ، II' - لمولد الجريان المباشر ، III - درجة الحرارة المسموح بها .

ويحدد هذا المستوى عند انعدام الترسبات وتساوي التسخين بين الانابيب بالعلاقة :

$$t_m = t_{ct} + \beta \int \mu \, q \left[\frac{2\delta_m}{\lambda_m(\beta+1)} + \frac{1}{\alpha_2} \right], \qquad (14-5)$$

حيث

- t_{ct} – درجة حرارة جسم التشغيل المار عبر سطح التسخين °C ؛
- λ_m ، δ_m – على الترتيب سماكة (m) ومعامل التوصيل لجدار الانبوب W/m.degree ،
- α_2 – معامل النقل الحراري من الجدار الى جسم التشغيل، $W/m^2.degree$.
- μ – معامل تشتت الحرارة في مقطع الانبوب وينتج عن عدم تجانس التسخين في محيط الانبوب ، يتعلق معامل التشتت بقطر الانبوب وبالكميات δ_m ، λ_m ؛
- β – نسبة القطر الخارجي للانبوب الى مثيله الداخلي.

من العلاقة (14 - 5) ينتج انه للحفاظ على درجة الحرارة المقبولة للانبوب من اجل الشروط المعطاة (q ، δ_m ، λ_m ، β) ، يتوجب تحقيق قيم كبيرة للمعامل α_2 ، في المحمصات وخاصة في الاجزاء النهائية له حيث تعمل الاخيرة على قيم الحرارة الحدية ؛ فيجري البخار بسرعات كبيرة وذلك لمنع تجاوز قيم درجة الحرارة المسموح بها ، في الموفرات $t_{c1} < t'$ والمعامل α_2 كبير نسبيا وذلك من اجل السرعات الصغيرة للماء وبذلك تكون $t_m \approx t_{ct}$

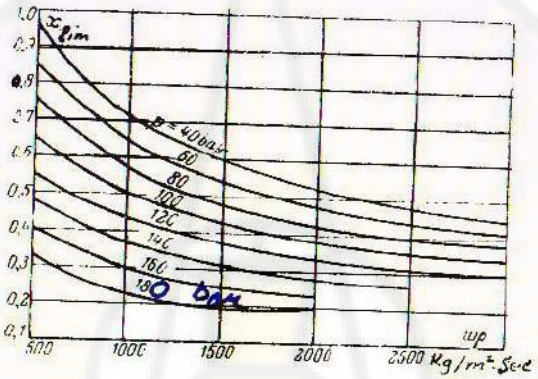
في انابيب توليد البخار العائدة لمولدات البخار ذات الحلـــة وبفضل مضاعفة الدوران تكون الحصة الكتلية للبخار عند الخـــروج $x < 20\ \%$ ودرجة الحرارة t_m اعلى بعدة عشرات الدرجات من درجة حرارة الاشباع (الشكل ٥ـ٥) .

في مولدات الجريان المباشر تتراوح النسبة الكتلية للبخار على طول الانابيب في المجال $0 < x < 1$ في اجزاء انابيب توليد البخار ، عندما تكون قيم x صغيرة نسبيا وبسبب الغليان الزائد ، تكون قيم α_2 كبيرة $(50 \div 150\ KW/m^2 \cdot degree)$ وفي هذه الشروط تكون t_m قريبة من t' ، وبدءا من نسبة ما للبخار حدية x_{lim} متعلقة بالضغط وبشدة التسخين نلاحظ قفزة في درجة حرارة الجدار ، وتشير الاخيرة الى رداءة الانتقال الحراري ، تنخفض درجة حرارة الانابيب المسخنة بعد وصولها الـــى قيمتها الاعظمية ، وهو ما يرتبط بازدياد الانتقال الحراري في منطقة المحمص يسوء الانتقال الحراري مرة اخرى ويؤدي الى ارتفاع درجة حرارة الانابيب ويظل هذا الامر صحيحا بالنسبة لمختلف انواع المولدات البخارية .

على الشكل ٥ـ٥ للمقارنة تبين درجة حرارة المعدن المسموح بها ، وللمثال يقبل بان سطوح التسخين منفذة من معادن مختلفـــة، فولاذ قليل التحسين للموفر ولمولدات البخار وللجزء الاول من المحمص ومع ازدياد درجة حرارة الجدار العاملة تزداد الاضافات المحسنة للفولاذ .

نستنتج مما سبق انه عند تحقيق النسبة الكتلية الحدية لبخار الماء x_{lim} تتخرب بنية الجريان نتيجة لتبخر الحلقة المائية الملاصقة لجدار الانبوب ، مع ازدياد الضغط تنخفض قيمة x_{lim}.

الشكل ٥-٦ يبين تابع حصة البخار الكتلية الحدية بالنسبة للتصريف الكتلي والضغط العامل في الانابيب الشاقولية عند $q_v = 700\ Kw/m^2$.



الشكل (٥-٦): حدود منطقة التبادل الحراري الرديء في الانابيب الشاقولية عند $q_v = 700\ KW/m^2$.

من الشكل نتبين انه مع ازدياد الضغط فوق $P \geq 180\ bar$ ينتشر مجال رداءة الانتقال الحراري حتى سطوح التسخين التابعة للجزء الوفري.

يحدد معامل النقل الحراري في شروط التبادل الحراري الرديء من الشكل ٥-٧ .

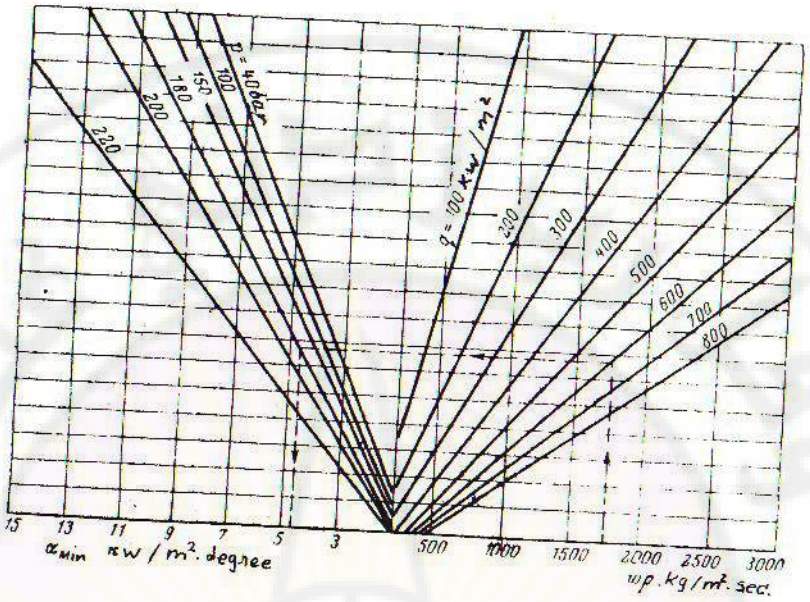
- في الاستثمار يلاحظ انزلاق منطقة الانتقال الحراري الردي‌ء على طول الانبوب المولد للبخار وذلك بسبب تأثير العوامل الاستثمارية . في حدود المنطقة المذكورة يتعرض المعدن للانهاك الحراري الناتج عن التغير المستمر لدرجة الحرارة ، ولتصغير مطال اهتزاز الحرارة يحدد الضاغط الحراري بين جدار الانبوب الداخلي والجريان بالشرط $\Delta t \leq 80\,^{\circ}C$ ويتحقق ذلك الامر بالسرعة الكتلية الكافية .

- لايختلف التبادل الحراري الداخلي في الانابيب الافقية ذات القطر الصغير (دون 15 mm) عن مثيله في الانابيب الشاقولية ، ويتحدد بالمخطط الوارد على الشكل ٥-٧ .

- في الانابيب الافقية ذات الاقطار الاكبر من 15 mm .لايكون التبادل الحراري متجانسا حتى ولو كان التسخين متناظرا على محيط المقطع . حيث يكون التبادل على المولد العلوي اسوأ بكثير من المولد السفلي ، ويؤدي ذلك الامر الى زيادة تسخن المولد العلوي بالمقارنة مع السفلي (الشكل ٥-٨) ، وفي شروط معينة تتطاير قطرات الماء دوريا على جوانب الانابيب الاكثر سخونة مما يؤدي الى تبريدها بشدة وبشكل دوري ؛ وهذا ما يؤدي بدوره الى تخريب انهاكي للمعدن .

- تتبخر قطرات المياه المتطايرة الى جانب الانبوب الزائد السخونة فتتشكل طبقة ترسبية ملحية (الشكل ٥-٩ a) ، وفي حالة وجود القلوي الحر يتأكسد معدن الانبوب (الشكل ٥-٩ ، b) .

- يؤدي عدم التجانس في توزع الاطوار في مقطع الانبوب المولد للبخار الى توسع مجال النظام الحراري الردي‌ء .



الشكل (٥-٧) : معامل النقل الحراري من الجدار الى الجريان ذي الضغط تحت الحرج في منطقة التبادل الحراري الرديء ، $x < x_{lim}$.

وعند $P < 180$ bar تمتد رداءة التبادل الحراري حتى مقطع بدء الغليان ، وعند $P \geq 180$ bar تمتد رداءة الانتقال الحراري حتى المنطقة الوفرية .

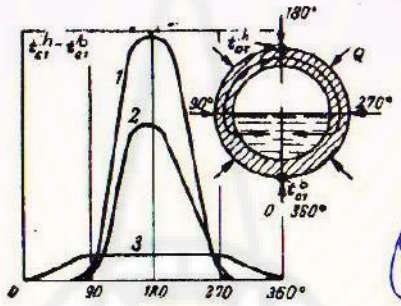
يحسب معامل النقل الحراري للانابيب الافقية وقليلة الميل بالعلاقة :

$$\alpha_{h.} = \alpha_v \frac{0{,}02}{d} \cdot \text{w/m}^2\text{.degree} \cdot (15-5)$$

حيث :

d ـ القطر الداخلي للانبوب ، m ؛

α_w ـ معامل النقل الحراري للانبوب الشاقولي .

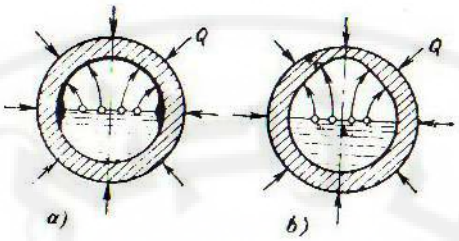


الشكل (٥ـ٨) : التدرج الحراري لمولدات انبوبة البخر الافقية في نظام الجريان الطبقي.

١ـ $P = 180$ bar ، ٢ـ $P = 110$ bar ؛

٣ـ $P = 224$ bar .

يتأثر النظام الحراري للانابيب الافقية بالقطر وبشدة التسخين مع زيادة شدة التسخين تزداد اهمية تبريد المولد العلوي للانبوب ولذلك يتوجب زيادة السرعة الكتلية (الشكل ٥ـ١٠) .



الشكل (٥-٩): طابع الترسبات (a) والاكسدة القلوية (b) في مقطع انبوبة البخر الافقية عند النظام الجريان الطبقي ٠

٥-٤ - اسس الحساب الهيدروليكي للجملة المفتوحة

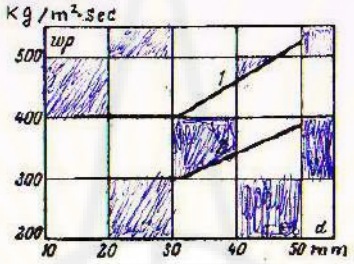
تشكل مولدات البخار ذات الجريان المباشر جملة مفتوحة لانعدام الدوران فيها ٠

لضمان وثوقية عمل انابيب التسخين المتوازية المختلفة ، يتوجب تأمين عملها ضمن نظام هيدروليكي وحراري وسطي واحد ، كما يتوجب على الحساب الهيدروليكي ان يعكس في طياته عدم التماثل في المميزات الهيدروليكية للانابيب (الاختلاف في القطر ، الطول ، الخشونة) ، تأثير الانابيب المجمعة ، تأثير عدم الثبات في عمل انبوب توليد البخار ، وايضا عدم التماثل في المميزات الحرارية لها (التسخين المختلف للانابيب بسبب اختلاف توضعها بالنسبة لتيار نواتج الاحتراق الغازية ، عدم تماثل اتساخها بالرماد) ٠

والمعلوم ان عدم التماثل في المميزات الهيدروليكية والحرارية يكون اكبر تاثيرا في المنشآت ذات الاستطاعة الكبيرة ،

حيث يؤدي ازدياد سطوح التسخين الى ظهور الاختلافات في انظمة العمل بالنسبة لمختلف العناصر .

ويكون توزيع جسم التشغيل على الانابيب مختلفا كما ويختلف الانتالبي عند مخرج بعض الانابيب عن القيمة الوسطية الحسابية بشكل ملموس .



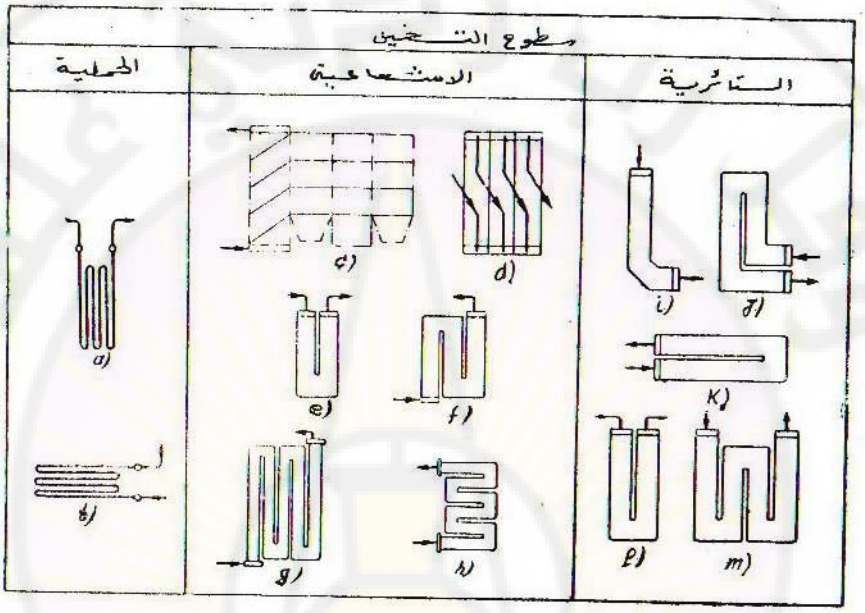
الشكل (٥-١٠) : السرعة الكتلية في انابيب البخر الافقيـــــة .

١- السطح اشعاعي ، ٢- السطح حملي

على الشكل ٥-١١ تبين اهم مخططات الاطر الهيدروليكية لسطـــوح التسخين ذات الحركة القسرية لجسم التشغيل .

تزداد درجة حرارة سطوح التسخين احادية الطور مع ازدياد انتالبي جسم التشغيل (البخار في المحمصات والماء في الموفرات) ، بينما تظل درجة حرارة جدران الانابيب المولدة للبخار ثابتة ، وتزداد نسبة البخار في المزيج كما يزداد انتالبيه ، ويظل هـــذا

الامر صحيحا الى ان تصل نسبة احتواء البخار الى قيمتها الحدية x_{lim} حيث تتزايد عندئذ درجة حرارة جدران الانابيب .



الشكل (٥-١١) : المخططات الهيدروليكية الاساسية لأطر سطوح التسخين ذات الحركة القسرية لجسم التشغيل .

a ، b ـ باكيت حملي شاقولي وافقي ، c ـ مخطط اللف الافقي للعواكس ، d ـ الالواح الشاقولية ، e ـ لوح على شكل U ، ـ لوح على شكل N ، g ـ باكيت شاقولي متعدد المشاوير ، h ـ باكيت افقي متعدد المشاوير ، i ـ ساتر على شكل L ، J ـ ساتر على شكل L مضاعف ، K ـ ساتر افقي ، l ـ ساتر على شكل U ، m ـ ساتر متعدد المشاوير .

لحساب الاختلاف الحراري نفترض ان تزايد الانتالبي في ملف ما هو Δi_v ،وان تزايد الانتالبي الوسطي لسطح التسخين هـــو Δi_m ويكون الاختلاف الحراري :

$$R = \frac{\Delta i_v - \Delta i_m}{\Delta i_m} \cdot 100 = \left(\frac{\Delta i_v}{\Delta i_m} - 1 \right) \cdot 10 \, \% \, , \quad (16-5)$$

ونكتب ايضـــا :

$$\Delta i_m = A \cdot \frac{Q_m}{D_m} \; ; \; \Delta i_v = A \cdot \frac{Q_v}{D_v}$$

حيث :

Q_m , Q_v ـ كميات الحرارة المنقولة ؛

D_m , D_v ـ تصريف جسم التشغيل في الملف ذي الاختلاف الحراري والملف الموافق لنظام العمل الوسطي؛

A ـ معامل التناسب ، وبعد التعويض نجد ما يلي :

$$R = \left(\frac{Q_v}{Q_m} \cdot \frac{1}{\frac{D_v}{D_m}} - 1 \right) \cdot 100 \% \, . \quad (9 \, . \, 16-5)$$

النسب Q_v / Q_m ، D_v / D_m تمثلان على الترتيب عدم التجانس الحراري والهيدروليكي .

من العلاقة الاخيرة نستنتج ان الاختلاف الحراري متعلق بكل من عدم التجانس الحراري والهيدروليكي ، وتوضع قيمة الاختلاف الحراري

المسموح به انطلاقا من الشروط التفصيلية لعمل سطح التسخين ،فمثلا تعمل الاجزاء الخروجية من انابيب المحمصات ضمن شروط حرارية حدية ولذا لاتزيد قيمة الاختلاف الحراري المسموح به عن 15 % من قيمة الطاقة الحرارية التي يستقبلها المحمص ، وتعمل الموفرات ضمن منطقة التسخين المخفف ، ولذا تصل قيمة الاختلاف الحراري المسموح به حتى 100 % .

في انابيب توليد البخار تزيد درجة حرارة جدران الانابيب عن درجة حرارة جسم التشغيل بمقدار 20 ÷ 30 °C ،وبسبب انخفاض درجة حرارة الغلبان يمكن السماح باختلاف حراري كبير ، الا ان امكانية ظهور النظام الحراري الرديء وبخاصة عند التسخين الشديد تحول دون ذلك ولذا لاتزيد قيمة الاختلاف الحراري المسموح به عن 20 ÷ 40 % .

عدم الاستقرار الهيدروليكي في سطوح توليد البخار

يمكن للمميز الهيدروليكي الذي يمثل بالعلاقة $\Delta P = f(w, \varepsilon)$ والتابع لاقسام انابيب البخار المستقيمة ، ان يكون متعدد القيم حيث تتوافق بعض قيم هبوط الضغط مع عدة قيم للتصريف D ، وتنتج تعددية القيم هذه عن اختلاف قوانين المقاومة الهيدروليكية لجزئي الانبوب الوفري والمولد للبخار.في حالة حركة جسم التشغيل القسرية يحدث عدم الاستقرار الهيدروليكي في انابيب توليد البخار التي تحتوي على اجزاء وفرية .

يتألف فرق الضغط الكامل ΔP عند حركة جسم التشغيل في انبوب توليد البخار من مقاومة الاحتكاك (بما فيه المقاومات المحلية) ΔP_f ومقاومة التوضع الهندسي (ضياع الضاغط على قوى ثقل عمود جسم التشغيل) ΔP_g ، ونكتب عندئذ ما يلي :

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_g \quad , \quad Pc \quad , \qquad (17-5)$$

في العلاقة اهملت مقاومة تسارع الجريان ΔP_{acc} بسبب ارتفاع الضغط المطلق ، في مولدات البخار ذات الجريان المباشر والانابيب الافقية او الشبه افقية يهمل الحد الثاني في العلاقة بالمقارنة مع الحد الاول ، وفي هذه الحالة $\Delta P \approx \Delta P_f$.

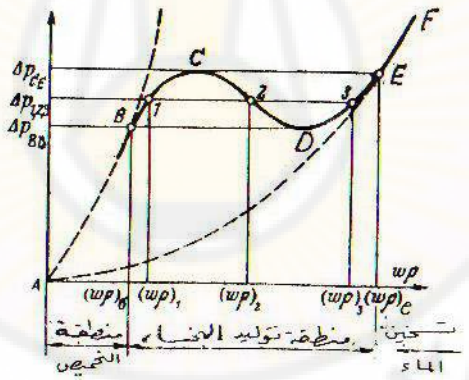
في مولدات البخار التي يقوم فيها المزيج البخاري المائي بحركة صعودية او بحركة صعودية هبوطية مركبة يصح الحد ΔP_f صغيرا بسبب قصر طول الانابيب ، وتكون المركبة الثانية كبيرة وبخاصة في حالة الحمولة الصغيرة . في الحركة الهبوطية تكون ΔP_g سلبية وتخفض فروق الضغط بين المجمعات .

جمل توليد البخار ذات الجريان الافقي

على الشكل ص-١٢ تبين لوحة كاملة لتغير مقاومة انبوب توليد البخار عند تغير تصريف المياه الغير مغلية ، في الجزء AB - بخار ، والجزء BCDE - مزيج بخاري مائي ، الجزء DE - ماء ، ويعمل الانبوب كمولد للبخار في محال -

تصريف الماء من $(w\varphi)_b$ وحتى $(w\varphi)_e$ ، ويكون مجال المقاومة الموافق من ΔP_{BD} وحتى ΔP_{CE} .

ونقول بأن المميز الهيدروليكي غير مستقر ، ذلك ان قيمة واحدة لفرق الضغوط ΔP بين النقاط المشتركة لدخول وخروج الانابيب اى الحلة والمجمعات ، تتوافق مع ثلاثة قيم مختلفة لتصريف المزيج البخاري المائي $(w\varphi)_1$ ، $(w\varphi)_2$ ، $(w\varphi_2)$ وذلك على الرغم من وجود اختلاف كبير في نسب البخار عند المقطع الخروجي من الملفات (الشكل ٥-١٢) ، وبما ان الانظمة الثلاثة غير ثابتة ،فان التصريف خلال الانبوب يمكن ان يتغير بشكل دوري ومع وجود اختلاف كبير في حصة البخار ، ويعتبر الفارق الكبير في الحجوم النوعية للبخار والماء عاملا اساسيا ، يؤثر في ثبات المميز .



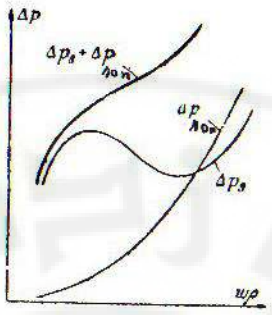
الشكل (٥-١٢) : المميز الهيدروليكي لانبوب البخر الافقي عند حركة الجريان القسرية .

ولذلك مع ارتفاع الضغط يصبح المميز اكثر ثباتا ، ويزداد ثبات المميز الهيدروليكي مع ازدياد انتالبي الماء عند دخوله الى الانبوب الحلزوني .

لضمان عمل انابيب توليد البخار ذات الحركة القسرية بشكل سليم يتوجب الحصول على مميز هيدروليكي افرادي القيم ، اي ذاك المميز الذي تتوافق كل قيمة لفارق الضغط ΔP مع قيمة واحدة معينة لتصريف الماء ، ويتحقق هذا الامر برفع مقاومة القسم الوفري من الانبوب ، حيث تتناسب المقاومة مع مربع التصريف تقريبا ، وتزداد المقاومة بوضع السدادات الاضعافية عند المدخل الى كافة انابيب توليد البخار او بتصغير قطر الانابيب الوفرية والحصول بالتالي على انابيب تدرجية .

عند جمع مقاومة السدادة مع مقاومة الانبوب يتشكل مميز اجمالي ثابت (الشكل ٥-١٣) الا ان افرادية قيم المميز غير كافية لتأمين الاستقرار ، ذلك ان اهتزازات صغيرة لفرق الضغط قد تؤدي الى تغير كبير في التصريف ، ولهذا السبب يوضع شرط اضافي ، مفاده ارتباط التزايد النسبي لتصريف جسم التشغيل مع التزايد النسبي لفروق الضغط بالمتراجحة التالية :

$$\frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{\Delta P_1} : \frac{(w\rho)_2 - (w\rho)_1}{(w\rho)_1} \geq 1/3 \quad (18-5)$$



الشكل (٥-١٣) : ازالة عدم الاستقرار الهيدروليكي في انبوب البخر الافقي بوضع الحلقة الاصنعافية .

الواح توليد البخار الصاعدة والصاعدة - الهابطة

في الالواح الشاقولية ذات الجريان الصاعد او الهابط او ذات المشاوير القليلة [∏ ، U ، N ، (الشكل ٥-١٤)] والتي يعتبر فيها الارتفاع قريبا من الطول الاجمالي للانابيب يتحدد المميز الهيدروليكي بالضغط وبكمية نقص التسخين حتى الغليان عند المقطع الدخولي، في الالواح الشاقولية تلعب مقاومة التوضع الهندسي Δp_g دورا اساسيا ، كما ان التأثير المتبادل للانابيب المجمعة الدخولية والخروجية ينعكس بشكل محسوس على المميز.

في الواح توليد البخار ذات المشوار الواحد الصاعد تكون مقاومة التوضع الهندسي والمقاومة الهيدروليكية موجبتين ولذا يكون فارق الضغط بين انابيب التجميع الدخولية والخروجية مساويا :

$$\Delta P = \Delta P_g + \Delta P_f \quad , \quad (19-5)$$

في حالة الحركة الهبوطية يكون الضاغط الهندسي موجبا والمقاومة الهيدروليكية سالبة :

$$\Delta P = \Delta P_g - \Delta P_f \quad , \quad (20-5)$$

للاسباب المبينة تتوضع المميزات الهيدروليكية للالواح احادية المشاوير في الربعين الايمن للوح ذي الحركة الصعودية والايسر للوح ذي الحركة الهبوطية لجسم التشغيل (الشكل ٥-١٤ ، a)

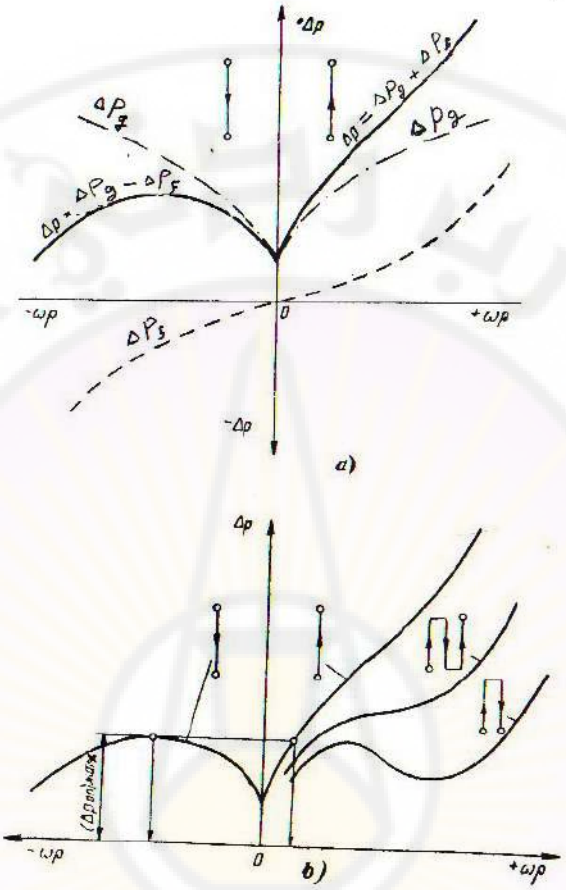
من المنحني نستنتج انه عند قيم التصريف الصغيرة يكون الجريان غير مستقر ، ذلك ان قيمة واحدة لفرق الضغط بين انابيب التجميع تتوافق مع ثلاثة قيم للتصريف ، ويمكن تحقيق الاستقرار في الجريان عن طريق رفع التصريف الى ما فوق القيمة العظمى لفرع المربع الايسر (الشكل ٥-١٤ ، b) :

$$\Delta P = P_{bas} - P_{sup} > (\Delta P_{on})_{max} \quad (21-5)$$

وللحركة الهبوطية يفترض تحقيق الشرط التالي :

$$\Delta P = P_{bas} - P_{sup} < 0 \quad , \quad (22-5)$$

في حالة الجريان الصاعد يتحسن المميز الهيدروليكي بتأثير ΔP_g



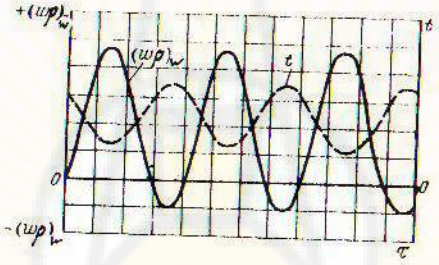
الشكل (٥-١٤) : المميزات الهيدروليكية لانابيب توليد البخار ذات الجريان القسري . a - انبوب شاقولي باتجاه واحد ، b - انبوب شاقولي باتجاه واحد وعلى شكل Π و N .

والعكس هو الصحيح في حالة الحركة الهبوطية ، وينعكس تأثير ΔP_g على الواح التوليد ذات الشكل Π و U ، حيث ان المميز الهيدروليكي للنوع الاخير افضل من النوع Π لان القسم الخروجي منه يتضمن نسبة كبيرة من البخار ، وبالتالي تكون كثافته اقل في القسم الذي تكون فيه ΔP_g ٧٥ ، في لوح التوليد ذى الشكل N والذي يتوضع مجمعه الدخولي في الاسفل والمجمع الخروجي في الاعلى يكون تأثير ΔP_g اكثر ايجابية على المميز الهيدروليكي لان هذا النوع يحتوي على مشوارين صعوديين .

نبض الجريان

يتعرض مولد البخار في الاستثمار دائما لمؤثرات عديدة ، تؤدي الى تخريب النظام المستقر ، والى تغيير تصريف جسم التشغيل في انابيب توليد البخار بشكل نبضي ، والمؤثرات هي : تغير التسخين تغير ضغط وتصريف وحرارة مياه التغذية وتبعا لنوع المؤثر وللمؤثرات التصميمية لسطح توليد البخار يمكن للتصريف المتردد ان يتخامد ويتوقف او يتحول الى مستوى الاهتزازات وهذا يعني انه خلال بعض الانابيب (الشكل ٥-١٥) يتزايد تصريف الماء $(w\rho)_w$ حتى القيمة العظمى ، ثم يتناقص مارا من خلال قيمة وسطية ،ليصل الى القيمة الدنيا (بعض الاحيان سالبة) ، بعد ذلك يتزايد من جديد ثم يتكرر هذا الاجراء من جديد ، وحينئذ يكون التصريف في الانابيب الاخرى نبضيا ايضا .

الا انه يحدث مع فارق في الطور . ويمكن ان يحدث ذلك من اجـــل تصريف اجمالي ثابت ومن اجل فارق ثابت في الضغط ويصل دور النبضات في مولدات البخار المباشرة الى عشرات الثواني وحتى الدقائق ، وتشكل الاهتزازات ذات المطال الكبير خطرا جسيما على انابيب توليد البخار حيث يؤدي التصريف الصغير لجسم التشغيل المترافق مـــع التبادل الحراري الرديء الى اهتزاز درجة حرارة جدران الانابيب (المنحني t) وبذا يتعرض المعدن الى اجهادات ذات طابع انهاكي.



الشكل (٥-١٥) : تردد التصريف ودرجة حرارة انبوب توليد البخار في حالة الجريان القسري .

يمكن التخلص من تأثير النبض الجرياني عن طريق وضع حلقات اضعافية لجريان الماء الوارد الى انابيب التوليد ، وتزيد الحلقات الاضعافية المقاومة الاجمالية ، وينتج ان الموفر يعمل تحت ضغط اكثر علوا ، ولا يستحسن استخدام الحلقات ذات المقاومة الكبيرة ، لان ذلك يؤثر على مصروف الطاقة وتتحدد نسبة الاضعاف بالعلاقة التجريبية

المثاليـــــة :

$$\frac{\Delta P_{ron} + \Delta P_{ec}}{\Delta P_v} = f(ws, P), \quad (23-5)$$

حيث :

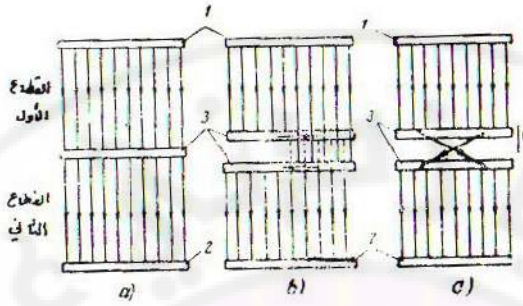
ΔP_v ، ΔP_{ec} – مقـــــــــاومات الاجزاء الوفرية والبخرية ؛

ΔP_{ron} – مقاومة الحلقة الاضعافية ، Pc .

تأثير المجمعات على توزيع الماء والبخار بين الانابيب

يميز بين المجمعات الدخولية (الشكل ٥-١٦) الموزعة 1 التي يصل اليها جسم التشغيل ويتوزع منها على الانابيب المتوازية وبين المجمعات الخروجية (الجامعة) 2 التي يصل اليهـــا جسم التشغيل من الانابيب المتوازية ليخرج منه الى العنصر التالي في مولد البخار . وهناك ايضا نوع ثالث من المجمعات هو النوع المازج والذي يقوم بتعديل عدم التماثل في عمل الانابيب .

تعمل المجمعات المازجة بشكل فعال في حالات جسم التشغيل المتألف من طور واحد (ماء او بخار) وتستخدم بشكل واسع في المحممات . تلعب طريقة ادخال البخار الى المجمع الدخولي او اخراجه من المجمع الخروجي دورا كبيرا في نظام عمل المحمص ، وفي بعـــض التصميمات تستخدم طريقة الادخال الطرفي للبخار ،



الشكل (٥–١٦) : المجمعات وتوصيلها مع جملة الانابيب.

a – المخطط الخطي ، b – نقل الجريان من خلال المجمعات المزجية ، c – نقل الجريان من خلال الانابيب المتقاطعة .

في المخطط Z (الشكل ٥–١٧) تتناقص السرعة المحورية ضمن المجمع الدخولي مما يؤدي الى هبوط الضاغط السرعي $W_{en}^2 \cdot \rho_1 / 2$ بسبب تحوله الى ضغط ستاتيكي ، ونرى التحول معكوسا في المجمع الخروجي .

من الشكل ٥–١٧ نرى ان الانابيب الحلزونية الطرفية اليسرى تعمل مع فرق الضغوط الذي يساوي :

$$\Delta p_{ser} + \Delta p_{st}^{en} + \Delta p_{st}^{sor}$$

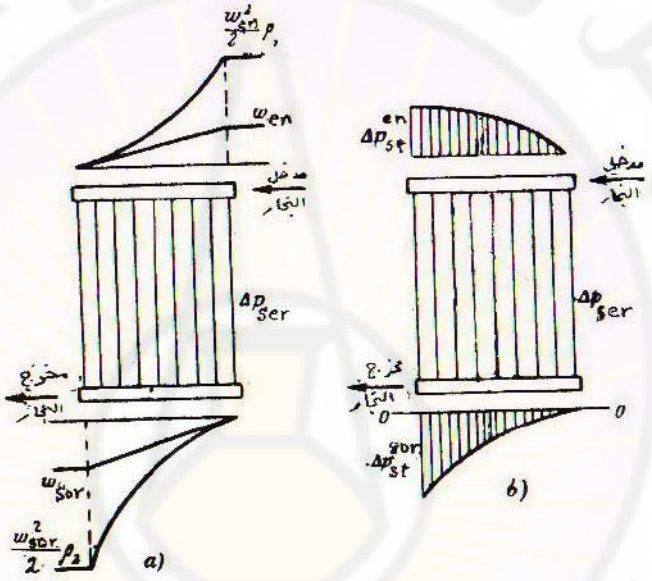
والواضح انه اكبر من فارق الضغط المؤثر في الانابيب الطرفية اليمنى الذي يتألف من فرق الضغط في الانبوب الحلزوني فقط.

حيث :

$\Delta p_{st}^{sor} \cdot \Delta p_{st}^{en}$ – فروق الضغط الستاتيكية في المجمعين

الدخولي والخروجي ؛

Δp_{ser} – فرق الضغط على الانبوب الحلزوني .



الشكل (٥–١٧) : المخطط الهيدروليكي للمحمص الموصل على الشكل Z .

a – توزع السرعة والضاغط السرعي ، b – توزع الضغط .

٥ـ٥ اسس الحساب الهيدروليكي للجملة المغلقة

المعادلات الاساسية للدوران

في مولدات البخار ذات الدوران الطبيعي يظهر الضاغط المحرك بسبب تسخين الانابيب ويعطى بالعلاقة :

$$S_{mob} = H(\rho' - \rho_n) \cdot g \,, \qquad (24\text{-}5)$$

حيث :

H ـ ارتفاع الاطار ، m ؛

$\rho_n \cdot \rho'$ ـ كثافة الماء والمزيج البخاري المائي، Kg/m^3 ؛

g ـ تسارع قوة الجاذبية ، m/sec^2 .

العلاقة السابقة تفترض ان المزيج البخاري المائي يملأ الانابيب الصاعدة في كامل ارتفاعها ، في الواقع يبدأ الغليان المتطور فوق مدخل الانابيب الصاعدة ، ولهذا ينقسم الارتفاع الاجمالي للانابيب الى القسم الوفري h_{ec} والقسم البخري h_{vr}

ويتحدد ارتفاع القسم الوفري انطلاقا من مساواة علاقة كمية الحرارة التي يلزم نقلها للماء للوصول به الى الغليان في الجزء الوفري :

$$\left[\Delta i_{hb} + \frac{\Delta i'}{\Delta P} \cdot \rho' \cdot g \cdot 10^{-5}\left(h_{des} - \frac{\Delta P_{des}}{\rho' g}\right) - h_{ec} \cdot \rho' \cdot g \cdot \frac{\Delta i'}{\Delta P} \cdot 10^{-5}\right] \cdot D_c \,, \; KJ/sec$$

مع كمية الحرارة المكتسبة من الموقد في الجزء الوفري :

$$Q_{ecr} \cdot \frac{h_{ec}}{h_{ecr}}$$

ومنه يكون لدينا ارتفاع القسم الوفري :

$$h_{ec} = \frac{\Delta i_{hb} + \frac{\Delta i'}{\Delta p} \cdot \rho' g \cdot 10^{-5} \left(h_{des} - \frac{\Delta P_{des}}{\rho' g} \right)}{\frac{Q_{ecr}}{h_{ecr} D_c} + \frac{\Delta i'}{\Delta p} \cdot \rho' g \cdot 10^{-5}} \cdot m \cdot (25-5)$$

حيث :

h_{des} – ارتفاع الانابيب الهابطة للاطار ، m ؛

h_{ecr} – ارتفاع انابيب المعاكس (المسخنة) ، m ؛

Q_{ecr} – كمية الحرارة المكتسبة في المعاكس ، KJ/sec ؛

D_c – تصريف الماء في الاطار ، Kg / sec ؛

ΔP_{des} – مقاومة الانابيب الهابطة ، P_c ؛

Δi_{hb} – نقص التسخين حتى الغليان في الحلة ، KJ/Kg .

– الحد $\frac{\Delta i'}{\Delta p} \cdot \rho' \cdot g \cdot 10^{-5} \left(h_{des} - \frac{\Delta P_{des}}{\rho' g} \right)$:

نقص تسخين المياه في المجمع الاسفل بسبب ارتفاع الضغط الستاتيكي الهندسي (مع حساب المقاومات الهيدروليكية للانابيب الهابطة) ؛

– تغير انتالبي الماء في ارتفاع قدره واحد متر ويحدد $\frac{\Delta i'}{\Delta p} \cdot \rho' g \cdot 10^{-5}$

من الجداول الترموديناميكية بدلالة الضغط P في الحلة (P تؤخذ في واحدة البار) ، KJ/Kg.m ؛

$\frac{Q_{ecr}}{h_{ecr} D_c}$ ـ تغير الانتالبي بسبب تسخين الماء في كل متر من ارتفاع الجزء الوفري ، KJ/Kg.m .

في مولدات البخار ذات الموفر الغلياني يصبح ارتفاع القسم الوفري صغيرا ولا حاجة عندئذ لاخذه بعين الاعتبار .

عند نظام العمل المستقر يتوازن الضاغط المحرك مع المقاومة الهيدروليكية التي تظهر بسبب حركة المياه والمزيج البخاري المائي في جزئي الاطار الهابط ΔP_{des} والصاعد ΔP_{rel} وبالتالي نكتب

$$S_{mob} = \Delta P_{rel} + \Delta P_{des} \quad / \ , \ P_c \ , \ (26-5)$$

يستهلك الضاغط المفيد S_{ut} في التغلب على المقاومة الهيدروليكية للحلقات الهابطة

$$S_{ut} = S_{mob} - \Delta P_{rel} = \Delta P_{des} \ , \ P_c \ , \ (27-5)$$

لحل معادلة الدوران الاخيرة - يتوجب معرفة الكمية φ (انظر العلاقة 5 - 10) ، التي تعتبر تابعا معقدا بالنسبة للكميات W_o ، W_o'' ، P ، d ، ولايجادها يستفاد من العلاقة البسيطة التالية :

$$\varphi = C\beta \quad , \quad (28-5)$$

في حالة الحركة الصعودية وبسبب الحركة النسبية للبخار تكون حصة المقطع المشغول بالبخار اصغر من القيمة المتوقعة من نسبة تصريف البخار والماء ومنه ينتج ان $\varphi < \beta$ و $c < 1$ ، والعكس صحيح في حالة الحركة الهبوطية : $c > 1$ و $\varphi > \beta$. في حالة الضغط العالي تكون سرعة انزلاق البخار النسبية صغيرة لذا يمكن اعتبار $\varphi = \beta$ و $c \approx 1$.

في الجداول يمكن تحديد قيمة c ضمن مجال واسع للضغوط .

طريقة الحساب

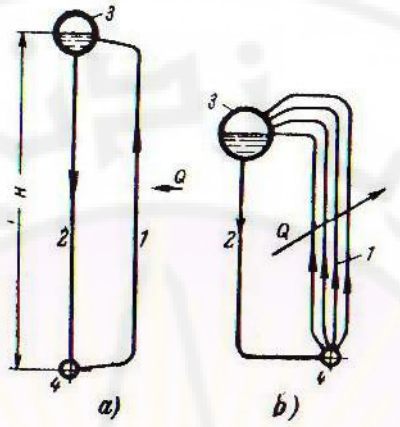
تقسم اطارات الدوران الطبيعي الى بسيطة ومعقدة ، في النوع الاول (الشكل ٥-١٨ ، a) تمتلك الانابيب الصعودية خواصا هندسية وحرارية متماثلة :

القطر ، الطول ، شكل الانابيب ، شروط التسخين ، كتقريب اولي يمكن اعتبار المعاكس اطارا بسيطا،في اطارات الدوران الطبيعي المعقدة تختلف الانابيب الصعودية في خواصها الهندسية والحرارية .

مخطط الدوران البسيط

يجري اجراء حساب الدوران بعد ان يتم الحساب الحراري لمولد البخار ، وبعد تحديد المميزات التصميمية للاطارات الدورانية ، واعتمادا على معطيات الحساب الحراري (التسخين) والسرعة w_o تحدد قيم φ ، ρ_r ، S_{mob} وبالتالي S_{ut}

وبما ان سرعة الدوران غير محدودة تفترض في البدء عدة قيم لها (الجدول ٥-١) ولكل من القيم المفترضة تحدد ΔP_{des} و S_{ut} .



الشكل (٥-١٨): اطر الدوران السيط (a) والمعقد (b).
١- الانابيب الصاعدة ، ٢- مثيلتها الهابطة ، ٣- الحلة ، ٤- المجمع .

الجدول ٥-١

عناصر اطر الدوران	حدود سرعة الماء عند مدخل الانابيب الصاعدة w_0 m/sec
العواكس الداخلة مباشرة الى الحلة	0,5 ÷ 1,5
العواكس التي تتضمن انبوبا مجمعا علويا	0.2 ÷ 1,0

يجري تحديد نقطة العمل في الاطار الدوراني بانشاء منحنيات التوابع $S_{ut}=f(w_o)$ و $\Delta P_{des}=f(w_o)$ على المخطط الذي تتوافق احداثياته مع معادلة الدوران (5-27) ، (الشكل ٥-١٩)

يجري حساب الدوران من اجل ثلاثة قيم لسرعة الدوران w_{o1} ، w_{o2} ، w_{o3} وبالتسلسل يحدد ما يلي :

١- مقاومة الجزء الهبوطي الذي تتحرك فيه المياه

$$\Delta P_{des}=\sum \xi \cdot \frac{w_{des}^2}{2} \cdot \rho \quad , \quad Pa \quad , \quad (29-5)$$

حيث :

- $\sum \xi$ – معامل المقاومة الاجمالي (الدخول الى الانابيب ، الاحتكاك ، الالتفاف ، والخروج من الانابيب) ؛
- $w_{des}=\frac{f_{rel}}{f_{des}} w_o$ – سرعة الماء في الانابيب الهابطة ، m/sec ؛
- f_{rel} – المساحة الاجمالية لمقطع الانابيب الصعودية ، m^2 ؛
- f_{des} – المساحة الاجمالية لمقطع الانابيب الهبوطية ، m^2 .

٢- ارتفاع الجزء الوفري (اذا توجب ذلك) وبالتالي ارتفاع القسم التوليدي

$$h_v = H - h_{ec} \quad , \quad m \quad , \quad (30-5)$$

٣- المقطع النسبي المشغول بالبخار بالعلاقة (5-28) ؛

٤- الكثافة الحقيقية للمزيج البخاري المائي بالعلاقة (5-12) ؛

٥- الضاغط المحرك للدوران – بالعلاقة (5-24) ؛

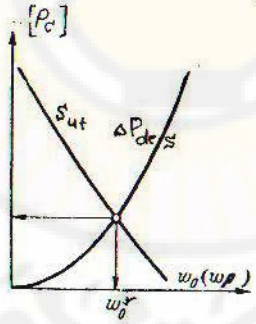
٦ـ مقاومة الجزء الصعودي الذي يتحرك فيه المزيج البخاري المائي ولذلك تستعمل علاقة من الشكل (5 - 29) حيث بدلا من ρ' توضع الكمية $\rho'[1+\bar{x}(\rho'/\rho''-1)]$ فيكون لدينا :

$$\Delta P=\sum \xi \cdot \frac{w_0^2}{2}\cdot \rho'\left[1+\bar{x}\left(\frac{\rho'}{\rho''}-1\right)\right] \quad ,P_c,(34-5)$$

حيث :

$\sum \xi$ ـ المعامل الاجمالي (الدخول الى الانبوب ، الاحتكاك ، الالتفاف والخروج من الانبوب) لمقاومة الجزء الصاعد من الاطار الدوراني .

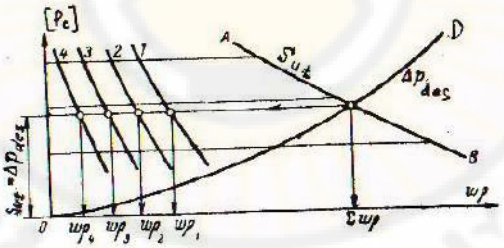
٧ـ الضاغط المفيد للدوران من العلاقة (5 - 27) بالاعتماد على المعطيات الناتجة ينشأ مخطط الدوران (شكل ٥ـ١٩) وتحدد سرعة الدوران الفعلية w_0^2 . بالاعتماد على قيمة w_0^2 وكمية البخار المتشكل يحدد مضاعف الدوران وتدقق كافة مؤشرات الدوران المتبقية .



الشكل (٥ـ١٩) : مخطط الدوران في الاطار البسيط ،
w_0^2 ـ سرعة الدوران الفعلية .

اطـــــار الدوران المعقد

حسب التسلسل الوارد بالنسبة للاطار البسيط تنشأ منحنيات الضواغط المفيدة 1 ، 2 ، 3 ، 4 لكل صف من الاطار المعقد (الشكل ٥-٢٠) ، ولانشاء المميز الاجمالي AB للاطار يستفـــاد من كون الصفوف المذكورة تعمل على التوازي بفوارق ضغوط واحدة ، ولهذا السبب تجمع تصاريف المياه الموافقة لقيم الضاغط المفيد المتماثلة العائدة لهذه الصفوف ، على المخطط ذاته ينشأ منحني القسم OD الهابط من الاطار الدوراني والمشترك بالنسبة لكافة الانابيب الصاعدة . وبتقاطع المنحنيين السابقين تحدد النقطـــة العاملة لمخطط الدوران . وبالاعتماد على احداثيات نقطة التقاطع يمكننا ايجاد تصريف الماء الاجمالي والضاغط المفيد ، ويمكن ايجاد تصاريف الماء خلال الصفوف بتقاطع الخط الافقي المار من خلال النقطة العاملة للمخطط مع منحنيات الضاغط المفيد لكل من هذه الصفوف .



الشكل (٥-٢٠) : مخطط الدوران في الاطار المعقد .

الخطوة التالية بعد تحديد تصريف الماء وكمية البخار الناتجةهي ايجاد القيم الفعلية لكل من ω_o و k و ω_{des} ومضاعف الدوران العام .

وثوقية انظمة الدوران

يجري حساب الاطار الدوراني من شروط العمل الوسطية (الحسابية). عمليا تطبق هذه الشروط فقط على اغلبية الانابيب العاملة على التوازي ، بينما تعمل بعض الانابيب في شروط الانتقال الحراري الرديء ، مما يغير انظمة عملها بشكل كبير . وقد يؤدي ذلك الى وقوعها في نظام عمل خطير ، ومن الاسباب المؤدية الى ذلك : الطبقة الترسبية الداخلية ، الاكسدة القلوية،وتؤدي هذه الاسباب الى الانظمة الخطرة التالية :

١ـ توقف الدوران

وعند ذلك تصل سرعة الدوران الى الصفر تقريبا،ويملأ البخار جزءا ضئيلا من مقطع الانبوب ، ويطفو فوق الماء الذي يتحرك ببطء شديد ، ويحدث ذلك في الاماكن المناسبة من الانبوب (الوصلات الالتحامية ، الالتفافات) ،وذلك بالنسبة للانابيب ضعيفة التسخين وفي الاطر الدورانية التي يخرج فيها البخار الى الحيز المائي من الحلة .

٢ـ المستوى الحر

ويحدث في حالة توريد المزيج البخاري المائي الى الفراغ البخاري في الحلة ، يمكن ظهور مستوى الماء الحر في الجزء العلوي من انابيب توليد البخار ضعيفة التسخين وفوق هذا المستوى يتحرك

البخار الذي يملأ كل المقطع ببطء ويؤدي ذلك الى رداءة الانتقال الحراري والى تشكيل الترسبات الملحية في منطقة المقطع الفاصل بين الماء والبخار .

٣- انعكاس الدوران

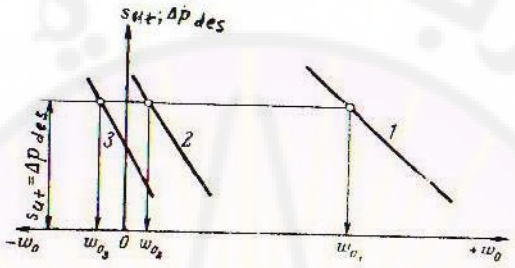
ويحدث في انابيب توليد البخار ضعيفة التسخين حيث تنقلب الحركة الصعودية الى هبوطية ، ويمكن للبخار حينئذ ان يتحرك صعودا او هبوطا تبعا لسرعة الماء وقوى الرفع ، ويمكن لفقاعات البخار ان تتحد في تشكيلات كبيرة تشغل كل مقطع الانبوب ، مما يؤدي الى انخفاض الانتقال الحراري وزيادة تسخين الانابيب ، وفي حالات سرعة الدوران الصغيرة جدا (اقل من $\mp$ 0,1 m/sec) يصبح الجريان غير مستقر صعودا وهبوطا . يحدث انعكاس الدوران في انابيب توليد البخار الموصلة الى الجزء السائل من الحلة .

تحدث مختلف الانظمة الجريانية الخطرة السابقة في انابيب التوليد ضعيفة التسخين والتي يمر فيها قليل من الماء وبذا تكون سرعة الدوران صغيرة او حتى سلبية (الشكل ٥-٢١) ، بينما يجري في الانابيب جيدة التسخين كثير من المياه وتكون السرعات فيها كبيرة w_0 (نفس الشكل) .

٤- تطبق جريان المزيج البخاري المائي

ويظهر في الانابيب الافقية او في الانابيب ضعيفة الميل عند سرعات الدوران الصغيرة ، ومع ازدياد كل من التسخين واقطار الانابيب تزداد اخطار التطبق ، ولدرء هذه الاحتمالات يتوجب تأمين

السرعة الكتلية الكافية (انظر الشكل ٣-١٠) وتتأكد وثوقية الاطار الدوراني بالغاء الانابيب الافقية وضعيفة الميل .



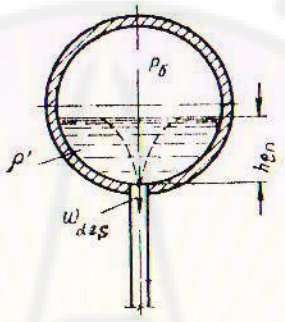
الشكل (٥-٢١) : تأثير عدم التجانس في تسخين انابيب البخر المتوازية على سرعة الدوران واتجاه الحركة .
١- S_{ut} للانابيب شديدة التسخين ، ٢- S_{ut} للانابيب ضعيفة التسخين ، ٣- S_{ut} للانابيب الاضعف تسخينا .

٥- تشكل البخار في الانابيب الهابطة

يحدث تشكل البخار في الانابيب الهبوطية لاسباب معينة منها هبوط الضغط او سحب البخار الى الانبوب الهابط ويتسبب البخار النازل عبر الانابيب الهبوطية في امتلاء الانابيب الصعودية بدءً بعد وصوله اليها ، مما يغير بشكل كبير نظامها الحراري .

يصل البخار الى الانابيب الهبوطية من الحجم البخاري او الحجم المائي للحلة ، في الحالة الاولى يتشكل البخار بسبب هبوط الضغط

عند مدخل الانابيب الهبوطية وتتشكل حينئذ دوامة (قمعية) الشكل ٥-٢٢) تساعد في تمرير البخار من الوسط البخاري مباشرة الى الانابيب الهابطة .



الشكل (٥-٢٢) : القمع الدوامي في الحيز المائي من الحلة والارتفاع اللازم لمنع تشكله .

ولمنع مثل هذا الاحتمال يرفع مستوى المياه في الحلة فوق مدخل الانابيب بمقدار يعطى بالعلاقة التالية :

$$h_{en} = 0{,}65 \cdot d_{des} \cdot \left(\frac{w_{des}}{w_c}\right)^{0{,}5} \quad , \; m \quad , \; (32-5)$$

حيث ان :

d_{des} – القطر الداخلي للانابيب الهابطة ، m ،

w_{des} – سرعة دخول الماء في الانابيب الهابطة ، m/sec ،

w_c – سرعة جريان الماء في الحلة ، m/sec .

من العلاقة (5 - 32) نرى انه عند تصميم الاطار الدوراني يتوجب تخفيض W_{des} قدر الامكان ووضع الانابيب الهبوطية في اجزاء الحلة السفلي .

في الاستثمار يتوجب المحافظة على مستوى الماء في الحلة ضمن الحدود المقررة ، لان تجاوزها قد يؤدي الى تشكل نظام التخرب في الانابيب الهابطة .

الفصـــــــــل الســـادس

تصميـــــم سطوح التســـخيـــــن

تمهيد :

تتغير كميات الحـــــــــرارة اللازمة لتسخين الماء وتوليد البخار (حرارة البخر) وتحميصه تبعا لضغط البخار المطلوب ،وعلى ذلك تتغير كميات الحرارة المكتسبة في مختلف سطوح التسخين تبعا لهذا الضغط ، ومن جهة اخرى تؤثر درجة حرارة مياه التغذية تأثيرا مباشرا على التقسيم الحراري بين سطوح التسخين والجدول ٦-١ يبين بعض الامثلة العملية على ذلك .

الجـــــــــدول ٦-١

ضغط البخار المحمص bar	درجة حرارة البخار المحمص °c	درجة حرارة مياه التغذية °c	التوزيع الحراري بين سطوح التسخين %	
			سطوح البخر	المحمص	الموفر
40	440	145	62	19	19
100	540	215	49	30	21
140	570	230	39	36	25
255	585	230	—	58	42

يكون الموفر في مولدات البخار ذات الضغط المتوسط غليانيا والسبب في ذلك هو عدم تمكن انابيب المعاكس من اكتساب كل الطاقة الحرارية اللازمة للبخر (الجدول ٦-١) . في مولدات البخار عالية الضغط ذات الحلة تنخفض الطاقة الحرارية البخرية (بسبب ارتفاع الضغط)، وتصبح كمية الحرارة المكتسبة في الموقد كافية لتوليد البخار ، ولهذا السبب لا يتطلب من الموفر العمل في شروط الغليان .

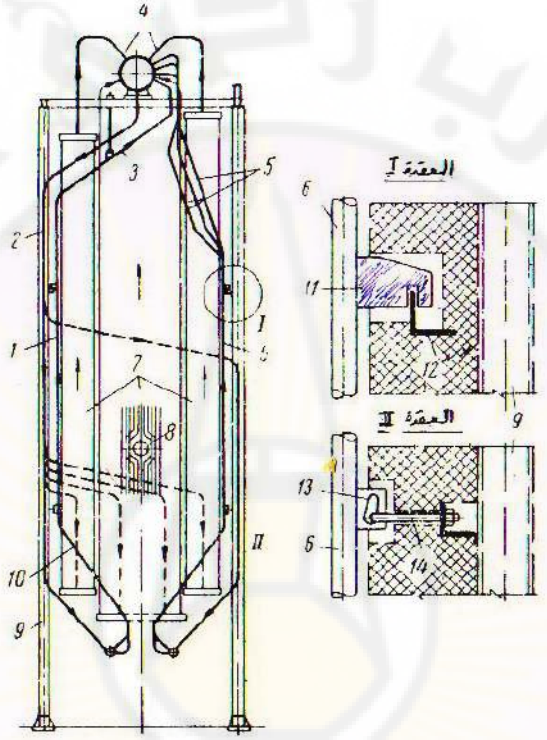
٦-١ تصميم سطوح التسخين البخرية

١- مولدات البخار ذات الدوران الطبيعي

تلعب عواكس الموقد دور سطوح التسخين الاساسية التي تقوم بوظيفة توليد البخار .

على الشكل ٦-١ يبين التوضع التقريبي لعواكس الموقد التي تستند الى جدران الموقد في مولد بخار متوسط الضغط ، تشكل العواكس 1 ، 6 ، 7 ، جملة انابيب شاقولية مرتبطة على التوازي ، وهناك اجزاء تكون فيها الانابيب مائلة بتأثير شكل الموقد (الوضعيات 5 ، 10 ، 3 ، 8) او لاسباب مختلفة. في مولدات البخار ذات الضغط العالي تزيد الطاقة الحرارية الاشعاعية المنطلقة في الموقد عن الكمية اللازمة للبخر ، ولهذا السبب تتحرر جدران الموقد قليلا ، ويصبح بالامكان اضافة سطوح تسخين اخرى ، وتوضع سطوح البخر على الجدران الشاقولية ، اما السقف المائل فسيتبدل بسطح افقي ،ويتوضع عليه المحمص (الوضعية 4 على الشكل ٦-٢) .

تغطى جدران الموقد بالعواكس التي تنفذ من انابيب ملساء اقطارها الداخلية 50 ، 70 mm ، اما اقطار الانابيب الهابطة فتؤخذ حوالي 60 - 130 mm ، وتؤخذ مساحة مقاطعها مساوية 0,3 ÷ 0,5 من المساحة الاجمالية لمقاطع الانابيب الصاعدة



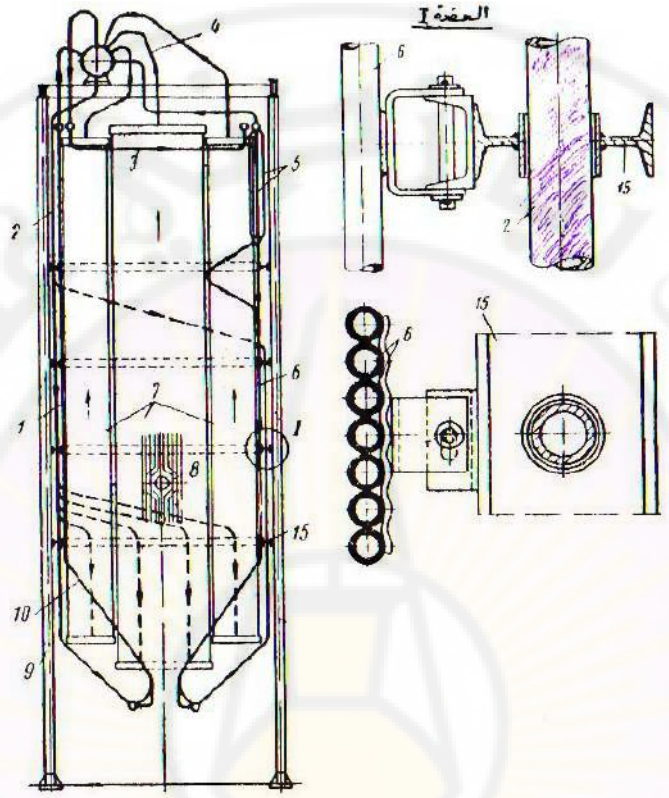
الشكل (٦-١): مخطط توضع عواكس مولد بخار متوسط الضغط.
١- المعاكس الجبهي ، ٢- الانابيب الهابطة ، ٣- الانابيب السقفية ، ٤- انابيب التوصيل ، ٥- الفيستون ، ٦- المعاكس الخلفي ، ٧- العواكس الجانبية ، ٨- تباعد الانابيب عند الفتحات ، ٩- الهيكل ، ١٠- القمع البارد ، ١١- الشص الاستنادي ، ١٢ - عارضة ، ١٣- الرعنفة ١٤- شص الشد .

وتدخل النهايات العلوية لانابيب العواكس مباشرة في الحلة (الوضعيات 3 ، 5 على الشكل ٦-١)، او من خلال انبوب مجمع (الوضعية 4 على الشكل ٦-٢) ، ويترك المجال للتمدد شاقوليا بالنسبة لكافة الانابيب المجمعة السفلية .

يستخدم لتصميم العواكس الاسلوب الوارد على الشكل ٦-١ ، حيث تتمدد الانابيب مع المعاكس بشكل مستقل عن الغطاء ، ويسمح العنصر العلوي (العقدة I) بتمدد جملة الانابيب نحو الاعلى بينما يتيح العنصر الثاني (العقدة II) ذى الكلابة لشبكة الانابيب المجال للتمدد نحو الاسفل .

في التصميم المبين على الشكل ٦-٢ تنفذ العواكس مسبقا في المصنع ، وتتوضع كافة انابيب التجميع العلوية في مستو واحد تقريبا ، وتعلق الى هيكل مولد البخار . تحاط العواكس 1 ؛ 6 ؛ 7 ، بأحزمة المتانة 15 المصنعة من الفولاذ البروفيلي وتتحرك العواكس مع الاحزمة شاقوليا ، ويتحرك الغلاف المرتبط بالعواكس بشكل مماثل . وعلى هذا الشكل يحمل هيكل المولد بجملة الانابيب بالاضافة الى الغلاف مع غطائه الخارجي ، على الشكل ٦-٢ يبين عنصر تثبيت العواكس والانابيب الهابطة مع احزمة المتانة المتحركة (العقدة I) ، وتتمكن جملة الانابيب بأكملها مع العواكس والغلاف من التمدد بحرية نحو الاسفل ، ويعوض تمدد انابيب توصيل البخار الى الحلة 4 بمساعدة الاجزاء المحنية منها .

في مولدات البخار ذات الاستطاعة الكبيرة توضع العواكس المزدوجة الاضاءة ، والتي تقسم المولد الى غرف منفصلة ،وتتيح العواكس المزدوجة الاضاءة تخفيض حجم غرفة المولد ، وتنفذ من انابيب



الشكل (٦-٢) مخطط توضع العواكس في مولد عالي الضغط.

نفس الرموز الواردة على الشكل ٦-١ ، ١٥- حرام المتانة .

ملساء وتعلق بشكل مماثل للعواكس الجدارية . وتحتوي على نوافذ للمحافظة على تساوي الضغط في غرف الموقد (الشكل ٦-٣)، ولزيادة متانتها تلحم الانابيب في نقاط محددة .

٢- مولدات الجريان المباشر

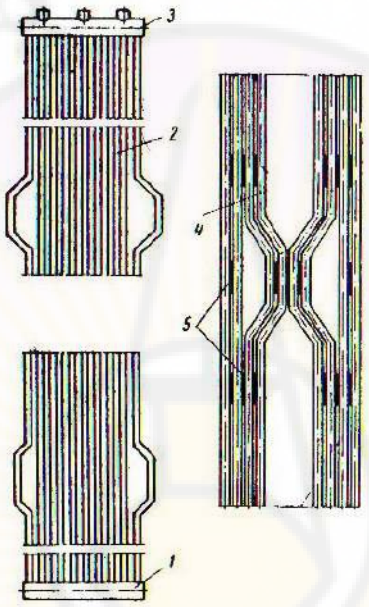
يشترط في سطوح البخر العائدة لمولدات الجريان المباشر دفع جسم التشغيل ضمن الانابيب بسرعات مناسبة تحول دون خرق الانظمة الهيدروليكية ، وتتخذ العواكس اوضاعا متنوعة في الفراغ ،فهناك العواكس الشاقولية والافقية والصاعدة الهابطة ، وسنتعرض هنا للعواكس الافقية فقط .

تستعمل في مولد البخار رامزين ، حيث تلف انابيب البخر ذات الاقطار 25 ÷ 40 mm على كافة جدران حجرة الموقد ، وبخطوة صاعدة نحو الاعلى ، وتستعمل مخططات عديدة للف ، وتوضع الانابيب ضمن شريط وبزاوية ميل لتأمين صعود الانابيب ، على الشكل ٦-٤ يبين مخطط لنشر عواكس الموقد ، حيث تغطى الجدران الجانبية بأنابيب مائلة ، بينما تغطى الجدران الباقية بأنابيب افقية ، ولتجنب انحناء الانابيب الافقية تثبت في ثلاثة نقاط ، في النقطة الوسطى يتحقق تثبيت كامل ، وفي الاطراف يؤخذ بعين الاعتبار ضرورة حركة الانابيب (الشكل ٦-٥) ، وتتمكن الانابيب من الحركة بالنسبة لبعضها البعض ، وترتبط انابيب البخر مع هيكل المولد .

٦-٢ تصميم المحمصات وتنظيم درجة حرارة التحميص

تقوم المحمصات بوظيفة رفع درجة حرارة البخار المولد فوق درجة الاشباع وحتى المستوى الحراري المطلوب ، وتعتبر من اكثر عناصر مولد البخار مسؤولية نظرا لارتفاع درجة حرارة البخار فيها. تنفذ محمصات الضغط المتوسط من الفولاذ الفحمي ، الذي يسمح

بوصول درجة الحرارة العاملة حتى 500 °C وتتوضع في الجزء الحملي من مسار الغازات ولذلك تدعى بالمحمصات الحملية .



الشكل (٦-٣) مجموعة المعاكس مزدوج الاضاءة .

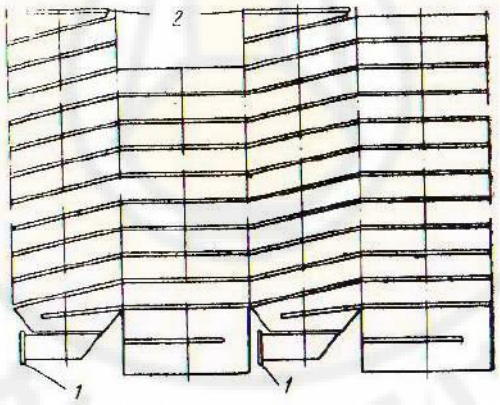
١- الحجرة السفلية ، ٢- انابيب المجموعة ، ٣- الحجرة العلوية ، ٤- النوافذ ، ٥- اماكن التحام الانابيب .

مع ارتفاع الضغط ترتفع كمية الحرارة التي يكتسبها المحمص ،وتصل عند الضغط 140 bar الى 45 ÷ 35 % من الحرارة الاجمالية وفي هذه الشروط يتوجب استخدام الغائص من الطاقة الاشعاعية ،

المنبعثة في الموقد لتحميص البخار . ولهذا تتضمن مولدات البخار ذات الضغط العالي ما يسمى بالمحمص الاشعاعي ، وعدا عن ذلك تستخدم المحمصات الستائرية النصف اشعاعية والتي تتوضع عادة بين المحمص الحملي ومثيله الاشعاعي .

من حيث الوظيفة يميز عادة بين المحمص الاولي ومكرر التحميص ، يقوم الاخير باعادة تحميص البخار المتمدد جزئيا في العنفة البخارية ويبرد المحمص الاولي في فترة الايقاد ببخار الماء المولد ، ولهذا يمكن ان يتوضع ضمن الموقد .

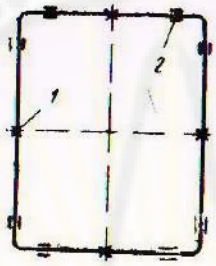
اما مكرر التحميص فيبرد بالبخار العائد من العنفة وفي فترة الايقاد لايمر البخار فيه الا بعد اقلاع العنفة .ولهذا السبب يتوضع مكرر التحميص في منطقة التسخين المعتدل .



الشكل (٦-٤) مخطط لنشر العواكس الموقدية في مولد رامزين .

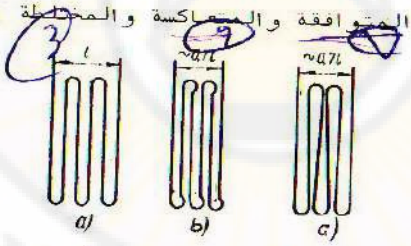
١- المجمعات الدخولية ، ٢- المجمعات الخروجية .

تنفذ المحمصات الحملية من الانابيب الفولاذية ذات الاقطـــــار 15 ÷ 40 mm ، وتشكل منحنيات ثعبانية يزيد نصف قطرها الخارجي عن ضعفي القطر الخارجي للانابيب $2\,d_{ext}$ ،وتلتحم نهايات الانابيب مع انبوبي الدخول والخروج الاسطوانيين وتأخذ انحناءات الانابيب اشكالا مختلفة (الشكل ٦-٦).



الشكل (٦-٥) : مخطط تثبيت العواكس ذات اللفة الافقية للانابيب،
١- تثبيت كامل ، ٢- تثبيت متحرك.

تبعا لاتجاهات حركة البخار ونواتج الاحتراق الغازية يمكن بيـــن انواع المحمصات المتوافقة والمتعاكسة والمختلطة (الشكل ٦-٧).

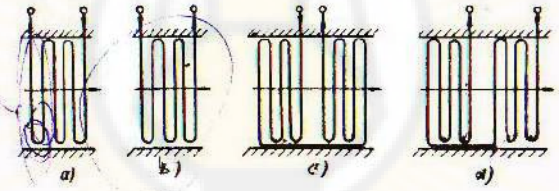


الشكل (٦-٦) اشكال الانابيب الافعوية المستخدمة في المحمصات الحملية . a - مستقيمة ، b ، c - مكثفة .

في النوع المتعاكس (الشكل ٦-٧ ، a) يحقق الضاغط الحراري الاعظمي بين نواتج الاحتراق والبخار وهذا مما يخفض من سطح التسخين ومن استهلاك المعدن ، وتتلخص عيوب هذا النوع في امكانية احتراق شنيات الانابيب الاخيرة (حسب حركة البخار) بسبب ارتفاع درجة الحرارة العاملة ، في المخطط المتوافق تتحسن شروط عمل المعدن وينخفض الضاغط الحراري . ويتميز النوع المختلط (الشكل ٦-٧ ، c ، d) بوثوقيته واعتدال تكاليفه .

يتوضع المحمص الحملي في الممر الافقي للغازات الذي يقع بين غرفة الموقد والمنجم الحملي .

تأخذ الانابيب المثنية الوضعية الشاقولية للسهولة في التثبيت والبساطة في التصميم وتعرقل هذه الوضعية تصريف المياه المتكاثفة من الانابيب في فترات الصيانة .

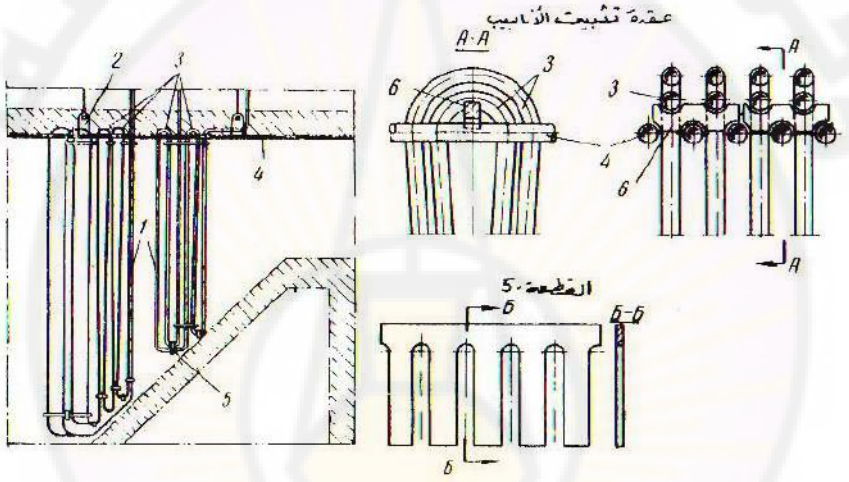


الشكل (٦-٧) مخططات الحركة النسبية للبخار مقابل حركة غازات الاحتراق في المحمصات .
a - جريان متعاكس ، b - جريان متوافق ،
c ، d - جريان مختلط.

تثبت الانابيب المثنية بالطريقة المناسبة لتوضعها في الفراغ والشكل ٦-٨ يبين احد اشكال التثبيت ، تثبت العقد العلوية من الانابيب

المثنية بالانابيب السقفية التي تعلق بدورها الى هيكل المولد بخطافات وقدد توصيل .

وتستند العقد العلوية من انابيب المحمص على الاسافين التي تستند بدورها على الانابيب السقفية ، وتحدد المسافة بين العقد السفلية للانابيب بمساعدة المشط (القطعة 5 على الشكل ٦-٨) .



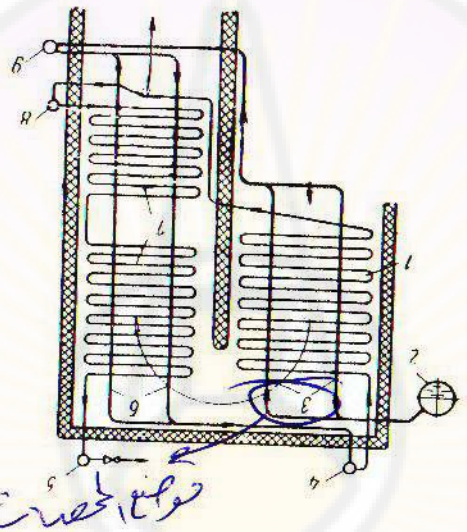
الشكل (٦-٨) تثبيت المحمص الحملي الشاقولي .

١- الانابيب الافقية ، ٢- القدد المعلقة ، ٣- الثنيات العلوية للانابيب ، ٤- الانابيب السقفية ، ٥- الامشاط المباعدة ، ٦- قطع استنادية .

تثبت المحمصات الافقية بالتعليق من اعلى بمساعدة انابيب يمرقيها الماء (الشكل ٦-٩) .

يتألف المحمص الستائري من انابيب متراصة ، متوضعة في مستو

واحد ، وتتصل نهاياتها مع انابيب التوزيع والتجميع • وتتوضع المحمصات الستائرية في الجزء العلوي من الموقد مع وجود مسافات فيما بينها (0,7 ÷ 1,0 m) وتأخذ الوضعية الافقية اوالشاقولية وتعلق الى انابيب التجميع والتوزيع (الشكل ٦-١٠) ويحافظ على المسافات بين الستائر بربط الانابيب البارزة بحلقات توصيل •



الشكل (٦-٩) تثبيت المحمص الحملي الافقي على الانابيب المعلقة •

١- مرحلة التحميص الاولى ، ٢- الحلة ، ٣و٦ - الانابيب المعلقة ٤و٨ - مجمعات وسطية ، ٥ - الحجرة الخروجية من المحمص ، ٧- مرحلة التحميص الثانية ، ٩- مجمع الانابيب المعلقة •

تتميز الستائر الشاقولية بانخفاض امكانية ترسب الخبث على سطوحها الخارجية ، مما يسمح باستخدامها في مولدات البخار العاملة على الوقود الغباري •

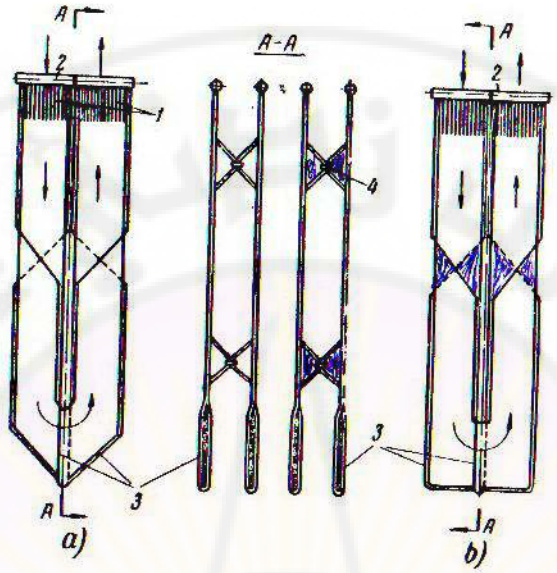
ويكمن العيب الاساسي للستائر ذات المجمعات العلوية في عدم امكانية تصريف المياه المتجمعة فيها خلال عملية الصيانة . ويؤدي وضع المجمعات في اسفل الستائر الى التخلص من هذا النقص .

يتعلق تأليف المحمص بمؤشرات البخار وبطريقة توضع سطوح التسخين البخرية . ينفذ محمص الضغط المتوسط ($P=40$ bar ، $t_{sc}=440$ °C) بحيث يعمل على الحمل ويتوضع عادة خلف الفيستون (الشكل ٦-١١، a) ويتعرض المحمص لترسيب الخبث على سطوحه الخارجية لسببي الارتفاع الشامل لدرجة الحرارة في الموقد وعدم التجانس الحراري العرضي .

يتألف المحمص في حالة المؤشرات $P=100$ bar ، $t_{sc}=540$ °C من جزئين حملي وستائري ويتوضع الجزء الستائري في الجزء العلوي من الموقد ، قبل الفيستون ، بينما يوضع الجزء الحملي فيما بعد في الجزء الافقي من مسار الغازات الحملي (الشكل ٦-١١، b) ، وتقوم الستائر بحماية المحمص الحملي من الخبث .

في حالة المؤشرات $P=140$ bar ، $t_{sc}=570$°C (الشكل ٦-١١ ، c) يحتوي المحمص على جزئين : المحمص الاولي ومكرر التحميص ولايختلف الجزء الاول عن النوع السابق ، ويقوم مكرر التحميص باعادة تحميص البخار بعد قيامه بعمله جزئيا في العنفة البخارية ، ويتوضع مكرر التحميص في المنجم الحملي ، في مكان تقل فيه درجة الحرارة عن 850 °C حيث لا ضرورة لتبريده في فترات الاقلاع .

تحتوي المحمصات ذات المؤشرات الاعلى على أجزاء اشعاعية ، وذلك نظرا لازدياد حصة الحرارة التحميصية مع ارتفاع المؤشرات (الشكل ٦-١١ . d) .



الشكل (٦-١٠) المحمصات الستائرية الشاقولية .

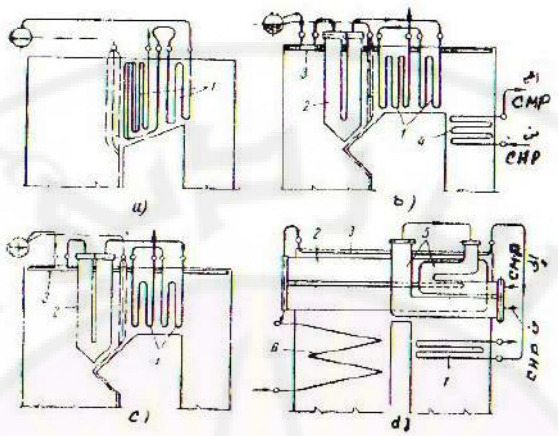
a - ذات الشنية الاسفينية ، b - ذات الشنية الافقية

١- انابيب الستائر ، ٢- الحجرات ، ٣- انابيب الربط ،

٤- حلقة الربط .

٦-٣. التحكم بدرجة حرارة البخار المحمص

يعرف المميز التحكمي للمحمصات بتابع درجة حرارة البخار المحمص بالنسبة لانتاجية المولد ، ويختلف هذا المميز تبعا لنوع المحمص ووظائف اقسامه ، والامر المميز بالنسبة للمحمص الاشعاعي هو انخفاض درجة حرارة البخار المحمص مع ازدياد الانتاجية (الشكل ٦-١٢) وتفسير هذا الامر هو ان الطاقة الحرارية الاشعاعية المكتسبة تزداد بسرعة اقل من ازدياد الانتاجية .



الشكل(٦-١١) مخططات المحمصات ،

t_{sc}= 540°C ، P=160 bar - b ، t_{sc}= 440 °C ، P=40 bar - a

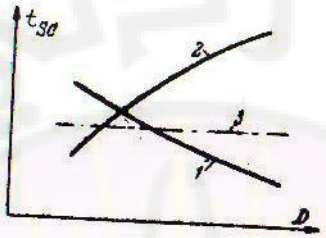
t_{sc}=565°C ، P=255 bar - d ، t_{sc}= 570 °C ، P= 140 bar - c

١- محمص حملي اولي ، ٢- محمص ستاثري (اولي)
٣- سقفي ، ٤- محمص حملي وسطي (مكرر تحميص) ٥-
ستاثري وسطي ، ٦- المعاكسات الموقدية .

في حالة المحمص الحملي تزداد كميات نواتج الاحتراق المارة خلاله بتناسب طردي تقريبا مع ازدياد الانتاجية ، حيث تزداد درجة حرارة الغازات المنطلقة من الموقد ، ويزداد بالتالي حجمها ، وهذا يؤدي بدوره الى ازدياد معامل الانتقال الحراري ، مما يزيد من درجة حرارة البخار المحمص .

يمكن التوصل الى تثبيت درجة حرارة البخار المحمص بتخصيص 60 % تقريبا من سطح المحمص لقسمه الاشعاعي ، اما السطح المتبقي فيعمل بالحمل ، وبذلك نحصل على مميز اجمالي ثابت مع تغير الانتاجية .

وقد يأخذ المميز طابعا حمليا ضعيفا في حالة تخفيض نسبة السطح الاشعاعي الى 40 ÷ 50 % (المنحني 3 ، الشكل ٦-١٢).



الشكل (٦-١٢) المميز التحكمي للمحمص.

١- الاشعاعي ، ٢- الحملي ، ٣- المركب.

العوامل الاستثمارية المؤثرة على درجة حرارة البخار

بالاضافة الى تأثير الانتاجية تتعلق درجة حرارة البخار المحمص بعوامل اخرى منها درجة حرارة مياه التغذية ، معامل فائض الهواء اتساخ المعاكس والمحمص نفسه بالخبث ، رطوبة الوقود .

تتثبت وظائف سطوح التسخين في مولدات البخار ذات الحلة ، حيث تعتبر الحلة نفسها حدا فاصلا بين مختلف السطوح ،فالحلة تفصل ما بين الموفر وانابيب المعاكس ، كما وتفصل ما بين انابيب المعاكس وبين المحمص،في مولدات البخار ذات الجريان المباشر تتعرض وظائف سطوح التسخين للانزلاق نتيجة لعدم وجود الحلة .

يمكن تلافي تأثير انخفاض درجة حرارة مياه التغذية عن طريق زيادة تصريف الوقود لمتابعة تسخين الماء في المعاكس وترتفع درجة حرارة البخار المحمص في نفس الوقت نتيجة لتمرير كمية اكبر

من الغازات على المحمص .

في مولدات الجريان المباشر تحدث الصورة المعاكسة ، حيث يؤدي انخفاض درجة حرارة مياه التغذية الى انخفاض درجة حرارة البخار المحمص .

يحدث ازدياد معامل فائض الهواء وارتفاع رطوبة الوقود واتساخ سطوح التسخين بالخبث تأثيرات نوعية مماثلة لانخفاض درجة حرارة مياه التغذية .

طرق التحكم بحرارة البخار المحمص

١- التحكم البخاري

يستخدم التحكم البخاري حسب احدى الطريقتين التاليتين :

١- بمساعدة مبادلات حرارية سطحية بخارية - بخارية .

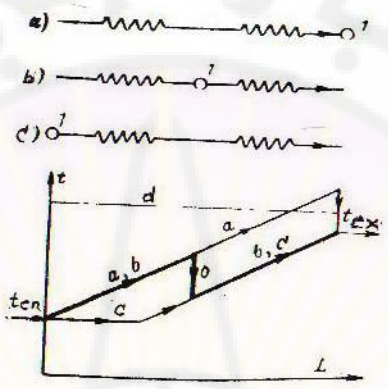
٢- في مبردات البخار الحقنية .

في كلا الحالتين توضع سطوح احتياطية تزيد من تحميص البخار ثم تزال زيادة التحميص بالطرق المذكورة .

تستخدم طرق اخرى للبخار الذي يكرر تحميصه مثل التبريد في المبادلات البخارية -البخارية والبخارية-الغازية او بتجاوز سطح المحمص الاحتياطي ، ولايجوز استخدام مبردات البخار الحقنية لعدم اقتصاديتها في حالة تكرار التحميص .

يوضع مبرد البخار بعد المحمص او في وسطه او قبله (الشكل ٦-١٣) وفي الحالتين الاخيرتين تؤمن الحماية الكافية لمعدن المحمص وللعنفة البخارية ، كما ويتميز المخطط الاوسط بانخفاض العطالة

وبالمرونة حيث ينخفض فيه طريق البخار الواقع بعد المبرد ، يؤدي استخدام المخطط الاول (الشكل ٦-١٣ ، a) الى رفع درجة حرارة معدن المحمص فوق الحدود المسموح بها .



الشكل (٦-١٣) تغير درجة حرارة البخار المحمص في مختلف مخططات توضع مبرد البخار .

a ـ خلف المحمص ، b ـ في الوسط ، c ـ قبل المحمص،

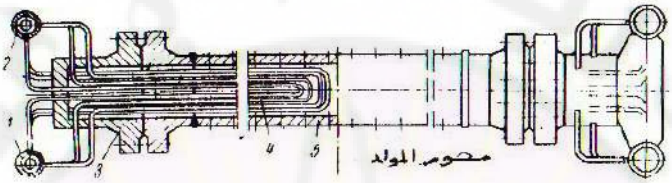
d ـ الحرارة المسموح بها ، ا ـ مبرد البخار .

٦ـ مبرد البخار السطحي

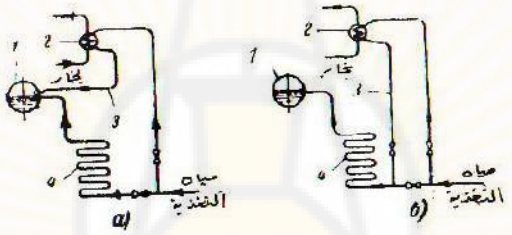
وهو عبارة عن مبادل حراري يحتوى على انابيب على شكل حرف U تمر مياه التغذية المبردة من خلالها ، ويلامس البخار سطوحها الخارجية توضع الانابيب ضمن الغلاف الخارجي الذي يمر منه البخار في مجموعتين متناظرتين (الشكل ٦-١٤)،

يوصل مبرد البخار السطحي على التوازي او على التسلسل مع الموفر (شكل ٦-١٥، a ، b) ، ويستخدم المخطط الثاني بكثرة في

التصميمات الحديثة ،ويتميز عن سابقه بفعاليته الاقتصادية الاكبر ، حيث تستخدم الطاقة الحرارية لنواتج الاحتراق في منطقة الموفر بشكل افضل ويحمل هذا الامر اهمية اكبر في حالات الانتاجية الاعظمية .



الشكل (٦-١٤) مبرد البخار السطحي.



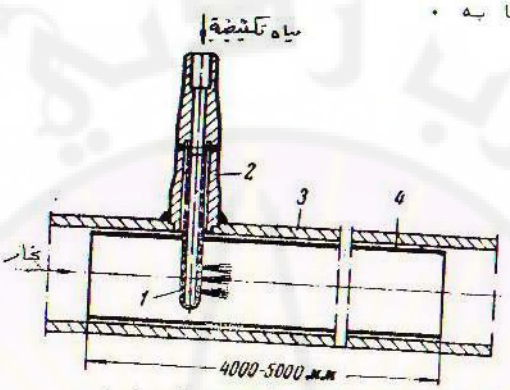
الشكل (٦-١٥) مخطط توصيل مبرد البخار السطحي مع الموفر.

a - على التوازي ، b - على التسلسل ، ١- الحلة ،
٢ - مبرد البخار ، ٣- طرح المياه بعد المبرد ، ٤- الموفر.

ب - مبرد البخار الحقني

ويعتمد على قذف الماء المردد في وسط البخار المحمص (شكل ٦-١٦) ويتألف المبرد من انبوب يمر فيه البخار وترد اليه المياه التكثيفية عالية النقاوة عبر رذاذ خاص يحتوي على ثقوب عديدة 1

يقوم القميص الداخلي 4 بوظيفة حماية الانبوب الخارجي 3 من تيارات الماء البارد الممكنة والتي تنهك معدن الانبوب الخارجي في حالة اصطدامها به .

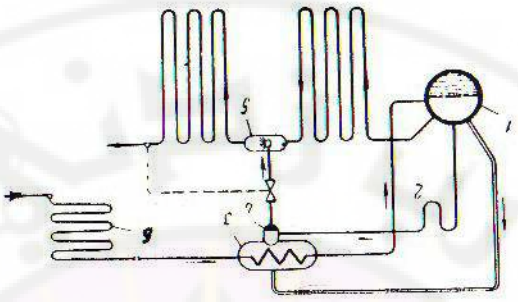


الشكل (٦-١٦) المبرد الترذيذي .

الشكل (٦-١٧) يتضمن مثالا على توصيل مبرد البخار الحقني 5 الذي يحتوي على مكثف خاص 3 ، تلعب فيه مياه التغذية الاتية من الموفر دور جسم التبريد ، يتكاثف البخار الخارج من الحلة ويتجمع في الحوض 4 ، ثم يرد الماء المتكاثف الى المبرد الحقني ، يسيل الماء المتكاثف الفائض الى الحلة 1 عبر السيفون 2 .

يشترط من المياه التبريدية للمبرد تحقيق مواصفات عالية من ناحية النقاوة ، ويزداد هذا الشرط تشددا في حالة مولدات الجريان المباشر .

عمليا يحتوي مسار البخار المحمص على عدة مبردات ترفع من دقة التحكم بدرجة الحرارة وتخفف من شروط عمل معدن المبرد الحقني



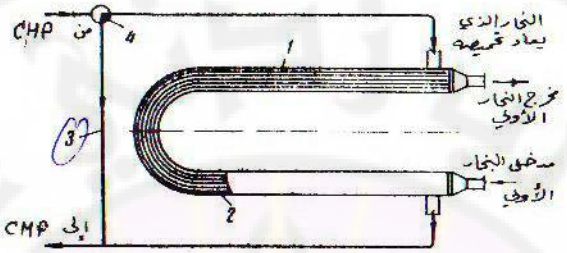
الشكل(٦-١٧) مخطط التحكم بالتحميص بمساعدة المياه التكثيفية الذاتية .

ج- المبادل الحراري البخاري - البخاري

ويلعب فيه البخار الاتي من قسم الضغط العالي للعنفة البخارية دور جسم التبريد ، يستخدم المبادل الحراري البخاري - البخاري عندما يكون محمص البخار الاولي اشعاعيا ومكرر التحميص حمليا ، وفي هذه الحالة عند تخفيف الحمولة تزداد درجة حرارة البخار الاولي وتنخفض درجة حرارة البخار الذي يعاد تحميصه (الشكل ٦-١٢) .

يتألف المبادل الحراري البخاري - البخاري من جملة انابيب 1 تمر ضمن انبوب مجمع كبير 2 (الشكل ٦-١٨) ،وتأخذ جملة الانابيب شكل حرف U لتمكينها من التمدد ويمر البخار الاولي ضمن جملة الانابيب بينما يمر البخار الاتي من قسم الضغط العالي للعنفة ضمن المجمع ويجري التحكم بدرجة حرارة البخار الثانوي بأن يتجاوز قسم منه المبادل الحراري عبر الانبوب 3 ويقوم الصمام

التحكمي 4 بتمرير كمية البخار المناسبة عبر المبادل .



الشكل(٦-١٨) المبادل الحراري البخاري- البخاري .

CHP- اسطوانة الضغط العالي من العنفة،
CMP- اسطوانة الضغط المتوسط من العنفة.

التحكم الغازي

ويجري بمساعدة طرق متعددة منها تدوير نواتج الاحتراق الغازية واستخدام الحراقات الموجهة ، واستبدال تشغيل طبقات الحراقات ، ويستخدم التحكم الغازي لتحديد درجة حرارة البخار المكرر تحميصه ويترافق مع ضياعات حرارية إضافية مع غازات الاحتراق وببذل طاقة اضافية لتدوير الغازات .

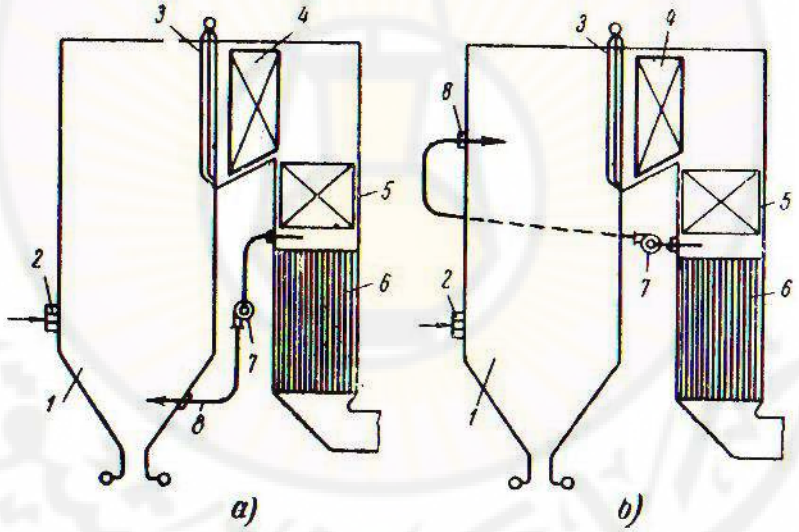
بسبب انخفاض كفاءة التحكم الغازي في المولدات الحديثة يستخدم الى جانب التحكم البخاري .

تدوير نواتج الاحتراق

تدفع نواتج الاحتراق الغازية من نقطة واقعة في المنجم الحملي بدرجة حرارة 300 ÷ 350 °C (عادة خلف الموفر) الى غرفة الموقد،

ويتم ذلك بمساعدة مروحة امتصاص .

يؤدي دفع الغازات الى الجزء السفلي من الموقد (الشكل ٦-١٩،a) الى اضعاف نقل الحرارة المباشر في الموقد ، ومن ثم الى رفع درجة حرارة نواتج الاحتراق في مخرج الموقد ، كما ويؤدي التدوير الى زيادة كميات نواتج الاحتراق الملامسة للمحمص . وبالنتيجة يزداد الانتقال الحراري الحملي في المحمص ، تجري تقوية تدوير الغازات في حالة الحمولات الجزئية لمولد البخار حيث تنخفض حرارة البخار المحمص وبالعكس يخفف التدوير في حالات الحمولة الاعظمية حيث يزداد التحميص



الشكل(٦-١٩) تنظيم درجة حرارة البخار بتدوير نواتج الاحتراق . a - رمي الغازات الى اسفل الموقد ، b - الى اعلى الموقد ، ١- الموقد ، ٢- الحراق ، ٣- الفيستون ٤- المحمص ، ٥- الموفر ، ٦- مسخن الهواء ، ٧- مروحة تدوير الغازات ، ٨- امداد الغازات المبردة .

يترتب على دفع الغازات الى الجزء العلوي من الموقد (الشكل ٦-١٩، b) انخفاض درجة حرارة نواتج الاحتراق في منطقة المحمص ، بينما لايتأثر عمل الموقد بذلك ، وبالنتيجة تنخفض درجة حرارة البخار المحمص .

تعتري اسلوب التحكم بتدوير الغازات عيوب عديدة منها وجوب وضع منشآت اضافية وانخفاض مردود المولد والحاجة الى بذل طاقة اضافية لعمل المروحة .

٣- انحراقات الموجهـــــة

وتسمح بتغيير نسبة الطاقة الحرارية المكتسبة اشعاعيا في سطوح المعاكس ، فعندما يوجه الجريان بزاوية صغيرة نحو الاسفل ،تزداد نسبة الحرارة المكتسبة اشعاعيا ، وتنخفض درجة حرارة نواتج الاحتراق الخارجة من الموقد . ولهذا السبب في حالة الحمولة الكبيرة على المولد ،وعندما يزداد تحميص البخار تدور الحراقات حول محاورها باتجاه الاسفل .

تلعب نوعية الوقود المستخدم دورا اساسيا في اختيار اسلوب التحكم بدرجة حرارة البخار المحمص فاستخدام الحراقات الموجهة في حالة الوقود غزير الخبث يؤدي الى ترسب الاخير على القمع البارد في اسفل الموقد والى زيادة الضياعات الحرارية الفيزيائية للخبث . كما تظهر امكانية ترسب الخبث على سطوح البخر العلوية في حالـــة توجيهه نحو الاعلى .

٦-٤ سطوح التسخين ذات الحرارة المنخفضة

نشأ تقسيم سطوح التسخين الى ذات الحرارة العالية والمنخفضة كنتيجة للاختلاف الاساسي في شروط عملها ، حيث تتعرض سطوح التسخين ذات الحرارة المنخفضة (الموفرات ، مسخنات الهواء) لظواهر معينة مثل الاكسدة المنخفضة الحرارة والاهتراء الجلخي .

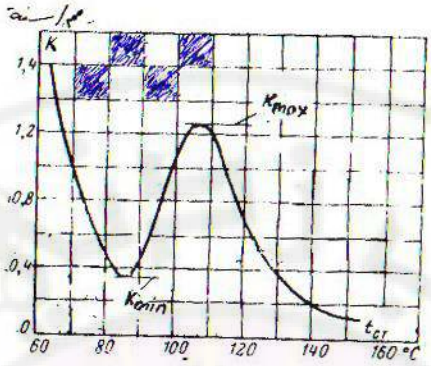
آ- تأثير الاكسدة المنخفضة الحرارة

تتكاثف ابخرة الماء الموجودة ضمن نواتج الاحتراق الغازية عند هبوط درجة الحرارة الاخيرة الى مادون نقطة الندى ، وفي حالة احتواء نواتج الاحتراق على غاز بلا ماء حمض الكبريت SO_3 تكتمل الشروط اللازمة لتشكيل حمض الكبريت ، تقع نقطة الندى في المجال الحراري $110 \div 150\ ^\circ C$ ، ويؤدي تكاثف ابخرة حمض الكبريت على سطوح التسخين الى اكسدة معدنها وخرابها خلال فترة قصيرة .

تتعلق سرعة الاكسدة بدرجة حرارة المعدن المتأكسد ،الشكل ٦-٢٠ يعطينا مثالا على تابع سرعة الاكسدة في السنة بالنسبة لدرجة حرارة المعدن ، والملاحظ ان سرعة الاكسدة (عند استخدام وقود المازوت) تكون اعظمية عند اقتراب درجة حرارة المعدن من نقطة الندى t_r وعند $t_m < t_r$ تهبط سرعة الاكسدة الى قيمتها الدنيا (K_{min})

ب - الاهتراء الجلخي

تنقذف جزيئات الرماد والوقود المحمولة مع غازات الاحتراق بسرعة كبيرة على انابيب سطح التسخين مما يؤدي الى اهتراء السطح الخارجي للانابيب ، ويقلل من سماكتها .



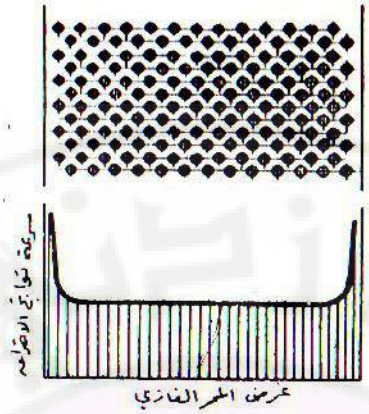
الشكل(٦-٢٠) تأثيردرجة حرارة التسخين علىسرعة الاكسدة K .

يحدث الاهتراء الجلخي بشكل غير متجانس ضمن مقطع المجرى ،وتتعلق كميته بالسرعة وبالتركيز الموضعي لجزيئات الرماد والوقود الضخمة ، وتأخذ سرعة الجزيئات قيمتها الاعظمية في اطراف المجرى (الشكل ٦-٢١) ، اما قيمة التركيز الموضعي للجزيئات الضخمة فتتعلق بالشروط الايروديناميكية الموضعية ، الشكل ٦-٢٢ يبين تركيز الجزيئات الضخمة خلف الغرفة الانتقالية .

اختيار مخطط مسخن الهواء والموفر

يستهدف تصميم سطوح التسخين المنخفضة الحرارة تأمين التبادل الحراري الاعظمي في شروط الاستهلاك الاصغري للمعدن وضمن حجوم مقبولة ، وتصمم سطوح التسخين المنخفض الحرارة حسب المخطط احادي او ثنائي المراحل .

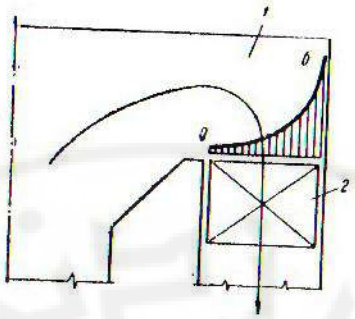
في المخطط ذي المرحلة الواحدة يتوضع مسخن الهواء والموفر على



الشكل(٦-٢١) توزع سرعة نواتج الاحتراق في عرض الممر الغازي .

التتالي عكس مسارات غاز الاحتراق (الشكل ٦-٢٣، a) وتتحدد درجة حرارة الهواء المسخن بـ 250 ÷ 350 °C ، أما سبب التحديد هذا فيعود الى ان ابخرة الماء الموجودة في غازات الاحتراق تبطئ من هبوط درجة حرارة الاخيرة ، بينما يتسخن الهواء بسرعة اكبر نظرا لصغر سعته الحرارية بالمقارنة مع السعة الحرارية لغازات الاحتراق المحتوية على ابخرة الماء ، من الشكل ٦-٢٣ يتضح ان الضاغط الحراري الواقع بين الهواء وغازات الاحتراق يتناقص ويصل الى قيمته الصغرى مع استمرار حركة الهواء المعاكسة لحركة الغازات نحو مخرج المسخن ، بالنسبة للموفر يلاحظ المخطط المعاكس ويحافظ عند التصميم على قيمة للضاغط الحراري الاصغري في مسخن الهواء لاتقل عن 50 ÷ 70 °C .

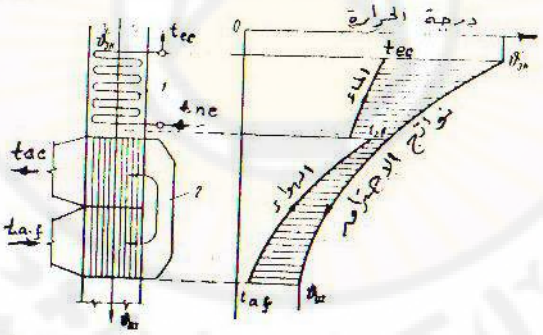
لزيادة فعالية الاحتراق وتخفيض الضياعات الحرارية الكيميائية يفضل لانواع معينة من الوقود رفع درجة حرارة الهواء الى قيم عالية 350 ÷ 450 °C ، ولايتحقق هذا الا باستخدام مخطط التسخين



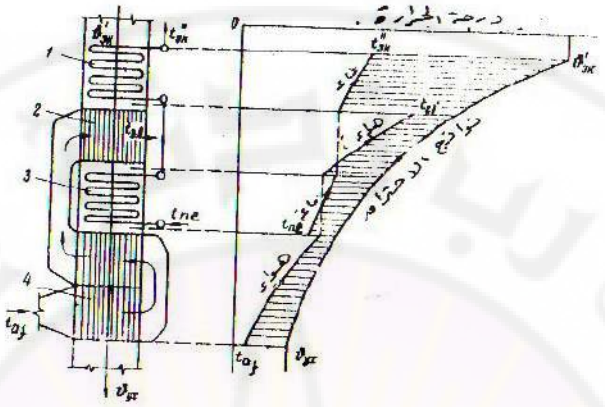
الشكل(٦-٢٢) توزع مجموعات جزيئات الرماد حسب ضخامة حجمها خلف حجرة الالتفاف .

١- حجرة الالتفاف ، ٢- سطح التسخين الحملي.

ثنائي المراحل (الشكل ٦-٢٤) ، الذي يتوضع فيه الموفر بين مرحلتي تسخين الهواء ، والامر المميز في المخطط هو زيادة الضاغط الحراري في الطرف الساخن من مسخن الهواء ، حيث تنقل المرحلة الثانية منه الى منطقة ذات حرارة اعلى . وتوضع مرحلة الموفر الثانية او المنطقة الانتقالية في مولدات الجريان المباشر لحماية معدن المرحلة الثانية لمسخن الهواء من درجات الحرارة العالية .



الشكل(٦-٢٣) توزع الجريانات الحرارية في حالة المخطط احادي المراحل للسطوح منخفضة الحرارة . ١- الموفر ، ٢- مسخن الهواء.



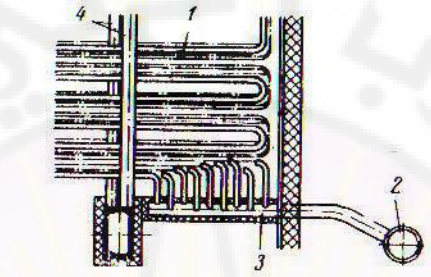
الشكل(٦-٢٤) توزع الجريانات الحرارية في المخطط ثنائي المراحل لسطوح التسخين منخفضة الحرارة . ١و٣ - مراحل الموفر الثانية والاولى، ٢و٤- مراحل مسخن الهواء الثانية والاولى.

تصميم الموفرات

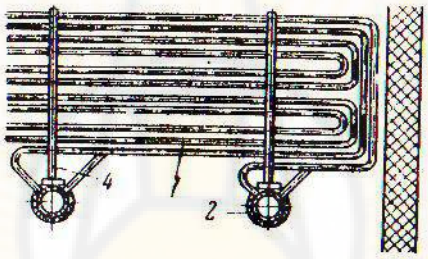
تستخدم الانابيب الفولاذية الافعوية الافقية بكثرة في تصميم الموفرات ،وتستعمل لكافة الضغوط . تستخدم الموفرات المصنعة من حديد الصب في حالات استخدام المياه قليلة النقاوة من الغازات . يتميز حديد الصب بمقاومته للاكسدة ويعمل عند درجات الحرارة الواقعة دون نقطة الندى ..

تتألف الموفرات الفولاذية من انابيب اقطارها الداخلية صغيرة (16 ÷ 30 mm) سماكتها 2,5 ÷ 3,5 mm ؛ وتتصل هذه الانابيب في نهاياتها مع المجمعين الدخولي والخروجي ، الواقعين خارج الوسط الغازي . وللتخفيف من تسرب الهواء لداخل المولد تتجمع

الانابيب في عدد من الانابيب الاخرى الموحدة (الشكل ٦–٢٥ ، a) ، التي تتصل بدورها مع الانبوب المجمع الاساسي ، في حالات اخرى توضع المجمعات ضمن القنال الغازي حاملة الموفر بآن واحد (الشكل ٦–٢٥ ، b)



a)



b)

الشكل (٦–٢٥) طرق توصيل الانابيب الحلزونية للموفر .

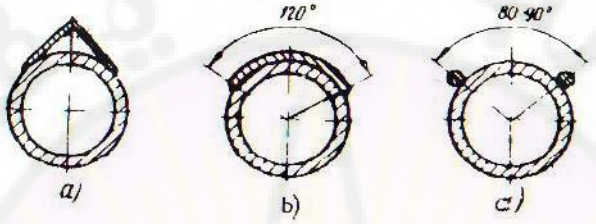
a – من خلال انابيب تجميعية وسطية ؛

b – بوضع المجمع ضمن ممر الغازات ،

١ – الانابيب الحلزونية ، ٢ – المجمع ، ٣ – انابيب التجميع الوسطية ، ٤ – التصميم الحامل للانابيب .

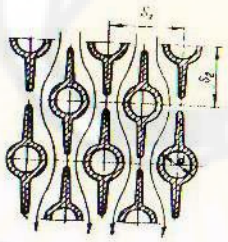
تتصل الانابيب مع المجمعين بالالتحام ، ويفضل توضعها حسب الترتيب الشطرنجي نظرا لافضليته تجاه الترتيب الكوريدوري الذي يتطلب معدنا اكثر وحجما اكبر.

لحماية الانابيب من الاهتراء الجلخي تغطى بالزوايا او بالقطاعات الانبوبية او بالقضبان وذلك في مواضع الاهتراء المحتمل(الشكل٦-٢٦،أ ، ب ، ج) .



الشكل (٦-٢٦) طرق حماية سطح التسخين الحملي من الاهتراء الجلخي في حالة الجريان المعامد لمحاور الانابيب .

في السنوات الاخيرة انتشرت تصميمات الموفرات ذات الانابيب المجنحة التي تزيد من سطوح التبادل الحراري (الشكل ٦-٢٧) .



الشكل (٦-٢٧) سطوح التسخين ذات الانابيب المجنحة .

تصميم مسخنات الهواء

من حيث طريقة عملها تقسم الى نوعين هما : المسخنات الفاصلة

والمسخنات الاسترجاعية ،في النوع الاول يمر وسطا التبادل الحراري اى الهواء وغازات الاحتراق عبر ممرات منفصلة؛وفي النوع الثاني يلامس الهواء وغازات الاحتراق على التناوب نفس السطوح التي تختزن الطاقة الحرارية عند مرور الغازات ، ثم تقدمها للهواء عند مروره خلالهـــا .

١- المسخنات الفاصلة

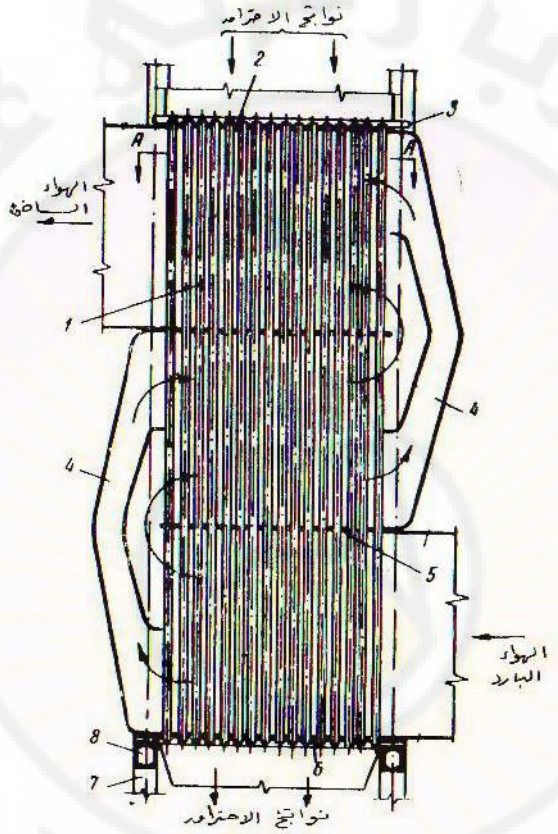
ويعتبر المسخن الانبوبي اكثر نماذجها انتشارا (الشكل٦-٢٨) وينفذ من انابيب فولاذية مع اقطار خارجية 30 ÷ 40 mm بسماكة 1,2 ÷ 1,5 mm ، تتوضع الانابيب شاقوليا وتلتحم نهاياتهـــا مع اللوحات الانبوبية 2 ، 6 وتترتب شطرنجيا ، وتؤخذ سماكات اللوحة الانبوبية العلوية 15÷20 mm والسفلية 20÷25 mm .

تمر غازات الاحتراق من خلال الانابيب (طولانيا) بينما يمر الهواء عرضيا ملامسا السطوح الخارجية لها . وتنظم الحركة المتعالبة لوسطي التبادل الحراري بمساعدة عوارض افقية 5 وبذلك يقوم الهواء بعدة مشاوير عرضية (على الشكل ثلاثة مشاوير) وتساعده في توجيه هذا العلب 4 .

يستند مسخن الهواء على هيكل مولد البخار 7 بمساعدة الاطار 8 وتتمدد جملة الانابيب نحو الاعلى بحرية ، ويقوم المعوض المرن 3 (الشكل ٦-٢٩) بتقبل التمدد الحراري .

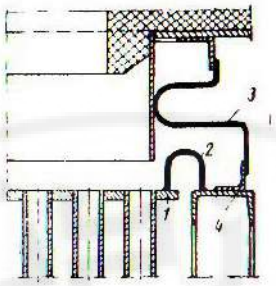
★ الشكل الاخير يبين التوصيل المرن بين ممر الغازات واللوحة الانبوبية العلوية للمسخن .

★ تتميز المسخنات الانبوبية ببساطتها التصميمية ووثوقيتها في



الشكل (٦–٢٨) مسخن الهواء الانبوبي .

في العمل ، هذا بالاضافة الى انها تحول دون اختلاط الغازات مع الهواء وتمنع تسربها .



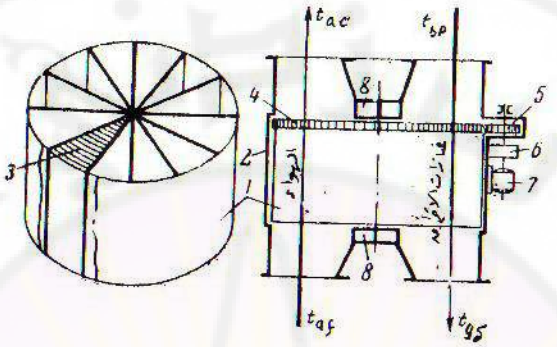
الشكل(٦-٢٩) التوصيل المرن لمسخن الهواء.

١- اللوحة الانبوبية ، ٢و٣- النوابض المعوضة ، ٤- عارضة متصلة مع هيكل المولد .

٢- مسخنات الهواء الاسترجاعية

تعتبر مسخنات الهواء الدوارة اكثر النماذج الاسترجاعية انتشارا في محطات الطاقة الكهربائية ، وتتألف (الشكل٦-٣٠) من الدوار **1** الذى يدور بمساعدة المسننات **4** ، **5** ومحول السرعة **6** والمحرك الكهربائي **7** ، يحاط الدوار من الخارج بالغلاف الثابت **2** ، ويحتوي الاخير على اقنية خاصة لادخال واخراج الهواء وغازات الاحتراق ، تتحرك الاخيرة باتجاهات متعاكسة ، يقسم الدوار بواسطة الواح معدنية مستوية الى عدة قطاعات . وتملأ هذه القطاعات بالحشوة التي هي عبارة عن اقنية صغيرة (اقطارها المكافئة $d_{eq} = 4 \div 5$ mm) مؤلفة من الواح معدنية مستوية واخرى مموجة . يدور المحور بسرعة ٢ ÷ ٦ دورة/دقيقة حول المحور الشاقولي ، ويمر الهواء والغازات على احد جزئي الدوار ،فتكتسب حشوته الطاقة الحرارية عند ملامستها للغازات ، وتعود فتقدمها للهواء عند ملامسته لها .

وهكذا تلعب الحشوة دور المدخر الحراري ، ويتطلب منها ان تتسخن بالغازات بسرعة كبيرة وان تتبرد ايضا بنفس السرعة .

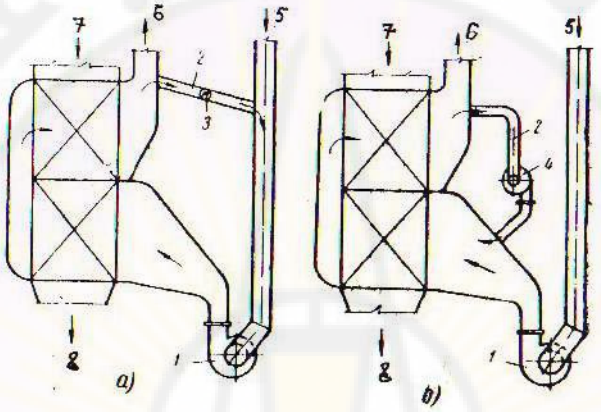


الشكل(٦-٣٠) مسخن الهواء الاسترجاعي.

١- الدوار ، ٢- هيكل ثابت ، ٣- الحشوة ، ٤- المسخن الكبير ، ٥- المسخن الصغير (المقاد) ، ٦- مخفض السرعة ٧- محرك كهربائي ، ٨- الواح فصل الجريان الهوائي عن مثيله الغازي .

تتميز المسخنات الاسترجاعية بعدد من المميزات منها صغر الحجم ، التوفير في المعدن ، صغر مقاومتها الهيدروليكية ، اما عيوبها فهي كالتالي : وجود الاجزاء الدوارة التي تتطلب وجود المضمع وجملة التبريد المائي ، صعوبة منع تسرب الهواء الى الغازات حيث يتسرب الهواء الى الغازات بنسبة قد تصل الى 10 % مما يزيد في الضياعات مع غازات الاحتراق ، واهم عيوب المسخنات المذكورة هو صعوبة تسخين الهواء الى ما فوق 350 ÷ 380 °C بسبب تعرض الحشوة للتشوه والتخريب .

لحماية معدن مسخن الهواء من الاكسدة تستخدم طرق عديدة منها رفع درجة الحرارة العاملة للمعدن الى ما فوق نقطة الندى ،وهناك طريقة اخرى تعتمد على تسخين الهواء الوارد الى المسخن عن طريق اعادة جزء منه الى مروحة التهوية او بتدوير جزء منه بمساعدة مروحة خاصة (الشكل٦-٣١ ، a ، b).



الشكل (٦-٣١) تدوير الهواء •

a - بمساعدة السدادة الناظمة ، b - بمساعدة مروحة التدوير ،

١- مروحة التهوية ، ٢- قنال تدوير الهواء ، ٣- السدادة الناظمة ، ٤- مروحة التدوير ، ٥و٦- مدخل ومخرج الهواء ، ٧و٨- مدخل ومخرج غازات الاحتراق •

الفصـــــــــــل الســـــــابع

اعداد الميـــــاه والنظام الماثل لمولد البخـــــار

٧-١ مواصفات الماء وتأثير الشوائب المنحلة والمعلقة

★ تعتبر مسألة اعداد المياه من اكثر المهمات اثرا على عمل مولد البخار واستثماره الصحيح الرشيد،والمعروف ان المياه الطبيعية تحتوي على الغازات والاملاح والشوائب الميكانيكية والعروية ، ويقتضي الاستثمار الصحيح لمولد البخار تغذيته بالمياه الخاليـــة تقريبا من المواد والاملاح التي تشكل خطرا على عمله .

★ في اغلب المخططات يعود البخار المنتج بعد قيامه بعملـــه لدى المستهلك على شكل مياه تكثيفية ، ويكون عادة التصريف العائد اقل من التصريف المنتج .

★ في منشآت المراجل الانتاجية تحدث الفواقد لدى المستهلك بسبب انساخ البخار المستخدم في العمليات التقنية ، ولا يبرر اقتصاديا اعادة معالجة المياه المتكاثفة عن هذا البخار ، اما نسبة الفواقد فمتعلقة بظروف وشروط عمل المستهلك ، ويمكن ايراد بعض الامثلة على

نسب الفواقد كما يلي :

صناعة بناء الالات 20 % ، صناعات مواد البناء 30 % ،الصناعة الكيميائية 40 % ، تكرير البترول 50 % ، هناك فواقد اخرى في الانابيب بسبب التسرب 0,5÷1 %، وفي مولد البخار ذاته بسبب الطرح المستمر للمياه زائدة الملوحة من الحلة .

يجري تعويض فواقد المياه من مصدر جانبي (شبكة مياه المدينة مثلا) ، وتعالج مياه التعويض على الشكل الذي يتوافق مع متطلبات مولد البخار ويشكل خليط المياه التعويضية مع المياه التكثيفية العائدة تصريف مياه التغذية . لتقويم نوعية المياه ومدى صلاحيتها للاستخدام ، وايضا لتحديد عمليات المعالجة المطلوبة ونظام المعالجة تستخدم المؤشرات التالية :

١- الشفافية ، وتوصف وجود المحاليل الميكانيكية والغروية المعلقة ودرجة اتساخ المياه بالمواد الصلبة وتقدر بالميلغرام في كل ليتر mg / ℓ .

٢- الراسب الجاف ، وهو احد اهم المؤشرات ، الذي تحدد بموجبه صلاحية المياه لتغذية مولد البخار .

ويتحدد الراسب الجاف بتبخير عينة مخبرية من المياه بدرجة حرارة 110 ÷ 120 °C ويتضمن على المواد الغروية والمواد العضوية واللاعضوية الذائبة في الماء ، اما وحدة القياس فهي mg / kg ،

٣- الملوحة وتوصف التركيز الاجمالي للشوارد الموجبة (Mg^{2+} ، K^{+} ، Na^{+}) والشوارد السالبة (Cl^{-} ، SiO_3^{2-} ، SO_4^{2-} ، HCO_3^{-}) .

وتحدد معدنية المياه ، mg / ℓ .

٤- قابلية المياه للاكسدة ، وتميز تركيب الشوائب العضوية في الماء وتحسب بكمية الاوكسجين (mg / ℓ) اللازمة لاكسدة الشوائب العضوية الموجودة في واحد كغ من الماء .

٥- قساوة الماء ، وتعتبر من اهم المؤشرات المميزة لنوعية الماء ، وتعكس وجود املاح الكالسيوم والمغنزيوم (Ca^{2+} Mg^{2+}) ، ويفرق عادة بين القساوة الاجمالية J_o والكاربو ناتية J_c واللاكاربوناتية $J_{n.c}$ وتتحدد القساوة الاجمالية بالتركيز الاجمالي لشوارد المغنزيوم والكالسيوم

$$J_o = J_{Ca} + J_{Mg} \quad , (1-7)$$

$$J_o = J_c + J_{n.c} \quad (2-7)$$

ترتبط القساوة الكاربوناتية بوجود ثاني فحمات الكالسيوم و المغنزيوم $Ca(HCO_3)_2$ ، $Mg(HCO_3)_2$ وهي قساوة مؤقتة غير ثابتة تتفكك مركباتها بالغليان مطلقة غاز CO_2 وروا سب صلبة هي $CaCO_3$ و $Mg(OH)_2$. اما القساوة اللاكربوناتية فتعكس وجود كافة املاح الكالسيوم والمغنزيوم المتبقية ($MgCl_2$ $CaCl_2$ ، $MgSO_4$ ، $CaSO_4$ الخ) .

تتصف القساوة اللاكاربوناتية بالثبات فهي لاتتحلل بالغليان ولذلك تدعى بالقساوة الثابتة .

تقاس قساوة الماء بالميليغرام المكافيء في كل كيلوغرام من الماء $Mg \cdot eq / Kg$ او بالميكروغرام - مكافيء في الكيلوغرا

$(1 mg.eq = 10^3 \mu Kg \cdot eq)$ $\mu Kg \cdot eq / Kg$

تصنف المياه الطبيعية من حيث القساوة الاجمالية الى ثلاث مجموعات:

١- المياه الخفيفة $J_o < 4$ $mg.eq/Kg$

٢- مياه متوسطة القساوة $J_o = (4 \div 7) mg.eq/Kg$

٣- المياه القاسية. $J_o > 7$ $mg.eq/Kg$

تقدر القساوة بتقسيم كمية المادة C الموجودة Kg واحد ماء على الكتلة المكافئة :

$$J = \frac{C}{E} \quad , \quad Mg \cdot eq / kg \quad , \quad (3-7)$$

وترتبط الكتلة المكافئة للمادة مع الكتلة الجزيئية بالعلاقة التالية

$$E = \frac{\mu}{n} \quad , \quad (4-7)$$

حيث :

μ - الكتلة الجزيئية للمادة ،

n - تكافؤ المركب في تفاعل تحضير الماء .

٦- القلوية ، وتعكس وجود شوارد الثاني فحمات HCO_3^- والفحمات CO_3^{2-} والماءات OH^- ، تقاس كمية القلوية بوحدة $Mg \cdot eq/kg$.

٧- تركيز الغازات الذوابة في الماء، وتقاس بوحدة Mg/Kg .

نتيجة لعمل مولد البخار المتواصل تنتقل الاملاح والشوائب الضارة الى الحلة ، حيث يتزايد تركيز الاملاح في المياه المرجلية كما ،

ويترسب قسم من الاملاح على السطوح الداخلية لانابيب المعاكس مشكلة بذلك اخطارا كبيرة تتمثل في زيادة تسخين انابيب المعاكس وزيادة امكانية تفجرها ، هذا بالاضافة الى انخفاض مردود مولد البخار لضعف الانتقال الحراري .

وتعتبر املاح الكالسيوم والمغنزيوم المصدر الاساسي لتشكل الطبقة الترسيبية الصلبة داخل الانابيب التي يكون التوصيل الحراري فيها ضئيلا بالمقارنة مع التوصيل الحراري للمعدن .

تكتسب الغازات O_2 ، CO_2 الذائبة في الماء عند درجات الحرارة العالية قابلية زائدة لاكسدة المعدن ، ونتيجة لذلك تتناقص سماكات الانابيب بسرعات كبيرة وبالتالي تتناقص متانتها الميكانيكية.

تنخفض قلوية الماء من شدة تفاعلات الاكسدة ، ولكن زيادة القلوية ترغي الماء ، فتظهر امكانية نقل الرغوة من الحلة مع البخار الخارج منها .

٧-٢ اسس معالجة المياه

مماسبق نستنتج وجوب مطابقة مواصفات مياه التغذية مع حاجات مولد البخار ، و تختلف المواصفات المطلوبة تبعا لنوع مولد البخار وللضغط المعمول به في المولد وتنقسم عمليات المعالجة الى قسمين : اولهما عمليات المعالجة المسبقة وتتضمن عددا من الاجراءات التي يحافظ بموجبها على معدلات نوعية مياه التغذية ، اما القسم الثاني فيتضمن عمليات المعالجة ضمن الحلة التابعة لمولد البخار ، واهم هذه العمليات اضافة بعض المواد الكيميائية التي تدخل في

تفاعلات كيميائية مع املاح مياه الحلة ، هذا بالاضافة الى الطرح المستمر والدوري للمياه زائدة الملوحة من الحلة .

تتضمن المعالجة المسبقة على عمليات الترويق (طرح المواد المعلقة) وتخفيض القساوة والقلوية والملوحة ، وكذلك الامر طرح الغازات الذائبة (CO_2 ، O_2) .

تطرح المواد المعلقة الضخمة بالترقيد ؛ والمواد الصغيرة بالترشيح خلال المرشحات التي تحتوي على طبقات رملية او طبقات من مجروش الرخام الناعم او فحم الانتراسيت ، لطرح المواد الغروية والعضوية المعلقة تعالج المياه بالمواد المخثرة ، اي المواد التي تساعد في تضخيم المواد المعلقة (املاح الحديد $FeSO_4$ او كبريتات الالومنيوم $Fe Cl_2$) ، يتحدد نظام معالجة المياه تبعا لمواصفات المياه الطبيعية المزمع استخدامها في مولد البخار؛وعند استخدام شبكة مياه الشرب تزول الحاجة لعمليات الترويق والتخثير .

تستهدف عملية تخفيض القساوة تخليص المياه من الشوارد الموجبة Ca^{2+} ، Mg^{2+} ويتحقق ذلك بالطريقة الحرارية التي تعني تفكك مركبات ثاني فحمات الكالسيوم والمغنيزيوم بالتسخين حتى $360 \div 375\ K$ ، حاليا تستخدم بشكل مطلق تقريبا طريقة التبادل الشاردي لتخفيض القساوة .

تتلخص طريقة التبادل الشاردي بما يلي : تمرر المياه التعويضية من خلال اجهزة خاصة تسمى المرشحات الشاردية ، التي تملأ بمواد تشارك في التبادل الشاردي مع املاح القساوة وتسمى هذه المواد

الكاتيونيت ويحتوي كاتيونيت المرشحات الشاردية على شوارد الصوديوم (Na^+) او الامونياك (NH_4^+) او الهيدروجين (H^+) . وتحل شوارد املاح القساوة في مكان شوارد الكاتيونيت وبهذا الشكل يتحمل الماء بشوارد الكاتيونيت متخلصا بآن معا من شوارد املاح القساوة التي تحتجز في مادة الكاتيونيت والجدير بالذكر ان الشوارد المنتقلة الى الماء لا تشكل اي ترسيبات في المسار المائي للبخار .

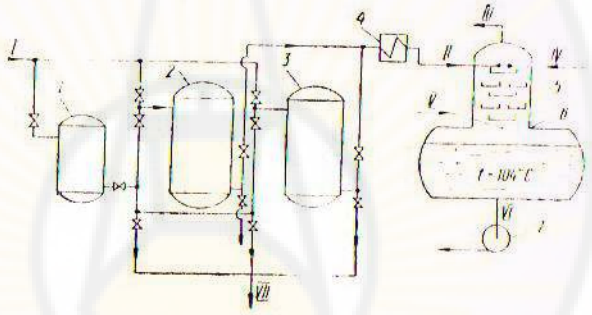
تستخدم تبعا لنوعية المياه الطبيعية طرق مختلفة للتبادل الشاردي منها التبادل الصوديومي والامونيومي والهيدروجيني ، وقد يستخدم اسلوب التبادل الشاردي المركب الذى يتحقق بجمع المخططات المتوازية او المتسلسلة لاساليب التبادل المذكورة .

يعمل المرشح الشاردى خلال فترة زمنية معينة تغتني خلالها مادة الكاتيونيت بشوارد المغنزيوم والكالسيوم ،وتضعف قابليته للتبادل ، وتجرى بعد ذلك عملية الاسترجاع على مادة الكاتيونيت التي تتم بموجبها معالجته بمحلول مخفف من H_2SO_4 ، $NaCl$ ، NH_4Cl (تبعا لنوع التبادل الشاردي) .

تؤثر الغازات CO_2 ، O_2 المنحلة في الماء على جدران الحلة والانابيب المعدنية مؤدية الى اكسدتها، لهذا السبب تطرح الغازات من المياه بالطرق الحرارية المنتشرة بكثرة ، وتعتمد هذه الطرق على انخفاض قابلية الغازات للانحلال في الماء مع ارتفاع درجة حرارته الى مستوى الاشباع ،ويشترط من اجل ذلك تخفيض الضغط

على الشكل ٧-١ يبين مخطط اساسي لمنشأة اعداد المياه التي تتضمن المبادل الشاردي وجهاز طرح الغازات .

ترد المياه التعويضية الى المرشح الشاردي الصوديومي حيث يجري حجز النسبة الكبرى من الشوارد المتسببة في القساوة ،يحتوي المخطط على مرشحين شارديين يكون احدهما (2 مثلا) في حالة العمل بينما يجري استرجاع الكاتيونيت في المرشح الاخر (3) ، يصل المحلول المخفف للملح $(6 \div 10\ \%)$ NaCl الى المرشح 3 من جهاز اذابة الملح 1 .



الشكل (٧-١) مخطط منشأة تحضير المياه.

١- جهاز تحضير المحلول الملحي ، ٢،٣ المرشحات الشاردية ، ٤- مبادلات حرارية ، ٥ - صحون مثقبة ، ٦- طارحة الهواء ، ٧- مضخة ، I - مياه التعويض ، II - مياه منخفضة القساوة ، III - طرح المزيج البخاري الغازي ، IV - المياه التكثيفية العائدة ، V - بخار التسخين VI - مياه التغذية ، VII - تصريف .

ترد المياه فيما بعد الى طارحة الهواء 6 ، حيث يجري التخلص من الغازات المنحلة ، بتسخين الماء في البرج حتى درجة الاشباع الموافقة للضغط في الطارحة .

٧-٣ مصادر اتساخ البخار

يتسخ البخار بالمواد الذائبة والمواد المعلقة بالماء ،وهناك طريقان لانتقال المواد من مياه الحلة الى البخار :

اولهما قطرات الماء المحمولة مع البخار والتي تذيب الاملاح والمواد الغروية فيها ، والطريق الثاني هو انتقال المواد مع البخاربسبب خاصيته التذويبية ، تقدر نقاوة البخار بشكل عام بمعامل الحمل K :

$$K = w + a \quad ,\% \qquad (٧-٨)$$

حيث :

w – رطوبة البخار التي تعكس احتواءه على المواد المنقولة مع قطرات الرطوبة ،

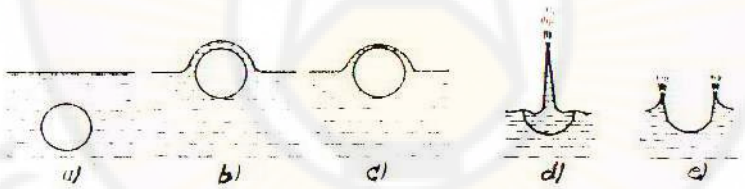
a – معامل توزيع المواد بين البخار المشبع والمياه المغلية .

في حالة الضغوط الصغيرة تصبح قابلية التذويب للبخار صغيرة وعندئذ تكون $K = w$ % ، ومع ازدياد الضغط تزداد قابلية البخار التذويبية ، ويصبح احتواؤه على المواد بسبب خاصيته التذويبية اكبر بعشرات المرات من احتوائه بسبب قطرات الماء المحمولة ،وفي هذه الشروط تبسط العلاقة (٧-٨) الى :

$K = a$ ، (a ، 8-7)

طبيعة تشكل قطرات الرطوبة

في حالة توصيل انابيب البخر الى مادون مستوى الماء في الحلة تنطلق فقاعات البخار باتجاه مرآة البخر (الشكل ٧-٢) ، ويتعلق تطورها المقبل بقيمة الشد السطحي لشريحة الماء المحيطة بالفقاعة وبالضغط الداخلي ضمن الفقاعة ، وعندما يكون الشد السطحي اصغر من الضغط فان الفقاعة تخرب شريحة الماء وتخرج الى الوسط البخاري ويؤدي ارتطام الماء بين طرفي الفجوة المتشكلة الى انطلاق قطرات مائية ذات ابعاد مختلفة وتنطلق قطرات الرطوبة الى الوسط البخاري وتصل الى ارتفاعات مختلفة تبعا لطاقتها الحركية وعندما يزيد ارتفاع الوسط البخاري عن ٢٥٠ mm تتراجع كافة القطرات الى مرآة البخر ولا تصل الى انابيب البخار .



الشكل (٧-٢) مخطط تشكل قطرات الماء في حالة ادخال الانابيب التبخيرية الى الحيز المائي من الحلة .

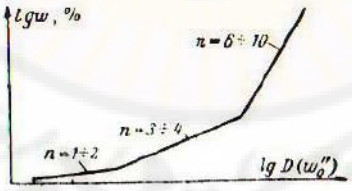
a ـ مرحلة تشكل الفقاعة ، b ـ المرحلة الابتدائية لخروج الفقاعة الى مرآة البخر ، c ـ قبل تمزق الغلاف المائي ، d و e ـ تمزق الغلاف المائي وتشكل قطرات الماء .

في حالة امداد المزيج البخاري المائي في مستوى يعلو عن مرآة الحجر تتشكل قطرات الماء نتيجة لرش الرطوبة الواردة مع البخار ، ويزداد تشكل قطرات الماء مع ازدياد سرعة المزيج البخاري المائي اى مع ازدياد حمولة مولد البخار ، وبغض النظر عن مصدر قطرات الماء في حالة الحمولة الصغيرة يحمل البخار قطرات الماء ذات الابعاد الصغيرة ومع ازدياد التصريف تنضم القطرات ذات الابعاد الاكبر ، ولهذا السبب مع ازدياد حمولة مولد البخار تزداد الرطوبة الخارجة من الحلة (الشكل ٧-٣) ، وتمثل رطوبة البخار بالعلاقة التقريبية التالية :

$$w = AD^n \quad , (7-9)$$

وتتعلق قيم A و n بتصميم اجهزة فصل البخار وبالضغط وبنسبة الاملاح وبالتركيب الشاردي للماء ، ويتغير الاس n بشدة مع تغير الحمولة وفي الاحداثيات اللوغاريتمية يأخذ منحني رطوبة البخار شكلا متدرجا .

تتأثر رطوبة البخار بتركيز المواد الذائبة والمعلقة بالماء فمع ازدياد تركيز الاملاح يزداد الشد السطحي ، ويحتفظ الماء بالفقاعات البخارية وينتفخ ممتلئا بكمية كبيرة من البخار وينخفض ارتفاع الحجم البخاري في الحلة .



الشكل (٧-٣) تابع رطوبة البخار بالنسبة لحمولة مولد البخار .

ونتيجة لانفجار فقاعات البخار على المرآة تتمكن نسبة عالية من قطرات الماء من الوصول الى انابيب خروج البخار، وبالتالي تؤدي الى اتساخه بالاملاح والمواد المعلقة .

٧-٤ طبيعة انحلال المواد في البخار

يميز عادة بين الانحلال في البخار المشبع والبخار المحمص، ويحدث انتقال التركيبات الغير طيارة من الماء الى البخار المشبع نتيجة لقابلية التذويب في البخار ويستمر هذا الاجراء الى حين حدوث التوازن الترموديناميكي بالتوافق مع قانون توزيع المواد الذائبة بين مذيبين غير مختلطين ، ويعتبر الماء والبخار وسطين مؤلفين من تركيب كيميائي واحد ولكنهما يختلفان بالكثافة وبصفات العازلية الكهربائية ، اي بالصفات التي تحدد قابليتهما التذويبية للمواد اللاعضوية .

يتعلق معامل التوزيع بين الماء والبخار بالضغط (أي بالنسبة ρ''/ρ') وبالخواص الفيزيائية الكيميائية للمواد الذائبة وتمثل هذه التبعية بالعلاقة التالية :

$$a = \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right)^n \quad , (10 - 7)$$

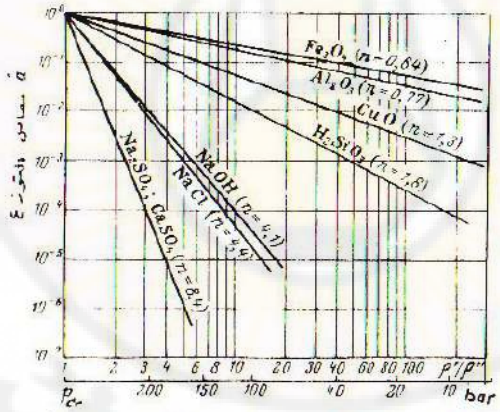
حيث : n - أس الرفع ويتعلق بصفات المادة .

وتمثل العلاقة (7 — 10) في الاحداثيات اللوغاريتمية بالمخطط الاشعاعي (الشكل ٧-٤) مع مبدأ الاحداثيات المتوافق مع الضغط الحرج (للماء $P_{cr} = 228.58$ bar) ومعامل التوزيع $a = 1$

تتميز انحلالية المواد في البخار بما يلي :

١- الطابع الانتقائي الواضح لاتساخ البخار ، فتوزيع المركبات المختلفة لنفس العنصر بين الماء والبخار متنوع الى حد بعيد ، ويتوافق مع قانون التوزيع .

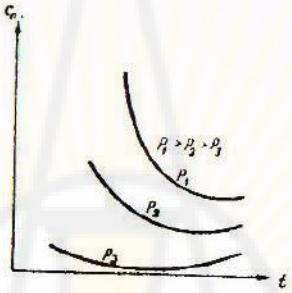
٢- الازدياد الشديد لقابلية البخار على حمل الاملاح مع ازدياد الضغط تقسم كافة المركبات الموجودة في الماء من حيث انحلاليتها في البخار الى ثلاثة مجموعات ؛ في الاولى $n < 1$ ، وفي الثانية $n = 1 \div 2$ ، وفي الثالثة المواد ذات $n > 3$ (الشكل ٧-٤) وتتصف المجموعتان الاولى والثانية بقابليتهما الكبيرة للانحلال في البخار وهي في الاساس نواتج الاكسدة Fe_3O_4 ، Al_2O_3 ، CuO التي هي ضعيفة الانحلال في الماء ، ولهذا السبب تتواجد بنسب صغيرة في البخار ايضا . ويحمل حمض السيليسيوم H_2SiO_3 اهمية خاصة نظرا لوجوده بنسب عالية في الماء وقابليته العالية للانحلال في البخار .



الشكل (٧-٤) تابع معامل التوزع بالنسبة للمتحول p'/p'' لمختلف المواد .

تتبخر قطرات الماء المحمولة مع البخار المشبع في المحمص ويتبقى قسم من المواد المترسبة ضمن انابيب المحمص ، بينما يحمل القسم الاخر الى العنفة البخارية ، ويحمل البخار المحمص قسما من الترسبات نتيجة لتماسه معها .

وتقسم المواد من حيث قابليتها للانحلال في البخار المحمص الى ثلاثة مجموعات كما هو الحال مع البخار المشبع ، وتتعلق قابلية التذويب في البخار المحمص بدرجة حرارته وضغطه (الشكل ٧-٥) .



الشكل (٧-٥) انحلالية $NaCl$ في البخار المحمص

٧-٥ طرق تنقية البخار

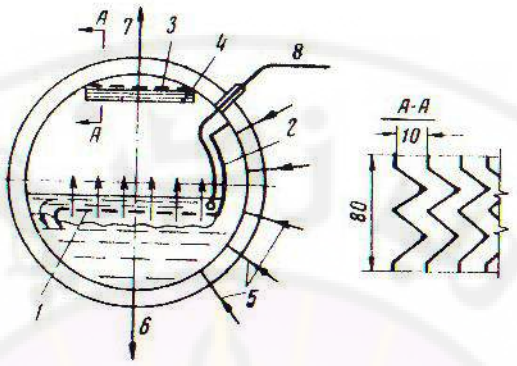
فصل قطرات الرطوبة من البخار

للحصول على البخار النقي يتوجب اولا تجفيفه بشكل كامل ، اي فصل قطرات الرطوبة عن تيار البخار ، ويعتمد فصل البخار على الفارق بين كثافات الماء والبخار ، وابسط مثال على ذلك هو الفصل الحجمي ، حيث تتأثر قطرات الرطوبة في الحيز البخاري من الحلة بقوتين متضادتين بالاتجاه : اولاهما قوة الرفع وثانيتهما قوة الثقل

والواضح انه مع انخفاض قوة الرفع يزداد احتمال سقوط قطرات باتجاه مرآة البخر ولهذا السبب يتوجب تحميل الحيز البخاري من الحطة بشكل متساو بالطول والعرض ويتحقق هذا الامر بتوزيع انابيب خروج البخار على طول الحطة وبوجود اجهزة الفصل .

لايحقق الفصل الحجمي الاهداف المرجوة في الحصول على البخار ذى النقاوة العالية، ولهذا السبب تضاف اجهزة الفصل الاضافية ،وتعتبر التروس المثقبة اكثر هذه الاجهزة بساطة في التصميم وفعالية في العمل وهي عبارة عن صفائح فولاذية مثقبة ، في الشكل ٧-٦ يستخدم الترس المثقب المغمور في الماء ، كما ويستخدم ترس آخر بدون ثقوب يقوم باخماد الطاقة الحركية للجريان البخاري المائي المندفع من انابيب البخر ، ويقوم الترس المغمور باخماد الطاقة الحركية للمزيج البخاري المائي ضمن الحيز المائي ، ويجري اختيار سرعة البخار المار عبر الثقوب انطلاقا من شروط تشكل وسادة بخارية إسفل الترس تضمن التوزع المتساوي للبخار وتتعلق سرعة البخار بالضغط حيث تتناقص السرعة مع تزايد الضغط (الشكل ٧-٧) .

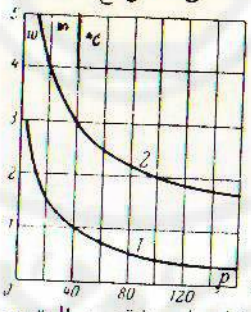
في حالة امداد المزيج البخاري المائي الى الحيز البخاري أعلى الحطة تستخدم التروس الصدامية الافرادية او المشتركة (الشكل ٧-٨) التي تقوم بكبح الجريان واخماد طاقته الحركية ، وبالتالي تساعد في فصل البخار عن قطرات الماء الصغيرة دون ان يمرر ضمن الحيز المائي ، وفي مثل هذه الاحوال تسهل الشروط المتعلقة بنوعية مياه الحطة .



الشكل (٧–٦) مخطط اجهزة الفصل في حالة امداد المزيج البخاري المائي الى الحيز المائي من الحلة .

١– ترس مثقب مغمور ، ٢– ترس مصمت ، ٣– سقف استقبال البخار ، ٤– جهاز الفصل ذى الشرائح المائية ، ٥– انابيب البخر ، ٦– الانابيب الهابطة ، ٧– خروج البخار ، ٨– امداد مياه التغذية .

في كافة مخططات دخول انابيب البخر الى الحلة تستخدم اجهزة الفصل الميكانيكية التي تتألف من الواح معدنية مموجة (الشكل ٧–٦) ،

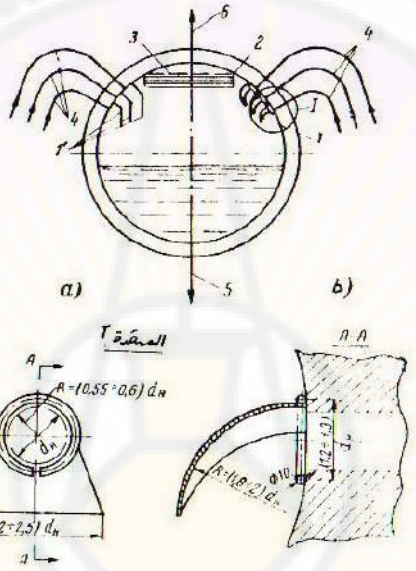


الشكل (٧–٧) سرعة البخار في ثقوب الترس تبعا للضغط .

١– السرعة الدنيا ، ٢– المفضلة .

تشكل فيما بينها ممرات متعرجة تساعد في التقاط قطرات الماء المخالط للبخار الذي يتابع طريقه الى المخرج .

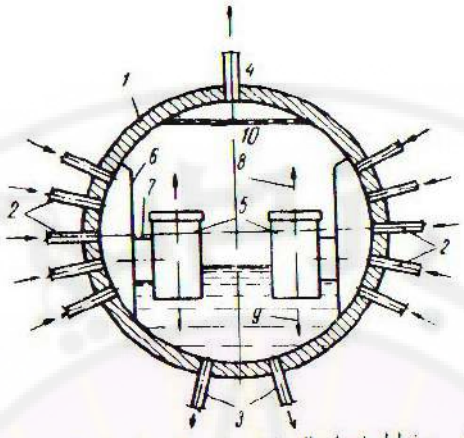
هناك طرق فعالة اخرى لتجفيف البخار مثل اجهزة الفصل الدوامية الداخلية (الشكل ٧–٩) .



الشكل(٧–٨) مخطط اجهزة الفصل في حالة امداد البخار الى الحيز البخاري من الحلة .

a – مع تروس مخمدة مشتركة ، b – مع تروس مخمدة افرادية ، ١– الزعنفة المخمدة ، ٢– جهاز الفصل الشرائحي ٣– سقف استقبال البخار ، ٤– انابيب البخر ، ٥– الانابيب الهابطة ، ٦– خروج البخار .

ويتألف جهاز الفصل الدوامي الداخلي (الشكل ٧–١٠) من غلاف اسطواني

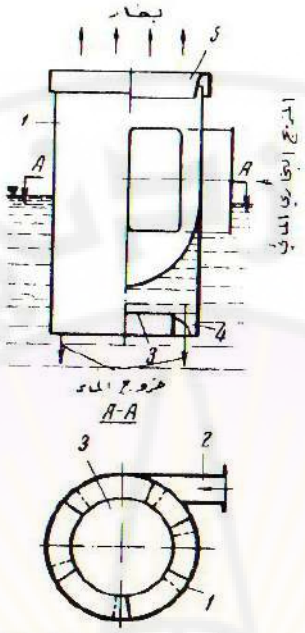


الشكل (٧-٩) مخطط فصل البخار في الدوامات الداخلية .

١- الحلة ، ٢- انابيب البخر ، ٣- الانابيب الهابطة ، ٤- انابيب خروج البخار ، ٥- الدوامات الداخلية ، ٦- ترس مصمت ، ٧- القنال المماسي لادخال المزيج البخاري المائي ٨- خروج البخار الى الحيز البخاري ، ٩- خروج المياه ، ١٠- سقف استقبال البخار .

شاقولي يرد اليه المزيج البخاري المائي باتجاه مماسي بسرعة $10 \div 12$ m/sec ، فتخمد الطاقة الحركية للجريان وتسيل المياه الى الاسفل بينما يصعد البخار الجاف بسرعة صغيرة الى الحيز البخاري من الحلة ، ويشكل قعر الدوامة مع الاسطوانة مخرجا حلقيا للمياه تتواجد فيه الزعانف القطرية التي تحول حركة المياه الدورانية الى حركة شاقولية نحو الاسفل .

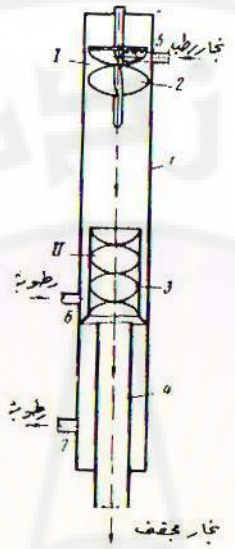
نتيجة لنشوء القوى النابذة الكبيرة في الدوامات ، تنعدم امكانية تشكل الرغوة ، وذلك حتى في المياه ذات الملوحة العالية ، ولهذا السبب تستخدم اجهزة الفصل الدوامية الداخلية بشكل واسع لتجفيف البخار الناتج من المياه عالية الملوحة .



الشكل (٧-١٠) الدوامة الداخلية .

١- غلاف اسطواني ، ٢- القنال الدخولي ، ٣- قعر مصمت ، ٤- زعانف ، ٥- غطاء .

الفاصل النابذي : يستعمل في مولدات البخار ذات الجريان المباشر وهو عبارة عن انبوب مجمع مع مرحلتين للفصل (الشكل ٧-١١) ، يدخل المزيج البخاري المائي باتجاه مماسي دوراني الى المرحلة الاولى فيمرر من خلال جهاز توجيه نصلي يكتسب فيه حركة طزونية دورانية ، فتتجمع قطرات الماء بفعل القوى النابذة على سطح الانبوب ، وتخرج عبر حجرة التجميع الى انبوب الطرح ، في المرحلة الثانية يتعرض البخار المجفف جزئيا لعملية مماثلة كما هو الحال في المرحلة الاولى .



الشكل (٧–١١) جهاز الفصل النابذي .

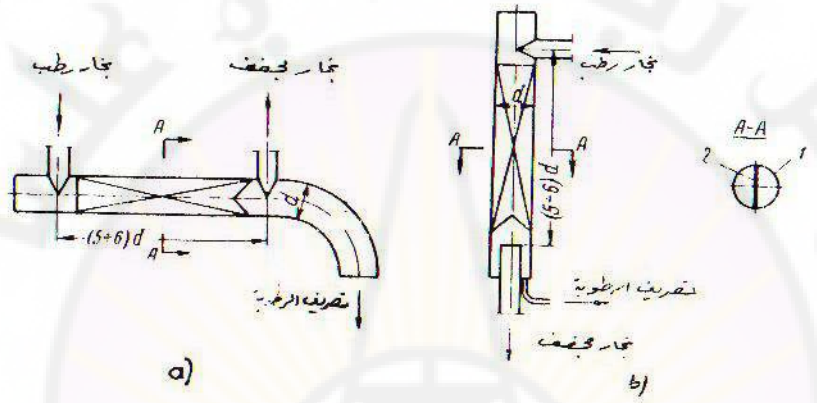
١– الغلاف ، ٣،٢ – زعانف توجيه المزيج في مرحلتي الفصل الاولى والثانية ، ٤– حجرة خروج البخار ، ٥ – انبوب دخول المزيج ، ٧،٦ – طرح الرطوبة من مرحلتي الفصل .

الفاصل الشرائحي : ويعمل بأسلوب تمرير البخار الرطب عبر ممرات تقوم بالتقاط النسبة الكبرى من كتلة الرطوبة بينما يمر البخار في القسم المركزي من الممرات (الانابيب) .

على الشكل ٧–١٢ تظهر مخططات الفاصل الشرائحي الافقي ومثيله الشاقولي ، يعطي النوع الاخير المتناظر بخارا اكثر جفافا بالمقارنة مع النوع الاول وعادة يستخدم النوع الافقي كمرحلة اولى للفصل ،بينما يستعمل النوع الشاقولي كمرحلة ثانية للتجفيف .

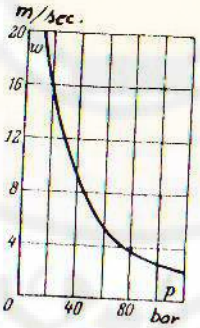
لزيادة فعالية الفصل يحافظ على سرعات متدنية لحركة البخار حتى

لا تتطاير قطرات الماء مع الجريان البخاري ، وتتعلق سرعة البخار الحدية بالضغط (الشكل ٧–١٣) .



الشكل (٧–١٢) الفاصل الشرائحي .

a – النوع الافقي ، b – الشاقولي ، ١– الغلاف، ٢– حاجز طولي

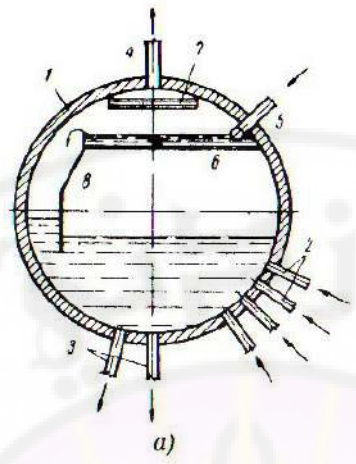


الشكل (٧–١٣) سرعة البخار الموافقة لانطلاق قطرات الماء من سطح الشريحة المائية تبعا للضغط .

غسيل البخار

يتصف البخار الجاف ذي الضغط العالي باتساخه بمواد عديدة نظرا لقدرته على تذويب هذه المواد ويساعد غسيل البخار في تخليصه من المواد المرافقة .

اما عملية الغسيل فنبينها فيما يلي : لنفترض ان ملوحة مياه الحلة هي C_{ce} وينتج عنها بخار مع تركيز للاملاح فيه $C_{v,1}$ ، وتبعا لخاصية تذويب المادة في البخار المتعلقة بالضغط فقط نكتب معامل التوزيع $a_1 = C_{v,1} / C_{c.e}$ ، وبتمرير البخار خلال مياه التغذية ذات الملوحة المنخفضة C_{ne} يكتسب البخار تركيزا جديدا يتوافق مع معامل التوزيع $a_2 = C_{v,2} / C_{ne}$ ، ونظرا لان اجراء تشكل البخار وغسيله يحدث من اجل ضغط واحد فسان $a_1 = a_2$ ؛ وبما ان $C_{ce} >> C_{ne}$ فان $C_{v,2} << C_{v,1}$ ، ومن هنا نرى ان نوعية البخار متعلقة بالماء الذي يمس البخار قبل خروجه على وجه التحديد . ولهذا السبب للحصول على فعالية عالية للغسيل يتوجب زيادة فترة التماس بين البخار والمياه النظيفة ، ولتحقيق هذا الهدف يمرر البخار من خلال ترس مثقب بينما ترد اليه مياه التغذية (الشكل ٧-١٤) من انبوب خاص فتغسل نوافير البخار؛ ولا يتمكن الماء من الهبوط نحو الاسفل بسبب الشكل الهندسي للترس او بسبب نوافير البخار الصاعدة بحد ذاتها .



الشكل (٧-١٤) مخطط غسيل البخار في الحطة،

a - باستخدام الترس المثقب ، b - باستخدام الاحواض المانعة لهبوط الماء .

١- الحطة ، ٢- انابيب البخر ، ٣- الانابيب الهابطة ، ٤- انابيب خروج البخار ، ٥ - امداد مياه التغذية ، ٦- الترس المثقب ، ٧- جهاز الفصل الشرائحي ، ٨- ترس مصمت .

٧-٦ النظام المائي لمولد البخار

١- مولدات البخار ذات الحطة

آ- طرح المياه زائدة الملوحة

تعتبر عملية طرح المياه زائدة الملوحة من الحطة عنصرا اساسيا في تنظيم حالة الماء في مولد البخار ذي الحطة ، ويتم بمساعدة هذه العملية التخلص من المواد الذائبة والمعلقة الاتية

مع مياه التغذية والمتشكلة في الحلة ذاتها .

يمكن وضع ميزانية الاملاح لابسط مخطط للنظام المائي (الشكل ٧-١٥) على الشكل التالي :

$$C'_v + P\,C_{je} = (1+P)\,C_{ne} \quad ,(11-7)$$

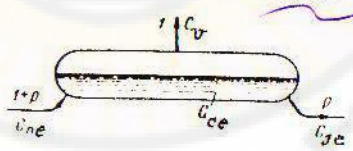
ومنه نحصل على ما يلي :

$$C_{je} = C_{ce} = \frac{(1+P)\,C_{ne} - C_v}{P} \quad ,(12-7)$$

وبعد اهمال ملوحة البخار $C_v = 0$ وبالتعويض على سبيل المثال $P = 1\ \%$ نحصل على ما يلي :

$$C_{ce} = \frac{(1+0{,}01)\,C_{ne}}{0{,}01} = 101\ C_{ne}$$

العلاقة الاخيرة تبين انه في شروط المثال نحصل على بخار من مياه مرجلية تزيد ملوحتها بنسبة 101 عن ملوحة مياه التغذية ، ويمكن تحسين نوعية البخار بزيادة نسبة المياه المطروحة ولكن هذا الامر يزيد من الضياعات الحرارية .



الشكل ٧-١٥) النظام المائي المبسط للمولد ذي الحلة.

C_{ne} ، C_{ce} ، C_{je} ، C_v - تركيز الموادفي مياه التغذية والمياه المرجلية والمياه زائدة الملوحة وفي البخار ، P - نسبة الطرح من مياه الحلة .

ب ـ البخر التدرجي

ويعتبر اكثر كمالا من البخر حسب النظام البسيط وفيه تقسم الحلة الى قسمين يتصل كل منهما مع انابيب اطاره الدوراني الخاص به ، وتدور المياه فيهما . ويتصل قسمي الحلة بثقب موجود في الحاجز الموجود بينهما ، ويرتفع الحاجز الفاصل فوق مستوى الماء قليلا مشكلا نافذة لانتقال البخار بين القسمين ، ترد مياه التغذية الى القسم الاول الاكبر ، ويحدث طرح المياه زائدة الملوحة من القسم الثاني الصغير وبهذا الشكل يتغذى القسم الثاني بالمياه من القسم الاول من خلال الثقب .

يحتوي مخطط البخر الوارد على الشكل ٧-١٦ على مرحلتين للبخر وعلى افتراض ان انتاجية الاولى هي $n_I = 80\ \%$ والثانية $n_{II} = 20\ \%$ فتحصل على التركيزات التالية للمياه المرجلية :

في المرحلة الاولى :

$$C_{ce}^{I} = \frac{[0,8 + (n_{II} + P)]\ C_{ne}}{n_{II} + P} =$$

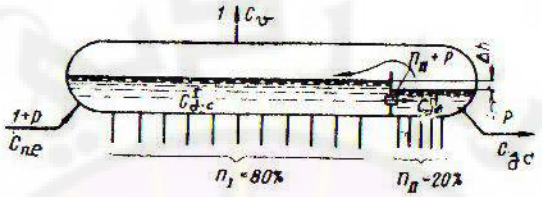
$$= \frac{(0,8 + 0,2 + 0,01)}{0,2 + 0,01} = 4,8\ C_{ne}$$

وفي المرحلة الثانية :

$$C_{ce}^{II} = \frac{(n_{II} + P)\ C_{ne}^{I}}{P} =$$

$$= \frac{(0,2 + 0,01) \cdot 4,8\ C_{ne}}{0,01} = 101\ C_{ne}$$

من المثال السابق نرى بوضوح اهمية البخر التدرجي في تحسين نوعية البخار حيث يتولد القسم الاكبر من البخار من المياه ذات النقاوة العالية نسبيا (80 % في المثال) .



الشكل (٧-١٦) مخطط البخر المتدرج ذى المرحلتين.

η_{II} ، η_{I} – النسب المئوية للانتاجية في المرحلة الاولى والثانية .

جـ – النظام المائي عديم الترسيب

تتغذى مولدات البخار ذات الحلة عادة بالمياه الخفيفة اي تلك التي تحتوي على التركيبات الكيميائية شديدة الانحلال ، وهي بشكل اساسي املاح الصوديوم ، انطلاقا من شروط منع تشكل الترسبات على سطوح التسخين البخرية يسمح بأن يرتفع تركيز هذه الاملاح في المياه المرجلية حتى مستويات عالية (عدة عشرات الغرامات لكل كغ ماء) ، ولكن بالاعتماد على شروط الحصول على البخار ذى النوعية المقبولة يجب ان لايزيد تركيز الاملاح الاجمالي في البخار عن 2-3 g/kg وبالنتيجة نرى ان تركيز الاملاح عالية الانحلال في الماء لايشكل خطرا على سطوح التسخين الا في حالات خروج الجريان عن النظام الهيدرو – ديناميكي (توقف الدوران ، انخفاض مضاعف الدوران دون الحدود

الدنيا) حيث يمكن عندئذ ترسب الاملاح وزيادة درجة حرارة المعدن .

تتسرب الى دورات محطات الطاقة كميات من المياه الحاملة لاملاح الكالسيوم والمغنيزيوم والتي تتصف بضعف انحلالها في الماء (ميليغرام او اعشار الميليغرام في الكيلوغرام) وفي الطة تتركز هذه الاملاح وتترسب على سطوح التسخين او تتشكل بللورات صلبة ضمن مياه الطة وتطرح هذه البللورات بمساعدة الطرح المتواصل لجزء من مياه الطة اما الجزء الاكثر ثقلا من هذه البللورات الذي يتجمع في اسفل الطة او في الانبوب المجمع السفلي فيطرح مع مياه الطرح الدوري .

لتعديل النظام المائي ولتحويل املاح القساوة الى تركيبات غير ترسبية تضاف بعض المواد مثل املاح حمض الفوسفور (Na_3PO_4) الى مياه الطة ، اما المواد المتشكلة السهلة الحركة فتطرح مع المياه زائدة الملوحة .

وتضاف المواد التصحيحية دوريا او باستمرار بمساعدة المضخات الجرعية .

٢- مولدات البخار ذات الجريان المباشر

الامر المميز في هذه المولدات هو اختصار الطة ، وما ينتج عن ذلك من ان الاملاح الواردة مع مياه التغذية تترسب جزئيا ضمن المنطقة الانتقالية ، ويذهب الجزء الاخر الى العنفة البخارية ، هذا مع العلم ان العنفة لا تتحمل ترسب كميات كبيرة من الاملاح حيث يتناقص مردودها بسرعة نتيجة لترسب الاملاح في هجراها .

ولهذا السبب تفرض شروط مشددة بالنسبة لمواصفات مياه التغذية تترسب الاملاح المحمولة مع مياه التغذية في انابيب المرجل ؛

اما نوعية وكمية ومكان ترسب هذه الاملاح فيتعلق بخواص هذه الاملاح وبالضغط العامل ومع ازدياد الاخير تزداد قابلية البخار التذويبية وبذلك تحمل الاملاح الى مناطق ابعد من المنطقة الانتقالية وتزداد نسبة الاملاح المترسبة في العنفة .

الغسيل الدوري

يؤدي تراكم المواد المترسبة في المنطقة الانتقالية الى تخفيض الانتقال الحراري الى جسم التشغيل ، وانحراف النظام الحراري لسطح التسخين عن حدوده الاسمية المقبولة ،ولازالة المواد المترسبة يستعمل الغسيل الدوري المائي والكيميائي ، في الغسيل المائي تزال المواد والتركيبات التي تنحل في الماء ،وتجري عملية الغسيل بضخ ميـــــاه ساخنة حتى ١٠٠ درجة مئوية حسب المخطط المغلق او المفتوح ، وفي المخطط المفتوح تطرح مياه الغسيل مباشرة بعد مرورها على المخطط، والواضح ان الغسيل حسب المخطط المفتوح يتطلب كميات كبيرة مـــن المياه المقطرة ولكنه اكثر فعالية من الغسيل حسب المخطط المغلق .

يطبق الغسيل الكيميائي حسب المخطط المغلق ويطرح بنتيجته كافة المواد المترسبة بما فيها الكلسية والمغنيزية ومواد الاكسدة والاهتراء للمعادن غير الاوستينيتية .ويستعمل في الغسيل محلول حمض كلور الماء المخفف او محلول حمض الكبريت،ولمنع اكسدة المعدن تضاف بعض المواد المضادة للاكسدة (الفورمالين ، الاوروتروبين) ،وبعد الغسيل الحمضي يتعرض مولد البخار للغسيل بالمياه التكثيفية النقية ،ثم يمرر محلول قلوي لفترة ١٠-١٢ ساعة (تركيز القلوي ١÷٢ %)،ثم يعاد الغسيل بالمياه التكثيفية . حاليا تستعمل طرق اكثر حداثة للغسيل الكيميائي .

الفصـــــــــــل الثامـــــن

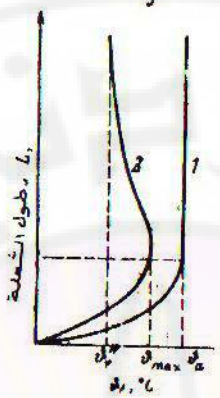
حساب الانتقال الحراري في مولد البخـــــــــار

٨-١ حساب الانتقال الحراري في غرفة الموقد

تعـاريف : يميز في الموقد بين درجات الحرارة التالية : درجة حرارة الاحتراق النظرية ϑ_{ad} والاعظمية ϑ_{max} ودرجة الحرارة عند مخرج الموقد ϑ''_{F} (الشكل ٨-١) .

تتحدد درجة حرارة الاحتراق النظرية (الاديباتية) انطلاقا من شروط تحويل حرارة الاحتراق بكاملها على تسخين نواتج الاحتراق؛ وذلك على افتراض انعدام الانتقال الحراري ، على الشكل ٨-١ يبين طابع تغير درجة الحرارة الفعلية في الموقد حسب ارتفاعه ،وذلك في شروط حدوث الانتقال الحراري ، ويتعلق المنحني بكل من شدتي اجراء الاحتراق واكتساب الحرارة من قبل انابيب المعاكس؛في منطقه الالتهاب تزيد شدة الاحتراق (اطلاق الحرارة) على شدة التبادل الحراري مع انابيب المعاكس ولهذا السبب ترتفع درجة الحرارة الفعلية الى قيمة اعظمية ϑ_{max} لها؛ثم تنخفض درجة حرارة الغازات مع الاقتراب من مخرج الموقد ،لتصل من اجل شروط محددة

الى قيمتها عند مخرج الموقد ϑ''_f



الشكل (٨-١) درجة الحرارة في حجرة الموقد

١- النظرية ٢- الفعلية

لتوصيف شروط التهاب الوقود يستعان بمفهوم الارتفاع النسبي لدرجة الحرارة الاعظمية ؛ ويتحدد كنسبة ارتفاع مستوى درجة الحرارة الاعظمية مقاسا من قعر الموقد الى الارتفاع الاجمالي للموقد مقاسا حتى وسط نافذة خروج الغازات .

تتميز المواقد بكمية الطرح الحراري (التوتر الحراري) التي تتحدد بكمية الحرارة المطروحة في واحدة حجم الموقد :

$$q_v = \frac{BQ_b^p}{V_f} \qquad kw/m^3$$

حيث V_f - حجم غرفة الموقد، m^3 .

درجة حرارة نواتج الاحتراق عند الخروج من الموقد

تقسم سطوح التسخين تبعا لشروط الانتقال الحراري الى حملية واشعاعية ، ويحمل هذا التقسيم طابعا شرطيا نظرا لتداخل الانتقالين

الحراريين المذكورين ، الا ان السطوح الاشعاعية (المعاكس) تكتسب معظم الطاقة الحرارية بالاشعاع وينطبق نفس الامر بالنسبة للسطوح الحملية .

لنعط كمية الحرارة الاشعاعية المكتسبة في المعاكس الموقدي الرمز Q_r ؛ ولكمية الحرارة المكتسبة في السطوح الحملية الرمز Q_c ؛ وبذلك تحسب كمية الحرارة المطروحة في الموقد كما يلي :

$$Q_p^p \, \zeta_{s.g} = Q_r + Q_c \qquad , \quad (1-8)$$

يؤثر توزع الحرارة بين المركبتين Q_r و Q_c تاثيرا كبيرا على تصميم واستثمار مولد البخار وعلى مؤشراته الاقتصادية ، وتتحدد النسبة Q_r/Q_c بدرجة حرارة نواتج الاحتراق عند مخرج الموقد ϑ_f'' .

تتغير قيمة مجموع سطوح التسخين الاشعاعية والحملية تبعا لتغير درجة الحرارة ϑ_f'' والسبب في ذلك اختلاف قوانين التبادل الحراري بالاشعاع والحمل ، وينتج عن ذلك اختلاف قيمة هذه السطوح مع اختلاف نسبتهما Q_r / Q_c وتغير ϑ_f'' ، ويجري اختيار قيمة ϑ_f'' بالاستناد الى الحسابات الاقتصادية التقنية ويمكن تحويل هذه المسألة الى اجراء الحسابات المتعددة الاحتمالات لكلفة مولد البخار (من اجل مختلف قيم ϑ_f'') واختيار قيم الكلفة الدنيا التي تتوافق مع قيمة ما لدرجة الحرارة ϑ_f'' .

لا يستحسن تخفيض ϑ_f'' كثيرا لانها تحدد مع قيمة درجة الحرارة

النظرية ϑ_a المستوى الحراري العام في الموقد ،فمع ارتفاع ϑ''_f يزداد الاحتراق ثباتا واستقرارا،ويحمل هذا الامر اهمية خاصة بالنسبة لمواقد احتراق الوقود الذي يطلق قليلا من المواد الطيارة ، لاغلب انواع الوقود الصلب تكون $\vartheta''_f = 1000 \div 1150$.

يمكن تحديد ϑ''_a من علاقة انتالبي نواتج الاحتراق I''_f ؛ وبعد ذلك نحدد الكمية Q_r .

المعامل الزاوي لمعاكس الموقد

يرتبط سطح المعاكس الاشعاعي H_r^{ec} مع سطح الجدار الذي يتوضع عليه المعاكس F_m^{ec} بالمعامل الزاوي للمعاكس x

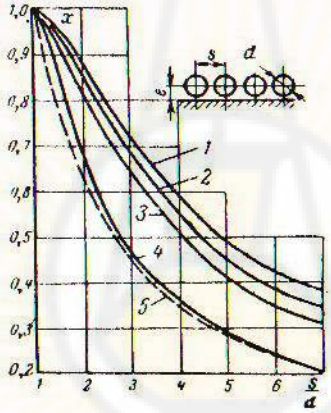
$$x = \frac{H_r^{ec}}{F_m^{ec}} \quad , (2-8)$$

يحدد المعامل الزاوي النسبة بين كميتي الحرارة التي يكتسبها المعاكس والتي يمكن ان تكتسبها السطوح المغطاة بالمعاكس فيما لو كانت منفذة من صفيحة واحدة فولاذية متواصلة ؛ وتمتلك درجة حرارة ودرجة سواد انابيب المعاكس نفسها . ويتعلق المعامل الزاوي بالمميزات التصميمية ويتحدد بالمنحني (الشكل ٨-٢) .في حالة الترصيف المتلاصق للانابيب اي مع الخطوة النسبية $S/d = 1$ يكون المعامل الزاوي $x = 1$ ؛ اي ان المعاكس يكتسب نفس كمية الحرارة التي تكتسبها الصفيحة الفولاذية الواحدة .وعندئذ :

$H_r^{ec} = F_m^{ec} = d.l.n$ (d ، l ، n قطر وطول وعدد انابيب المعاكس)، اما المساحة الهندسية لانابيب المعاكس فهي $\pi d.l.n$ اي ان المساحة الهندسية اكبر بـ π مرة

من المساحة المكتسبة للطاقة الحرارية الاشعاعية ؛ اي ان استخدام المعدن ضعيف الفعالية ، وعندما يكون $S/d = 2$ يكون عدد الانابيب هو $n/2$ (على نفس المساحة) وتتناقص مساحة المعاكس مرتين ويكون $x = 0,82$ و $H_{\gamma}^{ec} = 0,82\ d.\ell.n$ ، اى اقل فقط بنسبة 18 % بينما ينخفض استهلاك المعدن مرتين .

يؤدي تخفيض كثافة الانابيب الى تخفيض الحماية عن غطاء مولد البخار ،ويتحدد اختيار الخطوة النسبية بنوعية الوقود وطريقة احراقه وبتصميم المعاكس وانتاجية مولد البخار. تقع الخطوة النسبية المثلى لانابيب المعاكس في المجال $S/d = 1,05 \div 1,15$.



الشكل ٨ – ٢ المعامل الزاوي للمعاكس ذي الصف الواحد من الانابيب الملساء .

١ – مع تأثير اشعاع الغلاف $e/d \geq 1,4$ ؛

٢ – نفسه من اجل $e/d = 0,8$ ؛

٣ – نفسه من اجل $e/d = 0,5$ ؛

٤ – نفسه عند $e = 0$ ؛

٥ – في حال انعدام الاشعاع وعند $e/d \geq 0,5$.

درجة انعكاسية الموقد :

وتمثل بنسبة سطح الموقد الكامل المكتسب للطاقة الاشعاعية الى المساحة الاجمالية لجدران الموقد :

$$\mathcal{X} = \frac{H_r}{F_m} \qquad (3-8)$$

يتضمن سطح الموقد الغرفي الذي يطرح الرماد بشكله الصلب على السطوح المغطاة بالمعاكس وسطح نافذة خروج الغاز بالاضافة الى سطح القسم العلوي من القمع البارد . في حالة الموقد الذي يطرح الخبث السائل والمواقد التي تستعمل الوقود السائل والغازي بدلا عن القمع البارد يستعاض بقعر الموقد .

تبدو العلاقات (8 - 2 ، 8 - 3) متماثلة الا ان قيمها مختلفة فالمعامل الزاوي x يمثل فعالية استخدام جدار الموقد بالسطح المكتسب للطاقة الاشعاعية بالنسبة للتصميم المبين (الشكل ٨ – ٢) بينما تمثل $\mathcal{X}$ نفس الكمية عمليا ولكن بالنسبة لكافة سطوح الموقد التي يمكن فيها وضع سطوح اكتساب الطاقة الحرارية الاشعاعية ،ولكن حسب تصميمات مختلفة في التجهيزات ذات الاستطاعة الصغيرة لا تغطى كل جدران الموقد بأنابيب المعاكس وبذلك يكون $\mathcal{X} << x$.

معامل الفعالية الحرارية

تتعلق فعالية انابيب المعاكس بدرجة نظافتها ،فالمعاكس النظيف لا يطلق طاقة اشعاعية ،في الاستثمار يغطى المعاكس بطبقة من الرماد ،تمتلك معاملا صغيرا للتوصيل ،ويؤدي الارتفاع الكبير لدرجة

حرارة الاوساخ الخارجية الى حدوث الاشعاع المعاكس، الذي يتوجب اخذه بعين الاعتبار عند حساب التبادل الحراري الاشعاعي ، وتقدر درجة اتساخ المعاكس بالمعامل ε ، الذي يتعلق بنوع الوقود وبطريقة احراقه وبتصميم المعاكس ، فمثلا للوقود الغازي $\varepsilon = 0,65$ وللمازوت $\varepsilon = 0,55$ ، للغبار الفحمي $\varepsilon = 0,45 \div 0,4$ ولتقدير فعالية المعاكس يعرف معامل الفعالية الحرارية بنسبة كمية الحرارة التي يكتسبها المعاكس الى كمية الطاقة الاشعاعية الساقطة، ويرتبط معامل الفعالية الحرارية ψ مع معامل الاتساخ بالعلاقة :

$$\psi = \varepsilon \cdot \varepsilon \qquad (8 - 3)$$

درجة سواد الموقد

يتلقى المعاكس الطاقة الاشعاعية من الشعلات ذات درجة السواد a_f ، كما تشع اجزاء الغلاف الغير مغطاة بأنابيب المعاكس ، تشارك الاجزاء المتسخة من المعاكس في الاشعاع ، مما سبق يتوجب على درجة سواد الموقد a_t ان تعكس كافة الامور المذكورة ، ولذا تمثل بالعلاقة التالية :

$$a_t = \frac{a_f}{a_f + (1 - a_f)\psi} \qquad (8 - 4)$$

عند تقدير درجة سواد الشعلة نفسها تقسم افتراضيا الى اجزاء مضيئة واخرى مظلمة وتعطى درجة سواد الشعلة بالعلاقة :

$$a_f = m \cdot a_\ell + (1-m)\, a_s \qquad (5-8)$$

حيث :

m - معامل يعكس درجة امتلاء جوف الموقد بالجزء المضيء من الشعلة، ويتعلق بالطرح الطاقي للموقد، مثلا عندما يكون $BQ_p^p / V_f < 400 \ kw/m^3$ لشعلة الوقود الغازي $BQ_p^p / V_f 930 \ kw/m^3$ للمازوت وعند $m = 0,1$ ؛ وللوقود الغازي $m = 0,85$ ؛ لشعلة غبار الفحم $m = 1$ ؛

a_ℓ - درجة سواد الجزء المضيء من الشعلة ؛

a_s - درجة سواد الاجزاء المظلمة من الشعلة وتحسب من معطيات اشعاع الغازات ثلاثية الذرات CO_2 ، H_2O .

معادلة التبادل الحراري الاشعاعي

تتماثل قوانين التبادل الحراري الاشعاعي في غرف مولدات البخار ذات الجمل المختلفة ويميز عادة بين الحسابات التصميمية و التدقيقية .

في الحساب التصميمي تحدد مساحة التبادل الحراري الاشعاعي في غرفة الموقد بالعلاقة ذات الشكل التالي :

$$F_m = \frac{B_c \cdot Q_r}{\sigma_0 M \Psi_m \cdot a_f (\vartheta_f'' + 273)(\vartheta_a + 273)^3} X$$

$$X\sqrt{\frac{1}{M^2}\left(\frac{\vartheta_a + 273}{\vartheta_f'' + 273} - 1\right)^2} \quad ,m^2 \quad (6-8)$$

وفي حالة الحساب التدقيقي اعتمادا على القيمة المعطاة لسطح جدران الموقد تحدد درجة حرارة نواتج الاحتراق عند مخرج الموقد :

$$\vartheta_f'' = \frac{\vartheta_a + 273}{M\left[\frac{\sigma_0 \Psi_m F_m \cdot a_t (\vartheta_a + 273)^3}{\varphi B_c V C_m}\right]^{0,6}} - 273 \quad ,^\circ C \quad (7-8)$$

في العلاقات (8 - 6) و (8 - 7) استخدمت الرموز التالية :

F_m ـ المساحة الكاملة لجدران الموقد ، m^2 ؛

B_c ـ تصريف الوقود الحسابي ، Kg/sec ؛

Q_r ـ كمية الحرارة المنقولة في المعاكس ، KJ/Kg ؛

a_t ـ درجة سواد الموقد ؛

Ψ_m ـ معامل الفعالية الحرارية الوسطي لمعاكسات الموقد

ϑ_a ـ درجة الاحتراق النظرية ، $^\circ C$ ؛

ϑ_f'' ـ درجة حرارة نواتج الاحتراق عند خروجها من الموقد ؛

φ ـ معامل حفظ الحرارة ويعكس ضياع الحرارة بالتبريد ؛

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{\eta_{s.g} + q_5}$$

$\sigma_o = 5{,}67 \cdot 10^{-11}$ معامل اشعاع الجسم مطلق السواد ،

$KW/m^2 \cdot K^4$ ؛

Vc_m ـ السعة الحرارية الوسطية الاجمالية لنواتج احتراق واحد كغ من الوقود في المجال الحراري من ϑ_f'' وحتى ϑ_a :

$$Vc_m = \frac{Q_t - I_f''}{\vartheta_a - \vartheta_f''} \quad , \quad KJ/Kg \cdot degree$$

M ـ معامل حسابي يتعلق بموضع درجة الحرارة الفعلية العظمى للغازات X ويتحدد بالعلاقة :

$$M = A - BX \quad , \quad (8-8)$$

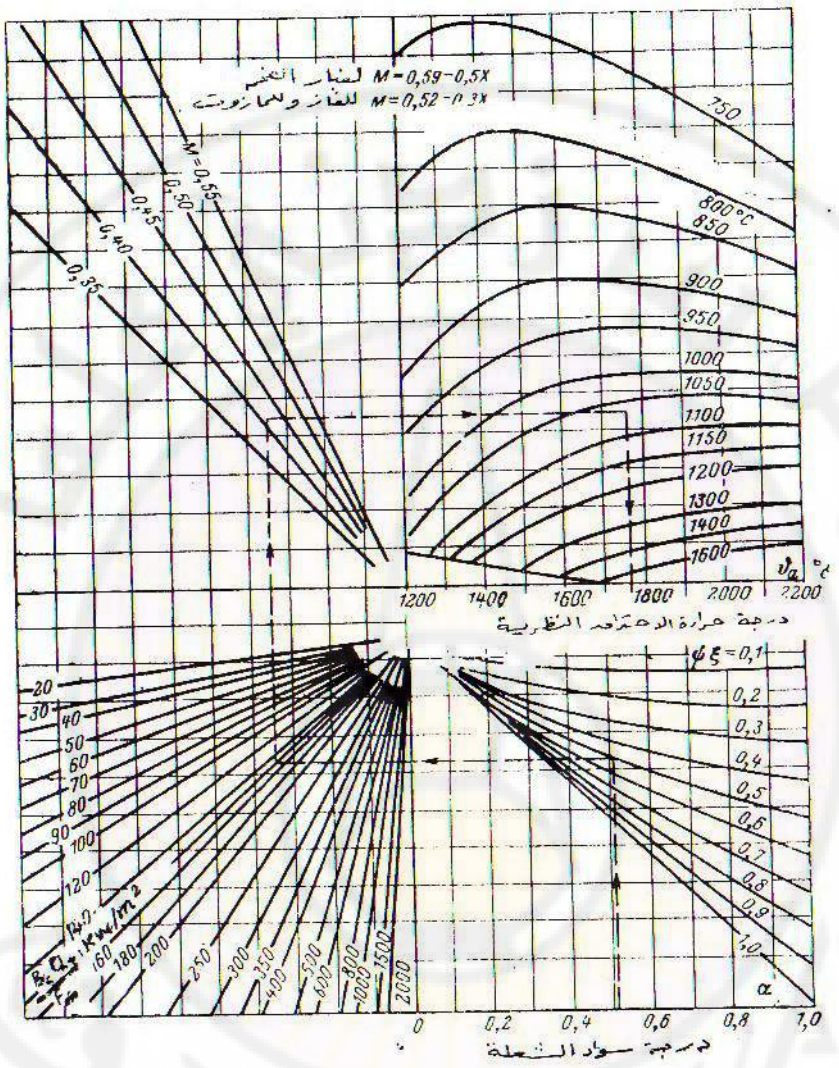
في العلاقة الاخيرة $A = 0{,}52$ ، $B = 0{,}3$ لمواقد المازوت والغاز ، $A = 0{,}59$ ، $B = 0{,}5$ لمواقد غبار الفحم .

تتحدد كمية الحرارة المفيدة في الموقد بالعلاقة :

$$Q_t = Q_p^p \cdot \frac{100 - (q_3 + q_6)}{100} + Q_a \quad , \quad (9-8)$$

حيث Q_a ـ الحرارة الداخلة الى الموقد مع الهواء لكل كغ وقود .

في الحسابات التقريبية للموقد يستخدم المخطط الوارد على الشكل ٨-٣ ولتحقيق ذلك يتوجب في البدء تعيين الكمية $B_c \cdot Q_t / F_m$.



الشكل (٨-٣) : مخطط حساب الانتقال الحراري في حجرة الموقـــــد .

٨-٢ الانتقال الحراري في سطوح التسخين الحملية .

معادلات التبادل الحراري الحملي

تعني بسطوح التسخين الحملية العناصر التالية : الفيستون ،محمص البخار الاولي ، الحزمة الحملية ، المنطقة الانتقالية ، مكرر التحميص الموفر ، مسخن الهواء ، وبغض النظر عن خصائصها الا ان جميعها تتلقى الحرارة بالحمل،ولهذا السبب تتماثل من حيث طريقة الحساب الحراري لها ، ويعتمد في ذلك على معادلات الانتقال الحراري الحملي

معادلة الانتقال الحراري :

$$Q_c = \frac{k \cdot \Delta t}{B_c} \cdot H \qquad KJ/Kg \ , \ (10-8)$$

معادلة الموازنة الحرارية :

$$Q_c = \varphi \left[I'_g - I''_g + \Delta\alpha \cdot \bar{V}_a (Ct)_{a\cdot s} \right] , KJ/kg \ . \ (11-8)$$

حيث :

Q_c ـ كمية الحرارة التي يتوجب نقلها من خلال السطح الحملي الى جسم التشغيل ، KJ/Kg ؛

H ـ سطح التسخين ، m^2 ؛

k ـ معامل الانتقال الحراري ، $Kw/m^2 . degree$ ؛

Δt ـ الضاغط الحراري الوسطي ، ^oC ؛

B_c ـ تصريف الوقود الحسابي ، Kg/sec ؛

I'_g ـ انتالبي نواتج الاحتراق عند مدخل سطح التسخين، KJ/Kg ؛

I''_g – انتالبي نواتج الاحتراق عند المخرج ، KJ/Kg ؛

$\Delta\alpha$ – تسرب الهواء الى ممر الغازات ،

كمية الحرارة المنقولة خلال سطح التسخين الحملي

في حالات سطوح التسخين التي تحددت فيها مؤشرات جسم التشغيل الدخولية والخروجية يصبح في الامكان حساب كمية الحرارة المنقولة الى الجهة المكتسبة ونعطي على ذلك مثال المحمص :

$$Q_{sc} = \frac{D}{B_c}\left(i_{sc} - i'' + q_{sc}\right), \quad KJ/kg \quad , (12-8)$$

حيث :

D – تصريف البخار المار خلال المحمص ، Kg/sec ؛

i_{sc} – انتالبي البخار المحمص ، KJ/Kg ؛

i'' – انتالبي البخار المشبع ، KJ/Kg ؛

q_{sc} – الحرارة الماخوذة من البخار في مبرد البخار ، KJ/Kg

تتالف الحرارة المكتسبة في المنطقة الانتقالية من جزئين احدهما بخري والثاني تحميصي :

$$Q_{t.z} = Q^{v}_{t.z} + Q^{sc}_{t.z} \quad , (13-8)$$

يجري الحساب الحراري لمختلف اجزاء المنطقة الانتقالية بشكل منفصل، وبحسب معامل الانتقال الحراري الوسطي لكل المنطقة الانتقالية .

الحرارة المكتسبة في الجزء البخري من المنطقة الانتقالية :

$$Q^{v}_{t.z} = \frac{D}{B_c}(1-x)\,r \quad , \; KJ/Kg \quad (14-8)$$

ومثيلتها في المنطقة التحميصية :

$$Q^{sc}_{t.z} = \frac{D}{B_c}(i''_{t.z} - i'') \quad , \; KJ/Kg \quad (15-8)$$

حيث :

x ـ حصة البخار في المزيج عند دخوله الى المنطقة الانتقالية ؛

r ـ حرارة البخر عند الضغط المتمركز في المنطقة الانتقالية ؛

$i''_{t.z}$ ـ انتالبي البخار بعد المنطقة الانتقالية المؤافق للتحميص المفترض فيها ، KJ/Kg .

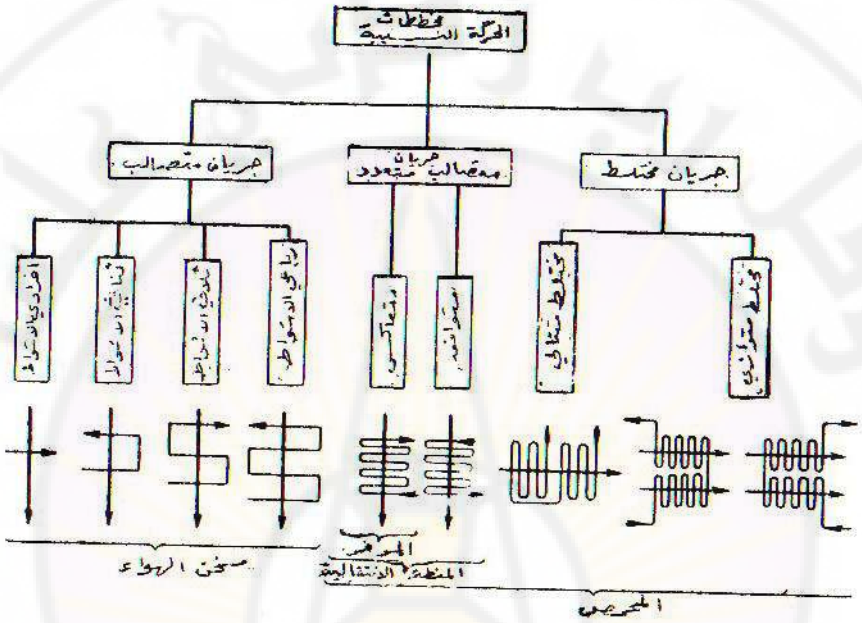
تحسب الحرارة المكتسبة في مسخن الهواء بالعلاقة :

$$Q_{ac} = \alpha_{ac} \cdot V_a^{\circ}\left[(Ct)_{ac} - (Ct)_{af}\right] \quad , \; KJ/kg \quad (16-8)$$

الضاغط الحراري

الشكل ٨-٤ يتضمن انواع الحركة المتقابلة للاجسام المسخّنة والمسخِّنة في التصميمات الشائعة. يمثل الضاغط الحراري وسطي فارق درجات الحرارة على كل سطح التسخين وذلك لكلا وسطي التسخين والتبريد، ويعطى بالنسبة لحالات الجريان التوافقي والمعاكس والمتصالب (حتى اربعة مشاوير) بالعلاقة التالية :

$$\Delta t = \frac{\Delta t_b - \Delta t_m}{2{,}3 \lg \frac{\Delta t_b}{\Delta t_m}} \quad , \quad (17-8)$$



الشكل (٨-٤) المخططات الاساسية للحركة النسبية لوسطي التسخين والتبريد في السطوح الحملية من مولدات البخار .

حيث Δt_b و Δt_m - فوارق درجات الحرارة لكلا الوسطين في اماكن سطح التسخين حيث يكون الفارق أعظميا واصغريا على الترتيب ، $^\circ C$

عندما يكون $\Delta t_b / \Delta t_m \leq 1.7$ يمكن حساب الضاغط الحراري بدقة كافية للحسابات التقنية من العلاقة التالية :

$$\Delta t = \frac{\Delta t_b + \Delta t_m}{2} \quad , \qquad (9 \cdot 17-8)$$

في حالة الجريان المتصالب عندما يكون عدد المشاوير اقل من اربعة وكذلك للجريان المختلط يحسب الضاغط الحراري بالعلاقة :

$$\Delta t = \psi \cdot \Delta t_{con} \quad , \qquad (10 \cdot 17-8)$$

حيث Δt_{con} - الضاغط الحراري المحسوب بافتراض الجريان متضادا ، $^\circ C$ ،

ψ - معامل تصحيحي يتعين من المنحنيات المستندة الى المعدلات الحسابية المتعلقة بمخطط اتجاه حركة الوسطين المتبادلين للحرارة .

يعتبر تصميم الجريان المتعاكس مفضلا لكافة سطوح التسخين في مولدات البخار ، فيما عدا انابيب توليد البخار حيث تكون درجة حرارة الوسط المسخَّن ثابتة ، والمعروف ان التصميم المتعاكس يمتلك ضاغطا حراريا اعظميا بالمقارنة مع بقية المخططات ويسمح برفع درجة حرارة الوسط المسخَّن الى حد كبير ، ولكن لايمكن دائما استخدام المخطط المتعاكس ، وذلك انطلاقا من ضرورة تأمين الوثوقية الجيدة

لعمل المبادل الحراري؛فالمحمص مثلا ينفذ حسب المخطط المختلط او المتعاكس حسب الضرورة .

معامل الانتقال الحراري

يعطى معامل الانتقال الحراري للصفيحة المتعددة الطبقات بالعلاقة التاليـــــــة :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ext}}{\lambda_{int}} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{\delta_{int}}{\lambda_{int}} + \frac{1}{\alpha_2}} \qquad (18-8)$$

حيث :

α_1 – معامل النقل الحراري من الوسط المسخّن الى الصفيحة ، $Kw/m^2.degree$ ؛

α_2 – نفس الكمية من الصفيحة الى الوسط المسخن ؛

δ_{int} ، δ_{ext} ، δ_m – على الترتيب سماكات الصفيحة والاتساخات الخارجية والداخلية ، m ؛

λ_{int} ، λ_{ext} ، λ_m – على الترتيب معاملات التوصيل للصفيحة وللاتساخات الخارجية والداخلية، $Kw/m.degree$.

تعمل مولدات البخار العصرية حسب الانظمة التي تنعدم فيها الترسبات من جهة جسم التشغيل ، ويدل وجود الترسبات في جهة الماء على خروج نظام العمل عن حدوده الاعتيادية ، ويجري الحساب الحراري على افتراض ان مولد البخار يعمل بشكل اعتيادي وهذا يعني ان $\delta_{int} / \lambda_{int} = 0$ ، وتنفذ سطوح التسخين عادة من انابيب رقيقة $\delta_m = 0,003 \div 0,006\ m$ ، ويكون معامل التوصيل كبيرا فيها

$\lambda_m = 0{,}03 \div 0{,}04$ kw/m·degree ولهذا السبب تهمل المقاومة الحرارية للصفيحة نفسها ، اي $\delta_m / \lambda_m = 0$.

والامر غير ذلك بالنسبة للاتساخات الخارجية (اى الخبث ، الرماد ، هباب الفحم ، نواتج الاكسدة) ، حيث لا يمكن اهمال مقاومتها الحرارية وذلك على الرغم من اتخاذ التدابير المتواصلة لتنظيف الانابيب في الاستثمار .

يحدث النقل الحراري من جهة غازات الاحتراق بالحمل و الاشعاع بين الانابيب ، لذا تتألف من مجموع المركبتين الاشعاعية والحملية لنسم $\alpha_1 = \alpha_r + \alpha_c$

$\varepsilon = \delta_{ext} / \lambda_{ext}$ حيث ε – معامل الاتساخ وبذا نحصل على علاقة معامل الانتقال الحراري على الشكل التالي :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_r + \alpha_c} + \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}} \quad . (19-8)$$

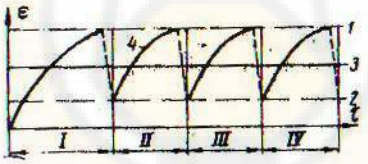
تتحدد مركبات معامل الانتقال الحراري عدا (α_c) كقيم وسطية بالنسبة لكل سطح التسخين ويتعلق معامل النقل الحراري α_c بشروط تلامس سطوح التسخين مع نواتج الاحتراق ، ولهذا يتوجب تحديد سرعة نواتج الاحتراق في مقطع المجرى الذي يكون فيه التماس فعالا بين الغازات وسطح التسخين ، الا ان هذه الطريقة غير مناسبة نظرا لاختلاف طرق تحديد (α_2 ، α_r ، α_c) ، ولذلك يستحسن تحديد α_c في المقطع الكامل حيث تأخذ قيمتها الدنيا ، ثم يجري تعديل قيمة معامل النقل الحملي α_c بمعامل نقص التلامس $\omega < 1$ ، وبذلك تأخذ علاقة معامل الانتقال الحراري الشكل التالي

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\omega\alpha_1 + \alpha_2} + \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}} \quad . \quad (28-8)$$

وللوصول بالانتقال الحراري الى قيمته العظمى يتوجب تصميم سطح التسخين على الشكل الذي يكون فيه التماس كاملا بين سطح التسخين والغاز ($\omega \to 1$) . وفي الاستثمار يتوجب مراقبة نظافة السطوح الخارجية للانابيب من الاتساخ اى بتخفيض $\varepsilon \to 0$.

يأخذ معامل التلامس قيما مختلفة بالنسبة لمختلف سطوح التسخين في الموفر مثلا يعمل في شروط جيدة ويكون $\omega = 1$ ، بينما يصعب تصميم سطوح التسخين الواقعة في ممر الغازات، الالتفافي مع معامل التلامس المقارب للواحد ، ويكون من اجلها $\omega = 0{,}7 \div 0{,}9$.

يؤدي التنظيف الخارجي لسطوح التسخين الى تخفيض مقاومتها الحرارية بشكل دوري (الشكل ٨-٥) وفي الحسابات تؤخذ القيم الوسطية لمعامل الاتساخ ، ويتعلق هذا الامر بموضع المبادل ففي



الشكل (٨-٥) : طابع اتساخ سطوح التسخين من جهة الغازات .

١- قبل التنظيف ، ٢- بعد التنظيف ، ٣- القيمة الوسطية الاستثمارية ، ٤- الاتساخ الفعلي .

I ، II ، III - ادوار عمل التجهيز بين عمليات التنظيف المتتالية.

السطوح الواقعة بالقرب من الموقد تتشكل في حالة احراق الوقود قليل الخبث طبقة رقيقة من الخبث وتكون سرعة الغازات صغيرة $5 \div 10$ m/sec ودرجة الحرارة عالية ، في الموفر تتشكل طبقة رقيقة من الرماد على الانابيب الافقية ذات الخطوة الصغيرة ويؤدي ذلك الى رداءة الانتقال الحراري .

تستعمل العلاقة (8 - 20) لحساب المحمصات في حالة الترتيب الشطرنجي للانابيب فقط وذلك في حالة احراق الوقود الطلب . في انابيب توليد البخار بما فيها الواقعة في المنطقة الانتقالية $\alpha_2 \cong 10 \div 20$ ، في الموفر $\alpha_2 \cong 3 \div 5$ $Kw/m^2.K$ فالمقاومة الحرارية $1/\alpha_2$ لهذه السطوح صغيرة جداء ويمكن اهمالها ولذلك تبسط علاقة معامل الانتقال الحراري الى الشكل التالي :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{w\alpha_c + \alpha_r} + \varepsilon} \quad , (21-8)$$

لحساب معامل الانتقال الحراري في اي من حالات ترتيب الانابيب وعند احراق المازوت والغاز وكذلك الامر عند احراق الوقود الطلب وترتيب الانابيب الكوريدوري يحدد معامل الانتقال الحراري بالاستعانة بمفهوم معامل الفعالية الحرارية :

$$k = \psi \frac{1}{\frac{1}{w\alpha_c + \alpha_r} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad , (22-8)$$

لانابيب توليد البخار وللمنطقة الانتقالية والموفر

$$k = \psi \cdot (\omega \alpha_c + \alpha_r) . \qquad (23-8)$$

عند حساب معامل الانتقال الحراري لمسخنات الهواء يهمل الانتقال الحراري الاشعاعي بسبب انخفاض درجة الحرارة النسبي ، وصغر الحجم الغازي ويجمع تأثير معامل الاتساخ ε ومعامل التلامس ω ضمن معامل واحد هو معامل الفعالية الحرارية ψ ولذلك تعطى علاقة معامل الانتقال الحراري لمسخن الهواء الانبوبي على الشكل التالي :

$$k = \psi \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad , (24-8)$$

وللمسخنات الاسترجاعية :

$$k = \psi \Pi \frac{1}{\frac{1}{x_1 \alpha_1} + \frac{1}{x_2 \alpha_2}} \quad . (25-8)$$

حيث :

$x_1 = \frac{H_g}{H} = \frac{F_g}{F}$ – حصة سطح التسخين او المقطع المتلامس مع نواتج الاحتراق ؛

$x_2 = \frac{H_a}{H} = \frac{F_a}{F}$ – حصة سطح التسخين او المقطع المتلامس مع الهواء ؛

Π – معامل يعكس عدم الاستقرار الزمني في التبادل الحراري، عند عدد دورات

الدوار 180 ٪ n دورة في الدقيقة

يكون $\eta = 1$.

تتقارب قيمة α_1 و α_2 بالنسبة لمسخن الهواء ،في النوع الانبوبي تكون $\psi = 0,8 \div 0,85$ وذلك عند احراق كافة انواع الوقود ، في المسخن الاسترجاعي $\psi = 0,9$.

تتعلق معاملات النقل الحراري α_1 ، α_2 في كافة سطوح التسخين بسرعة الجريان ، وتزداد مع ازديادها ، وهذا يؤدي الى انخفاض سطوح التسخين وذلك ضمن الشروط الاخرى المتماثلة .

اختيار سرعة غازات الاحتراق

تؤدي زيادة سرعة غازات الاحتراق الى رفع شدة التبادل الحراري الحملي الا ان زيادة السرعة تترافق مع ازدياد للمقاومة الهيدروليكية وارتفاع مصروف الطاقة للتغلب على هذه المقاومة ، لاتؤثر الشروط الحرارية تأثيرا كبيرا في اختيار سرعة الجريان ، حيث يزداد معامل النقل الحراري الاشعاعي α_r مع ارتفاع درجة حرارة الغازات وازدياد حجم الغازات ، ولهذا السبب يكون التبادل الحراري الاشعاعي بين الانابيب في سطح (الفيستون) ملموسا نظرا لارتفاع درجة حرارة الغازات ($1000 \div 1100$ °C) ولكبر حجمها ايضا بسبب كبر خطوة الانابيب . في هذه الشروط يصبح تكبير سرعة الغازات على حساب تصغير حجمها امرا غير ذي فائدة .

في منطقة الموفر ومسخن الهواء يصبح التبادل الحراري الاشعاعي صغيرا بسبب انخفاض درجة الحرارة نسبيا ، ويصبح تكبير سرعة جريان

الغازات امرا مفيدا ، وهذا يعني عمليا انه يتوجب تنفيذ جملة الانابيب مع خطوة مكثفة ، تظهر نسبة طرح الرماد في الوقود تأثيرا على اختيار سرعة الجريان ،ويطرح مع غازات الاحتراق حوالي 85÷90% من رماد الوقود في طريقة احراق الوقود الصلب الغرفية والتي يطرح فيها الرماد بشكله الصلب ايضا ، ولهذا السبب تحدد سرعة غازات الاحتراق بشروط منع اهتراء سطوح التسخين بالرماد واعتمادا على تأثير مختلف العوامل تؤخذ سرعة الجريان قريبة من 10 m/sec في حالة الجريان المعامد لمحور الانابيب ، وفي حالة الجريان الطولي بالنسبة للانابيب حتى 13 m/sec ، وعند احراق المازوت والغاز وفي حالة طرح الرماد السائل تؤخذ سرعة الجريان الغازي اكبر من ذلك بقليل .

نختار سرعة الهواء في مسخنه انطلاقا من شرط المساواة التقريبية بين α_1 و α_2 .في مسخن الهواء الانبوبي حيث يمر الهواء معارضا لمحور الانابيب وتمر الغازات حسب طول الانابيب،تكون نسبة سرعة الهواء الى الغازات مساوية $w_a / w_g \approx 0,4 \div 0,6$ ومن غير المفيد زيادة سرعة احد الجريانين لان ذلك يؤدي الى زيادة الطاقة المبذولة لعمل مروحة التهوية (في حالة الهواء) ومروحة الامتصاص (في حالة الغازات) دون تحقيق زيادة مفيدة للانتقال الحراري .

في مسخنات الهواء الاسترجاعية حيث يمر كل من الغازات والهواء طوليا بالنسبة لسطح التسخين تؤخذ النسبة $w_a / w_g \approx 0,7 \div 0,9$.

سرعة البخار

تؤخذ سرعة البخار في المحمصات انطلاقا من شروط التبريد المضمون

للمعدن ، والمعلوم ان معدن المحمص يعمل في شروط حدية من حيث درجة حرارة تسيب المعدن ، ولتحقيق التبريد الفعال يتوجب تأمين السرعة الكافية للبخار ، ففي حالة الضغط المتوسط تؤخذ السرعة $w_s = 15 \div 25$ m/sec وفي حالة الضغط العالي $w_s = 8 \div 15$ m/sec .

٨-٣ الانتقال الحراري في سطوح التسخين الستائرية (para vent)

تستعمل سطوح التسخين الستائرية عادة كمحمصات للبخار وهي تعمل ضمن شروط التسخين الشديد وتتلقى الحرارة بالاشعاع من الموقد $Q_{r.p}$ وبالحمل مع الاخذ بعين الاعتبار الاشعاع الحادث بين الانابيب $Q_{c.p}$

تحسب الستائر باعتبارها سطوح تبادل نصف اشعاعية ، وتفترض في البدء حصة الستائر δ_p من الحرارة الاجمالية المكتسبة بالمحمص Δi_{sc} :

$$\Delta i_p = \delta_p \cdot \Delta i_{sc} \quad , \text{ KJ/kg} , \quad (26-8)$$

انتالبي البخار عند خروجه من الستائر :

$$i''_p = i'_p + \Delta i_p \quad , \text{ KJ/Kg} , \quad (27-8)$$

تحدد الطاقة الحرارية الكاملة المكتسبة في الستائر لكل واحد وقود من معادلة الميزانية الحرارية :

$$Q^b_p = \frac{D \cdot \Delta i_p}{B_c} = Q_{r.p} + Q^b_{c.p} \quad , \text{ KJ/Kg} , \quad (28-8)$$

ومنه يكون لدينا :

$$Q^{b}_{c.p} = Q^{b}_{p} - Q_{r.p} \quad , KJ/Kg \qquad , (29-8)$$

تحسب كمية الحرارة الاشعاعية المنقولة الى الستائر الواقعة فوق الموقد مع الاخذ بعين الاعتبار الاشعاع المنقول من الموقد الى سطوح التسخين التالية كما يلي :

$$Q_{r.p} = y\left(\frac{Q_r}{H_r}\right)\left[1 - x_{t.p}\cdot(1-a)\right] X$$
$$X\ H_{r.p}\cdot\varepsilon_p\cdot\frac{1}{Be} \quad , KJ/Kg \quad , (30-8)$$

حيث :

y – معامل توزيع التدفقات الحرارية النسبية حسب ارتفاع حجرة الموقد ، لمنطقة توضع الستائر في مواقد غبار الفحم $y = 0,6 \div 0,9$ لمواقد المازوت والغاز $y = 0,6 \div 0,8$

a – درجة سواد الجريان المغبر في منطقة الستائر ؛

$H_{r.p}\cdot\varepsilon_p$ – سطح الستائر الفعال المكتسب للحرارة الاشعاعية ، m^2 ؛

Q_r/H_r – الحمولة الحرارية الوسطية للمعاكس ، KW/m^2 ؛

$x_{t.p}$ – المعامل الزاوي من الموقد على السطح الذي يلي الستائر .

$$x_{t.p} = \sqrt{\left(\frac{c}{b}\right)^2 + 1} - \frac{c}{b} \qquad , (31-8)$$

حيث :

b – المسافة بين الستائر المتجاورة ، m ؛

c – عمق الستائر حسب حركة نواتج الاحتراق ، m .

اعتمادا على البند ٨-٢ تحسب كمية الحرارة المنقولة بالحمل مع حساب الاشعاع ما بين الانابيب $Q^{t}_{c.p}$ (العلاقة 8 - 10) وتحدد المساحة الحسابية للستائر $H_{c.p}$ التي تشارك في التبادل الحراري الحملي كما يلي :

$$H_{cp} = H_p - H_{r.p} \quad m^2 \quad (32 - 8)$$

تتحدد المساحة الكاملة للستائر H_p بالعلاقة :

$$H_p = \pi \, d \, \ell \, . \, n \, . \, z \quad . \quad m^2 \quad (33 - 8)$$

حيث :

ℓ ـ طول انبوبة واحدة من الستائر ، m ؛

$H_{r.p}$ ـ مساحة الستائر المكتسبة للحرارة اشعاعيا ، m^2 ؛

n ـ عدد الانابيب في قطعة الستائر ؛

Z ـ عدد الستائر .

تتحدد مساحة الستائر المكتسبة للطاقة الاشعاعية عند الخطوة النسبية $S_2 / d \leq 1.1$ بمثلي السطح المار من خلال محور انابيب الستائر والمحدد بالمولدات الخارجية للانابيب الطرفية ، عند $S_2 / d > 1.1$ يتوجب حساب المعامل الزاوي x (الشكل ٨-٢) . في هذه الحالة $H_{r.p} = 2 \, H_m \cdot x$ ويعتبر الحساب منتهيا اذا لم يزد الفرق بالكميات $Q^{t}_{c.p}$ و $Q^{b}_{c.p}$ عن 2 % واذا لم يتحقق ذلك تفترض قيمة جديدة δ_p ويعاد الحساب .

٨-٤ مسائل وطرق وتسلسل الحساب الحراري

مسائل وطرق الحساب الحراري لمولد البخار

يميز عادة بين الحساب التصميمي والحساب التدقيقي ، وتعتبر طريقتهما واحدة ، انما يكمن الاختلاف في اهداف الحساب وفي الكميات المقصودة فيه .

الحساب التصميمي : ويستهدف تحديد ابعاد الموقد وسطوح التسخين وذلك ضمن المستوى الاقتصادي المفترض والوثوقية التي تضمن الحصول على الانتاجية الاسمية عند القيم المفترضة لكل من مؤشرات البخار ودرجة حرارة مياه التغذية والوقود .

نتيجة للحساب الحراري نحصل على المعطيات اللازمة لاجراء حساب المتانة ولاختيار مواد عناصر مولد البخار ، ولتنفيذ الحسابات الهيدروليكية والايروديناميكية ومن ثم اختيار المعدات المساعدة .

تحتوي المهمة التصميمية اللازمة للحساب التصميمي (المعطيات) المؤشرات الاساسية التالية :

نوع واستطاعة مولد البخار ، مؤشرات البخار الاولي ، تصريف ومؤشرات بخار التحميص المكرر ، معطيات حساب جملة تحضير غبارالفحم درجة حرارة مياه التغذية ، مميزات الوقود ، وقد تضاف معطيات اخرى منها : طريقة احراق الوقود ، درجة حرارة تسخين الهواء وتصريف المياه زائدة الملوحة .

الحساب التدقيقي

ينفذ بعد اعداد الحساب التصميمي ، ويستهدف حساب ما يلي : درجات

حرارة المياه والبخار ونواتج الاحتراق عند حدود سطوح التسخين ، مردود مولد البخار ، تصريف الوقود وكمية نواتج الاحتراق ،ويستند الحساب التدقيقي على معطيات الحساب التصميمي ، ويمكننا من تحديد اقتصادية ودرجة وثوقية مولد البخار كما تعد بنتيجته الارشادات اللازمة لاعادة التصميم ، ونحصل على المعطيات اللازمة لاجراء الحسابات الهيدروليكية والايروديناميكية ولحسابات المتانة .

ولتنفيذ الحساب التدقيقي يتوجب الحصول على ما يلي : مخططات مولد البخار الواصفة لتصميمه ولابعاد الموقد ،ولكافة سطوح التسخين ولممرات الغازات ، معطيات عن جملة اعداد الوقود ، درجة حرارة مياه التغذية ، تصريف المياه زائدة الملوحة .

يستخدم الحساب التدقيقي في حالات مقارنة معطيات الحسابات مع المؤشرات الاستثمارية لعمل مولد البخار ، وعند اعادة تصميمه او تغيير نوع الوقود المستخدم ، وعند عمله على حمولة مختلفة عن الحمولة الاسمية .

تسلسل الحساب التصميمي الحراري لمولد البخار ذي الطة لمولد البخار ذي الطة (الشكل ٨-٦) :

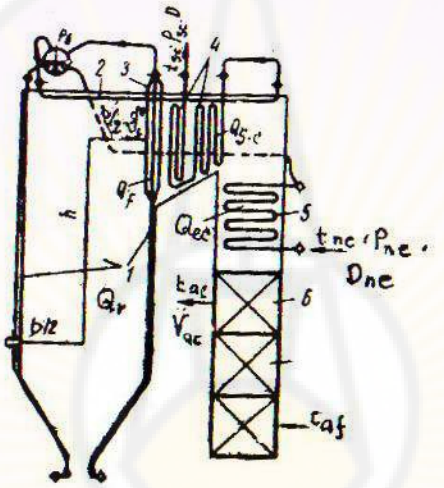
١- يحسب حجم الهواء اللازم نظريا للاحتراق وحجم نواتج الاحتراق (البند ٢-٥) ؛

٢- يحسب الحجم الفعلي لهواء و نواتج الاحتراق في الموقد وفي ممرات الغازات مع الاخذ بعين الاعتبار التسربات الحادثة في ممرر الغازات (البند ٢-٦) ؛

٣- يحسب انتالبي نواتج الاحتراق والهواء (البند ٢-٧)

٤- تشكل الميزانية الحرارية لمولد البخار وتحدد الضياعات الحرارية q_{v_2} ، q_{v_3} ، q_{v_4} ، q_{v_5} . ويحسب المردود القائم ومصروف الوقود (البند ٣- ٧) ؛

٥- يجري حساب الموقد حسب البند ٨-١ ، واعتمادا على درجة الحرارة ϑ''_f التي جرى اختيارها يحدد السطح الكامل لجدران الموقد F_m وفي حالة وجود المعاكسات ثنائية الاضاءة والستائر يتوجب حساب ازدواجية الاضاءة فيها .



الشكل (٨-٦) المخطط الحسابي للمولد ذي الطة.

١- سطوح التسخين البخرية ، ٢- المحمص السقفي ،
٣- الفيستون ، ٤- المحمص الحملي ، ٥- الموفر ،
٦- مسخن الهواء .

٦ يجري اختتام الحساب بالتحقق مما يلي :

آـ عدم زيادة الطرح الحراري في الموقد $q_{v_c} = BQ_p^{\circ} \gamma v_f$ عن القيم الحدية المسموح بها .

ب ـ تطابق درجة الانعكاسية $\chi = H_r / F_m$ الحاصلة نتيجة للحساب مع القيمة المفترضة ويجب ان لايزيد الفارق بينهما عن $\pm 0,05$ ؛

ج ـ طول الشعلة الذى يساوي $h+b$ (الشكل ٨ـ٦)

٧ـ يأخذ حساب التبادل الحراري في غرفة الموقد بعين الاعتبار كمية الحرارة التي يستهلكها ما يسمى الفيستون ـ وهو السطح المجاور للموقد ، ونتيجة لذلك تكون ابعاد الفيستون المشكل من انابيب المعاكس الظفي معلومة ، ويمكن الحساب التدقيقي المجرى لسطح الفيستون من تحديد سطحه H_{fc} واعتمادا على كمية السطح تحسب كمية الحرارة Q_{fc} التي يكتسبها ودرجة حرارة نواتج الاحتراق خلف سطح الفيستون ϑ'_{fc} ، وبالنسبة للمخطط الوارد على الشكل ٨ـ٦ تتساوى درجة الحرارة المذكورة مع درجة حرارة نواتج الاحتراق قبل المحمص ϑ'_{sc}

٨ـ تتوزع الطاقة الحرارية للنواتج الاحتراق المتبقية بين سطوح التسخين الحملية لمسار الماء والبخار وعلى مسخن الهواء حسب الميزانية الحرارية (8 - 34) ،ويجرى لهذه السطوح الحساب التصميمي ، في البدء تتوزع الحرارة ما بين السطوح التي تكون فيها مؤشرات جسم المستقبل الدخولية والخروجية معلومة (معطاة) ، اعتمادا على البند ٨ـ٢ تحدد كمية الحرارة التي يتوجب نقلها

الى المحمص Q_{sc} للوصول بحالة البخار الى المؤشرات المعطاة $(D \cdot P_{sc} \cdot t_{sc})$ ؛ وفي مسخن الهواء Q_{ac} $(V_{ac} \cdot t_{ac})$ ،

٩- يختتم توزيع الحرارة بمعرفة كمية الحرارة التي يكتسبها الموفر علما بأن المؤشرات الخروجية للموفر تكون غير معلومة ، وبعد معرفة كميات الحرارة المكتسبة في المحمص ومسخن الهواء تصبح درجة حرارة غازات الاحتراق قبل وبعد الموفر معلومة وتحسب كمية الحرارة المنقولة الى الموفر بالعلاقة (8 - 11) ؛

١٠- في حالة وجود مسخنات الهواء والموفرات ثنائية المراحل تحسب على الترتيب المرحلة الاولى من مسخن الهواء ثم المرحلة الثانية ثم تحسب مراحل الموفر الاولى والثانية على الترتيب .

١١- يجرى التحقق من صحة توزيع الحرارة بين سطوح التسخين بمساعدة معادلة الميزانية الحرارية :

$$Q_p^p \cdot \eta_{s.g} = \left(Q_r + Q_f + Q_{sc} + Q_{ec} \right) \frac{100 - q_4}{100} \cdot \quad (84-8)$$

ويتوجب الا يزيد عدم التطابق في المعادلة السابقة عن ٥٫٥٪ من الطاقة الحرارية المستحوذة Q_p^f .

١٢- بعد الاقتناع من صحة توزيع الحرارة بين سطوح التسخين ينفذ الحساب التصميمي للمحمص وللموفر ولمسخن الهواء تبعا لارشادات البند ٨-٢ .

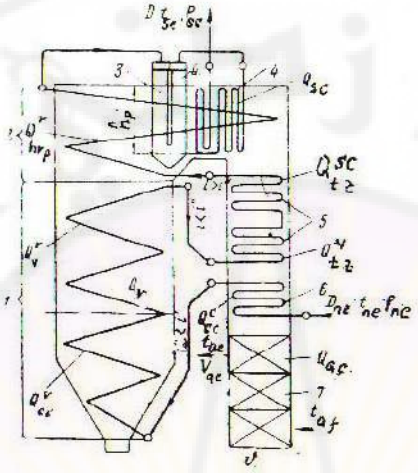
خصائص حساب مولد البخار ذي الجريان المباشر

سندرس موضوع خصائص حساب مولد البخار ذي الجريان المباشر بالنسبة للمخطط الوارد على الشكل ٨-٧

بسبب انعدام الحلة في هذا المخطط تزول المناطق المحددة لحالة جسم التشغيل الترموديناميكية، وتؤخذ هذه الخاصية بعين الاعتبار عند تحديد مؤشرات التحول الطوري لجسم التشغيل .

ينفذ الموفر الحملي بشكل لا تصل حالة الماء فيه الى مستوى الغليان، والهدف من ذلك كما هو معلوم زيادة وثوقية عمل انابيب توليد البخار، ولهذا السبب يتوضع الجزء الخروجي من الموفر في الجزء السفلي من الموقد ، حيث يتلقى الحرارة بالاشعاع ، ويتعلق نقص التسخين في الجزء الحملي من الموفر بالضغط ، فمع ارتفاع الاخير ينخفض مقدار نقص التسخين حتى الغليان ، ويشكل بالنسبة لمولد البخار ذي الضغط المجاور للقيم الحرجة كمية لاتقل عن 200 ÷ 120 KJ/Kg ، في التصميم المبين يقوم الجزء الخروجي من قسم الاشعاع السفلي بوظيفة انابيب توليد البخار الواقعة قبل منطقة الترسيب .

في الحسابات تفترض نسبة احتواء البخار عند الدخول الى المنطقة الانتقالية مساوية 0,85 ÷ 0,7 ، في المنطقة الانتقالية يتبخر الجزء المائي من المزيج البخاري المائي بشكل كامل ، ويتحمص البخار الناتج فوق درجة حرارة الاشباع بما لايقل عن 20 °C ، ويصل البخار لحالة التحميص النهائية في المحمص الاشعاعي الواقع في الجزء العلوي من الموقد (القسم الاشعاعي العلوي) وفي المحمص الحملي وفي الستائر الواقعة بين المحمصين المذكورين .



الشكل (٨–٧) : المخطط الحسابي لمولد الجريان المباشر

١– القسم الاشعاعي السفلي ، ٢– القسم الاشعاعي العلوي ،

٣– الستائر ، ٤– المحمص الحملي ، ٥ – المنطفة

الانتقالية ، ٦– الموفر ، ٧– مسخن الهواء .

ينخفض ضغط جسم التشغيل في مولدات البخار ذات الجريان المباشر باستمرار مع حركته ضمن المسار المائي البخاري وتصل قيمة الضغط عند خروج البخار من المحمص الى القيمة الحسابية ، وتصل قيمة هبوط الضغط في المسار المذكور الى ٣٥ °/o من قيمة ضغط البخار المحمص .

عند ضغط البخار 140 bar يتوزع هبوط الضغط على الشكل التالي : الموفر ~ 2١°/o ، القسم الاشعاعي السفلي ~ 6 °/o ، قسم

الاشعاع المتوسط ~ 3 %، المنطقة الانتقالية ~ 5 %

قسم الاشعاع العلوي والمحمص السقفي ~ 6 %، المحمص الحملي ~ 8 % في مولدات البخار ذات الضغط فوق الحرج $\Delta P = 35 \div 40$ bar.

تحتسب كمية الحرارة تبعا لتوزيعها على المسار المائي البخاري ويؤخذ هنا بعين الاعتبار هبوط الضغط على طول المسار، وتستعمل لذلك العلاقات التالية :

اسم عنصر المسار	العلاقة kJ/Kg
الموفر الحملي	$Q^{c}_{ec} = (i''_{ec} - i_{ne}) \cdot D / B_c$
القسم الوفري بين (ق ،ش ،س)	$Q^{r}_{ec} = (i' - i''_{ec}) \cdot D / B_c$
الجزء البخري من (ق ،ش ،س)	$Q^{r}_{v} = rx \cdot D / B_c$
القسم البخري من المنطقة الانتقالية	$Q^{v}_{tz} = (1-x) \cdot r \cdot D / B_c$
القسم التحميصي من المنطقة الانتقالية	$Q^{sc}_{tz} = (i''_{tz} - i'') \; D / B_c$
الستائر (الحرارة الاشعاعية)	$Q^{r}_{p} = y_p \cdot Q_r \cdot H^{r}_{p} / H_r$
الستائر (الحرارة الحملية والاشعاعية)	$Q_p = Q^{r}_{p} + Q^{c}_{p}$

المحمص الحملي (حرارة اشعاعية من الموقد)	$Q^r_{sc} = y_p \cdot Q_r \cdot h_p \cdot a / Hr - Q^r_p$
القسم الاشعاعي العلوي (ق،ش ، ع)	$Q^r_{hr.p} = Q_r - (Q^r_{ec} + Q^r_v + Q^r_p + Q^r_{sc})$
المحمص الحملي (حرارة حملية من ممر الغازات)	$Q^c_{sc} = Q_1 - (Q^c_{ec} + Q^r_{ec} + Q^v_{t.z} + Q^{s.c}_{t.z} + Q_p + Q^r_{sc} + Q^r_{hrp})$

يتماثل الحساب الحراري لمولـــــــد الجريان المباشر مع طريقة الحساب المبينة لمولد البخار ذي الطة فيما يتعلق بتحديد حجم الهواء ، نواتج الاحتراق وانتالبيها وحساب الضياعات الحرارية ، ومصروف الوقود وحساب التبادل الحراري في الموقد .

في العلاقات السابقة وردت الرموز التالية

i''_{tz} – انتالبي البخار المحمص خلف المنطقة الانتقالية ، KJ/kg ؛

H^r_p – سطح الستائر الاشعاعي ، m^2 ؛

H_r – السطح الاشعاعي الاجمالي للموقد ، m^2 ؛

a – عرض الموقد ، m ؛

y_p – معامل توزيع التدفقات الحرارية .

يجري التحقق من توزيع الحرارة بين سطوح التسخين بمساعدة معادلة الميزانية الحرارية

$$Q_p^p \cdot \eta_{sg} = (Q_{ec}^c + Q_{ec}^r + Q_v^r + Q_{tz}^v + Q_{tz}^{sc} +$$

$$+ Q_{hrp}^r + Q_p + Q_{sc}^r + Q_{sc}^c) \cdot \frac{100 - w_4}{100} \cdot \quad kJ/kg \quad (35-8)$$

ويسمح بعدم التطابق بحدود ٠٫٥ ٪ من الحرارة الداخلة، الخطوة التالية هي اجراء الحساب التصميمي تبعا للطريقة الواردة في البند ٨-٢ ٠

الفصـــــــــــــــل التاســـــــــــــــع

معدات المســـــار الهوائي الغازي واقـــــلاع مولد البخار

٩-١ المسار الهوائي الغازي واختيار مراوح التهوية والامتصاص

يتألف المسار الغازي الهوائي من مجموعة عناصر منشأة توليد البخـــــار ، التي يسير فيها كل من هواء الاحتراق (المسار الهوائي) وغازات الاحتراق (المسار الغازي) ويتضمن مسار الهواء على مراوح التهوية التي تقوم بدفع الهواء الخارجي الى الموقد ، وتقـــوم مروحة الامتصاص بسحب غازات الاحتراق منه ، ويقوم كل من مروحة التهوية والامتصاص باكساب الهواء وغازات الاحتراق بفرق الضغوط الكاملة اللازم للتغلب على مختلف المقاومات الهيدروليكية الواقعة في مسارهمـــا ويعطى فرق الضغوط الكاملة بالعلاقة التالية :

$$\Delta H_c = \Delta h - h_m \quad , \quad P_c \quad , \quad (٩-١)$$

حيث :

Δh – المقاومة الهيدروليكية للمسار ، P_c ؛

h_m – السحب الذاتي ويعطى بالعلاقة :

$$h_m = (z_2 - z_1)(\rho_a - \rho)\, g \qquad P_c \,،\, (2-9)$$

$z_2 ، z_1$ – المستويات الجيوديزية لبداية ونهاية مسار الغازات حسب اتجاه الحركة ؛

$\rho ، \rho_a$ – كثافة الوسط المنقول والهواء الخارجي ، Kg/m^3 ،

g – تسارع الجاذبية الارضية $g = 9,81\ m/sec^2$.

تحسب المقاومات الاحتكاكية والموضعية بعلاقات من الشكل التالي :

$$\Delta P_f = \lambda \frac{\ell}{d_{eq}} \cdot \rho \frac{w^2}{2} \,،\, P_c \,،\, (3-9)$$

$$\Delta P_m = \xi \cdot \rho \frac{w^2}{2} \,،\, P_c \,،\, (4-9)$$

حيث :

λ – معامل المقاومة الاحتكاكية ؛

ℓ – طول جزء المسار ، m ،

d_{eq} – القطر المكافيء ، m ؛

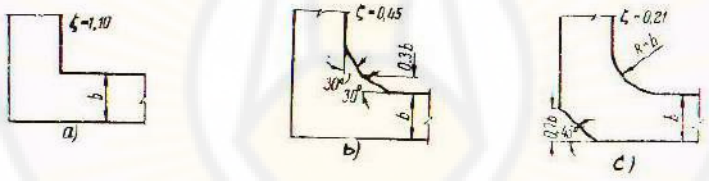
ρ – الكثافة الوسطية لجسم التشغيل ، Kg/m^3 ؛

w – السرعة الوسطية ، m/sec ؛

ξ – معامل المقاومة الموضعية .

تبذل على تدوير المراوح طاقة كهربائية كبيرة تشكل احدى اكبر مركبات الاستهلاك الكهربائي الذاتي ، وللتخفيف من الاستهلاك المذكور

يتوجب تخفيف الضياعات الهيدروليكية المختلفة ويتم ذلك عن طريق استخدام العناصر والمسارات ذات المقاومة الاخفض، والشكل ٩-١ يبين مثالا لمختلف اشكال تنفيذ مسار الغازات ويتميز المخطط (٩-١،ج) بانخفاض مقاومته الموضعية وتشكل المسخنات الحملية (المحمص الحملي ، المنطقة الانتقالية ، الموفر ، مسخن الهواء) اكثر المقاومات الهيدروليكية كبرا على مسار غازات الاحتراق ، ويمكن تخفيض المقاومة الاجمالية للمسار عن طريق تصغير السرعة الوسطية للغازات ، الا ان ذلك سيزيد من حجوم الممرات الغازية ومن استهلاك المعدن النسبي من اجل استطاعة واحدة) ، ولتحديد السرعة المثلى تحسب المصاريف لعدة سرعات متوقعة وتتوافق السرعة المثلى مع المصاريف الحسابية الصغرى .



الشكل (٩-١) : احتمالات تنفيذ التفاف ممر الغازات بزاوية 90° .

تجر مروحة الامتصاص غازات الاحتراق مشكلة بعض التخلخل في اعلى الموقد (P_c 20÷40) ؛ ويحول التخلخل المذكور دون تسرب غازات الاحتراق الى خارج مولد البخار ، وفي حالة الغاء مروحة

تعليل

الامتصاص من المخطط يتطلب من غلاف الموقد ان يكون محكما دون شقوق لان ضغط الغازات في هذه الحالة يزيد عن الضغط الجوي ، والدفع سيحدث في مروحة التهوية فقط .

ينتهي مسار غازات الاحتراق بالمدخنة التي تشكل ما يسمى بالسحب الطبيعي للمدخنة ،وللمدخنة وظيفة اخرى هي ابعاد غازات الاحتراق وتوزيعها ضمن دائرة كبيرة لتامين حماية البيئة المجاورة .

تنفذ المداخن من الاجر للارتفاعات التي لاتزيد عن 80 m ، ويتميز الاجر بمقاومته للاهتزازات الحرارية وبانخفاض التكاليف ، ويستعمل البيتون المسلح للارتفاعات العالية ، في بعض الاحيان تستعمل المداخن الفولاذية الرخيصة الثمن والسريعة الانشاء ، اما عيوب المداخن الفولاذية فتنحصر في ضعف مقاومتها تجاه تأثير الغازات الكبريتية .

حساب استطاعة وانتاجية مراوح الامتصاص والتهوية

ا- مروحة الامتصاص

تعطى استطاعة محرك مروحة الامتصاص N_f بالعلاقة التالية :

$$N_f = \frac{V_f \cdot H_f \cdot \beta_3 \cdot 10^{-3}}{\eta_f} \cdot K_w \quad , (5-9)$$

حيث :

H_f – التخلخل المتشكل في مروحة الامتصاص ويساوي :

$$H_f = (\Delta H_c + \Delta h_v) \cdot \beta_2 \cdot P_c \quad , \quad (6-9)$$

Δh_v ـ التخلخل المتمركز في اعلى الموقد ، P_c ؛

V_f ـ انتاجية مروحة الامتصاص وتعطى بالعلاقة التالية :

$$V_f = \frac{V_g \cdot B_c \cdot T_{f,p} \cdot \beta_1}{273} \quad , \quad m^3/sec \quad , \quad (7-9)$$

β_3 ، β_2 ، β_1 ـ معاملات الاحتياط بالانتاجية والتخلخل المتشكل والاستطاعة

$\beta_1 = 1,01 \div 1,1$ ، $\beta_2 = 1,1 \div 1,2$ ، $\beta_3 = 1,1$.

V_g ـ كمية غـــازات الاحتراق ، m^3/kg ، m^3/m^3 ؛

B_c ـ مصروف الوقود الحسابي m^3/sec او Kg/sec ؛

T_{fp} ـ درجة حرارة الغازات عند مدخل المدخنة ، K ؛

η_f ـ مردود مروحة الامتصاص .

ا ـ مروحة التهوية

يحسب الضاغط الهوائي المتشكل في مروحة التهوية بالاستناد علـــى الحساب الايروديناميكي لمسار الهواء (ممرات الهواء ،مسخن الهواء الحراقات .... الخ) ويؤخذ الضاغط الاعظمي اكبر بنسبة $\beta_2 = 1,1$ ، 10% .

- ان مروحة التهوية بالعلاقة التالية :

$$N_a = \frac{V_a \cdot H_a \cdot \beta_3 \cdot 10^3}{\eta_a} \quad , \text{ KW} \quad , \qquad (8-9)$$

حيث :

H_a – ضاغط مروحة التهوية ،

$$H_a = \Delta H \cdot \beta_2 \quad , \text{ Pa} \qquad (9-9)$$

η_a – مردود مروحة التهوية

V_a – انتاجية المروحة m^3/sec وتحسب بالعلاقة التالية :

$$V_a = \beta_1 \cdot V_a^{\circ} (\alpha + \Delta\alpha) B_c \cdot \frac{T_a}{273} \cdot \frac{760.133}{H_b} \quad , \qquad (10-9)$$

$\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3$ – معاملات الاحتياط لكل من الانتاجية V_a ضاغط المروحة والاستطاعة $\beta_1 = 1.05$ ، $\beta_2 = \beta_3 = 1.1$ ؛

α' – معامل فائض الهواء

$\Delta\alpha$ – التسرب من مسار الهواء ويقبل مساويا التسرب الى الطرف الغازي $\Delta\alpha_{ac}$.

T_a – درجة حرارة الهواء قبل المروحة ، K ؛

H_b – الضغط البارومتري ، P_a .

٩-٢ حماية سطوح التسخين من الترسبات ولواقط الرماد

أ- اتساخ سطوح التسخين

تتسخ سطوح المعاكس بالخبث مع استمرار الاستثمار ،كما ويترسب الرماد وهباب الفحم على سطوح التسخين الحملية ،ونتيجة لذلك تنخفض الطاقة الحرارية المكتسبة في المعاكس وترتفع درجة حرارة الغازات الخارجة من الموقد وتخرق الانظمة الهيدروديناميكية الاعتيادية ، ويمكن لكتل الخبث المتنامية على سطوح المعاكس ان تسقط ملحقة الضرر بأنابيب اخرى واقعة في اسفل الموقد .

يشكل الرماد والهباب المترسب على السطوح الحملية طبقات عازلة لها تخفض من الانتقال الحراري ،وتزيد من المقاومة الهيدروليكية لمسار الغازات وتسرع الجريان الغازي في مواضع معينة مما يزيد من اهتراء سطوح التسخين .

يتطلب الاستثمار الرشيد لعمل مولد البخار ازالة ترسبات الخبث والرماد والهباب باستمرار وذلك لحماية سطوح التسخين من الاهتراء والعمل على النظام الاقتصادي الامثل،وتستعمل اجهزة خاصة تقوم برش البخار او الماء او كلاهما معا على سطوح المعاكس ، هناك طرق اخرى تعتمد اسلوب هز سطح التسخين بترددات عالية او رش الكريات الصغيرة المصنوعة من حديد الزهر .

ب- التقاط الرماد

تشكل غازات الاحتراق المطروحة من مولد البخار اخطارا جدية على البيئة ، وتقوم لاقطات الرماد بتخليص جريان الغاز من الرماد المرافق

لها ، وبالتالي تخفف من التأثيرات الضارة لغازات الاحتراق ، وتقدر كفاءة لاقط الرماد بمعامل التنظيف،وهو عبارة عن كتلة الرماد الملتقطة الى الكتلة الواردة مع الغازات :

$$\eta = \frac{m_p}{m_c} \quad , \qquad (10-9)$$

تأخذ لاقطات الرماد اشكالا تصميمية متنوعة ويمكن تصنيفها على الشكل التالي :

١- اللاقطات الميكانيكية ؛

٢- لاقطات التبليل ؛

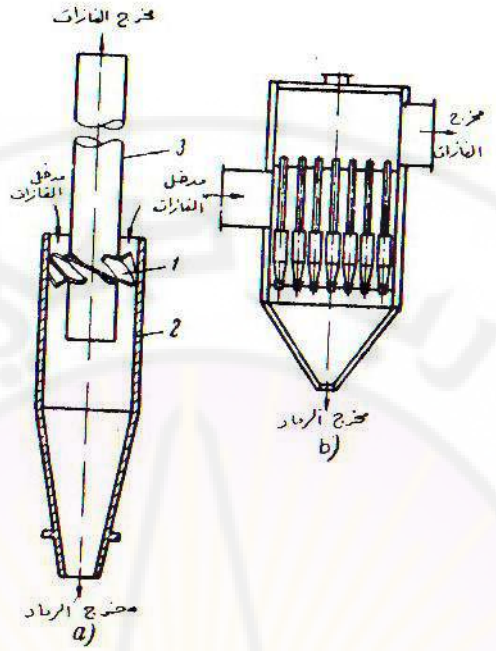
٣- المرشحات الكهربائية ؛

٤- اللاقطات المركبة .

على الشكل ٩-٢ يبين مقطع طولي للاقط ميكانيكي مؤلف من عدد كبير من العناصر (الشكل ٩-٢، a) التي تقوم بتدوير التيار الغازي الرمادي بمساعدة جهاز التدوير 1 ، تهبط جزيئات الرماد الى اسفل العنصر بينما تدور الغازات لتخرج من الانبوب (3) .

يستعمل اللاقط الميكانيكي كمرحلة اولى من مراحل التقاط الرماد ويتعلق معامله التنظيفي بحجم جزيئات الرماد ويقترب بقيمته من (2) = ٨٥ % .

يعتمد اللاقط المبلل (الشكل ٩-٣) اسلوب تمرير الغازات خلال شبكة من القضبان الافقية المغلفة بأنابيب مطاطية 5 ، تبلل الاخيرة بواسطة الابواق 4 الموضوعة ضمن انبوب ادخال الغازات المماسي 2 الموجود في اسفل اللاقط ، يجري التقاط



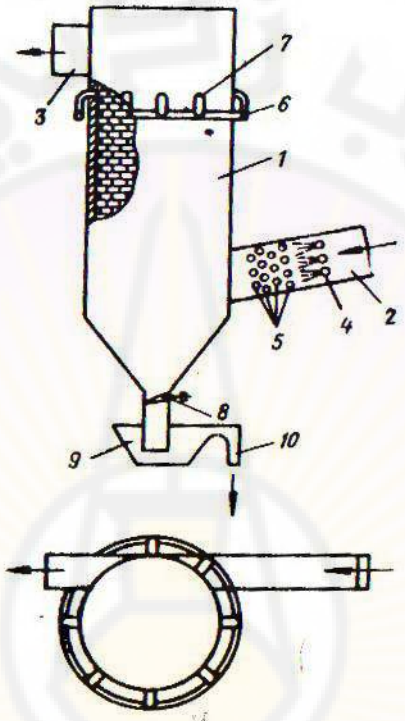
الشكل (٩-٢): اللاقط الدوامي

a - عنصر الدوامة b - بطارية الدوامات .

جزيئات الرماد المتبقية في الشريحة المائية الملاصقة للسطح الداخلي من هيكل اللاقط (1)، وتقوم الابواق (7) بنفث الماء وتشكيل الشريحة المائية ، يجمع الرماد من اسفل اللاقط ويخرج الغاز المنظف من اعلاه . يساعد الادخال المماسي للغازات الى هيكل اللاقط في دفع الغازات للحركة حسب مسارات لولبية صاعدة الى الاعلى، وتؤثر القوى النابذة على جزيئات الرماد بصورة اكبر فتتبلل في الشريحة المائية ومن ثم تهبط الى الاسفل ويصل معامل التنظيف فيه الى $\eta = 0,9 \div 0,95$

تعطي المرشحات الكهربائية نتائج جيدة في تخليص الغازات من

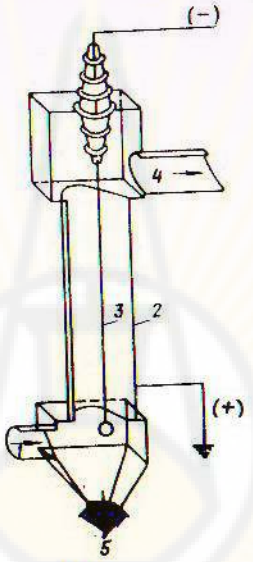
جزيئات الرماد ذات الابعاد الصغيرة ،ويصل معامل التنظيف فيها حتى $\eta = 98\%$ عند ابعاد الجزيئات $5\ \mu K$ ، ومع ازدياد نسب الجزيئات كبيرة الحجم ينخفض معاملها التنظيفي .



الشكل(٩-٣) اللاقط النابذي .

١- الهيكل مع الغلاف ، ٢- قنال الدخول ، ٣- قنال الخروج ، ٤- ابواق الغسيل ، ٥- شبكة القضبان ، ٦- موزع الماء ، ٧- ابواق الرش ، ٨- صمام ، ٩- قفل هيدروليكي ، ١٠- مخرج الخليط المائي الرمادي .

يبين الشكل ٩ـ٤ مخططا تمثيليا لعمل المرشح الكهربائي ، تمرر غازات الاحتراق من خلال اسطوانة يتضمن محورها على ناقل متوج ومتصل مع القطب السالب لمولد تيار مستمر، وتتصل الاسطوانة نفسها مع القطب الموجب ، تشحن جزيئات الرماد المارة مع الغازات بتأثير الحقل الكهربائي المتشكل بين القطبين (يوضع فرق توتر عال 9.10^5 V) وتنجذب الجزيئات المشحونة ايجابيا الى القطب السالب والعكس بالعكس.



الشكل(٩ـ٤) مخطط المرشح الكهربائي .

١ـ مدخل الغازات ، ٢ـ القطب الترسيبي ، ٣ـ القطب المتوج ،
٤ـ مخرج الغازات ، ٥ـ طرح الرماد المترسب .

وتتعلق اغلب جزيئات الرماد باسطوانة المرشح ، يجري تعريض اقطاب المرشح للاهتزاز دوريا لتخليصها من طبقات الرماد المترسبة التي

تضعف من فعالية المرشح .

- توضع المرشحات الكهربائية كمرحلة ثانية في مخطط عزل جزيئات الرماد وتنفذ حسب اتجاهات الغاز الافقية او الشاقولية .
- تتميز المرشحات الكهربائية بفعاليتها العالية وتتلخص عيوبها في ارتفاع ثمنها وكبر حجمها ، تحتوي اللواقط المركبة على لواقط ميكانيكية تعزل الجزيئات الضخمة من الرماد وعلى مرشحات كهربائية تقوم بفصل جزيئات الرماد الصغيرة .

٩-٣ ايقاد مولد البخار

- تتطلب عملية الايقاد تسخين كافة عناصر التجهيز اعتبارا من الحالة الباردة وحتى العاملة ، ويتحدد تسارع هذا الاجراء بقيم الاجهادات الحرارية المسموح بها في اجزاء المعدن السميكة ،وبمتطلبات التجانس الحراري بين بعض عناصر المولد ، ويبدأ زمن الايقاد اعتبارا من لحظة تشغيل الحراقات الايقادية ، ولكن قبل ذلك يتوجب تنفيذ كافة العمليات التمهيدية الضرورية ومن ضمنها التأكد من جاهزية كافة الميكانيزمات للعمل وتجميعها الصحيح .
- في البدء يتوجب تهوية الموقد ومجاري الغازات لتجنب امكانية حدوث الانفجار عند الاشعال (بسبب الغبار الفحمي المتبقي او الغازات القابلة للانفجار) ، وفي حالة العمل على الوقود الغازي او السائل او الطورب تجري عملية التهوية بواسطة كل من مراوح التهوية والامتصاص في آن معا ، وخلال خمسة او عشرة دقائق،وبالنسبة لانواع الوقود الاخرى تجري عملية التهوية بواسطة مروحة الامتصاص التي تعمل خلال خمسة دقائق

على الاقل ، وبعد ذلك فقط تشغل الحراقات الايقادية ويشرع في تسخين عناصر مولد البخار .

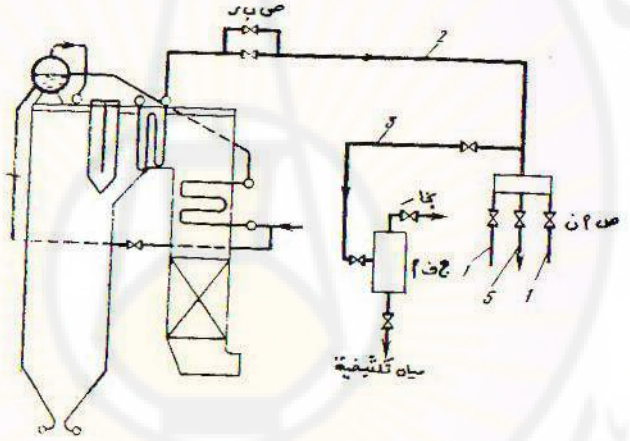
تجري عملية املاء الحلة بالمياه في حالة مولد البخار ذي الحلة قبل بدء التسخين (الشكل ٩ـ٥) .

وفي حالة الايقاد اعتبارا من وضعها البارد يجري املاء الحلة بالمياه الخالية من الغازات ، والتي تكون درجة حرارتها ٦٠÷٨٠°ح ، وتملأ الحلة التي لم تبرد بعد (نتيجة لتوقف المولد عن العمل خلال فترة قصيرة) بالمياه التي لاتختلف درجة حرارتها عن حرارة المعدن بأكثر من ٤٠°ح وعند الاملاء تفتح الصنابير الهوائية الواقعة في النقاط العلوية للاطارات الدورانية ، ويجري املاء الحلة حتى المستوى الاخفض فيها حيث ان التسخين المقبل سيؤدي الى رفع مستوى المياه فيها .

ولتجنب حدوث التواء القطاعات المعدنية بسبب تمددها الحراري يتوجب الحفاظ على التسخين المتجانس للسماعاكس ، ان ذلك يحدد سرعة تسخين جسم التشغيل بمعدل ٦٠÷٩٠ °ح في الساعة (درجة اودرجة ونصف في الدقيقة) ، وتمثل سرعة ازدياد درجة حرارة الاشباع بيانيا على شكل ازدياد الضغط في الحلة ، وتشغل عملية رفع حرارة جسم التشغيل من ٣٠ °C وحتى ٣٥٠ ÷ ٣٥٠ °C مدة ثلاثة او اربعة ساعات ، ويجري تنظيم سرعة ارتفاع درجة حرارة جسم التشغيل بواسطة التحكم بالانتاجية الحرارية للحراقات . في الدور الاولي للايقاد عندما ينعدم دوران المياه الطبيعي في الاطار الدوراني تتحدد سرعة التسخين بعوامل الحفاظ على الحدود المسموح بها لتسخين معدن الحلة نفسها ،والمعلوم ان حرارة الجزء العلوي من الحلة ترتفع بسرعة كبيرة نتيجة لطاقة

تكاثف البخار، بينما تبقى الحرارة في الجزء السفلي منها محافظة على على مستواها الاولي ، ولا يسمح بازدياد الفرق الحراري بين الجزء العلوي والسفلي من الحلة بأكثر من ٤٠ °C.

يجري تسخين انبوب امداد البخار الرئيسي وتبريد معدن المحمص في وقت واحد مع ارتفاع الضغط وعند وصول الضغط في الحلة حتى ٠,٦ MPa يفتح خط جهاز الفصل الايقادي، يبرد البخار انابيب المحمص اولا وبعد ذلك يقدم طاقته الحرارية الى انبوب امداد البخار وبسبب السماكة الكبيرة لجدرانه يحظر رفع سرعة التسخين فوق ١,٥ °C في الدقيقة، ويجري التحكم فيها بواسطة تصريف البخار خلال الانبوب .



الشكل (٩-٥) : مخطط ايقاد مولد البخار ذي الحلة.

١- انابيب نقل البخار في قسم العنفات ، ٢- انبوب البخار الرئيسي ، ٣- خط الايقاد ، ٤- خط الدوران ، ٥- تصريف ، ص ب س - الصمام البخاري الرئيسي ، ج ف آ - جهاز الفصل الايقادي، ص آ ن - صمامات انابيب النقل .

في المرحلة الايقادية الاولية يكون تصريف البخار خلال المحمص قليلا وكثافته ايضا قليلة،ولا تزداد درجة حرارة الغازات في منطقة المحمص عن 500 ÷ 600 °C؛وذلك بسبب الامتصاص الحراري الكبير في حجرة الموقد،وهي لذلك لا تشكل خطرا على الانابيب في هذه المرحلة ومع ارتفاع درجة حرارة الغازات يرتفع تصريف البخار وكثافته ، ويجري تشغيل الحراقات الاساسية بعد تسخين الموقد بشكل جيد .

قبل البدء بتغذية المولد بالماء باستمرار يتوجب تأمين تبريد الموفر لتجنب تبخير المياه الموجودة فيه ، ويجري هذا الامر بمساعدة خط الدوران الذي يصل ما بين مدخل الموفر والحلة .

بعد الانتهاء من تسخين انبوب البخار ووصول الضغط الى المستوى الذي يقل عن الضغط في خط البخار العامل بنحو 0,1 MPc يجري اقلاع المولد بفتح الصمامات امام الخط ، وفي هذه اللحظة يسرع عمل الحراقات حتى يتقبل المولد الحمولة على نفسه ، بعد ذلك يغلق الخط الايقادي وخط الدوران،واذا كان الضغط في الحلة اعلى منه في خط البخار فان فتح الصمامات المفاجيء يؤدي الى حدوث الصدمة الهيدروليكية الخطرة؛ التي تترافق مع نقل قطرات الماء الى المحمص مما يؤدي الى تخريبه .

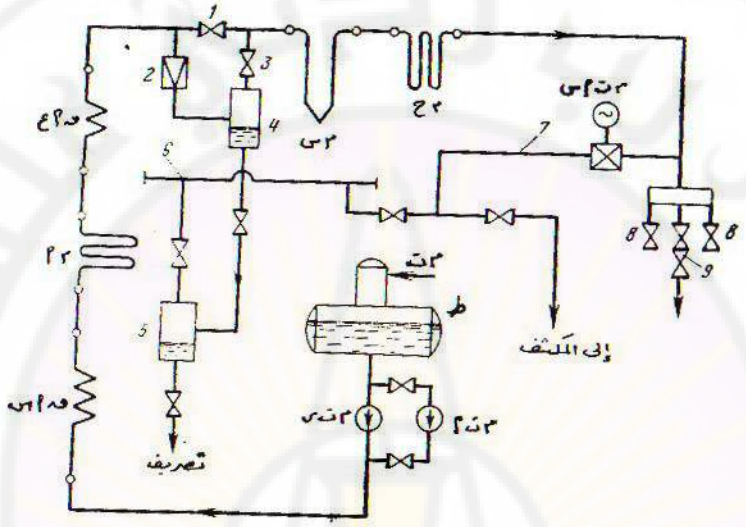
تتميز مولدات الجريان المباشر من حيث تصميمها بامكانية تسريع عملية الايقاد حيث لا تشغل اكثر من 40 ÷ 50 دقيقة ، والامر المميز لايقاد هذه المولدات هو ضرورة امدادها بنسبة 30 % من تصريف الماء آنيا ، ولهذا السبب في المرحلة الايقادية الاولية لاتتمكن المياه من التبخر بشكل كامل بسبب الطرح الحراري الضعيف ، هذا مع العلم انها تمر على المنطقة التبخيرية الانتقالية ، ومعلوم انه يحظر

وصول المياه الى الجزء الحملي من المحمص والى انبوب امداد البخار بسبب خطر تشكل السدادات الهيدروليكية في التفرعات السفلية من الانابيب .

ولتحقيق الشروط الضرورية للايقاد يستخدم جهاز فصل البخار الداخلي (الشكل ٩-٦) ، وفيه يغلق الصمام الفاصل 1 عند الاقلاع فتصل المياه (وفيما بعد المزيج البخاري المائي) الى جهاز الفصل الايقادي ولتأمين الضغط الحسابي المناسب في كل اجزاء المسار الواقعة قبل جهاز الفصل يستخدم الصمام التخفيضي 2 الذي يمنع خرق النظام الهيدروديناميكي لحركة جسم التشغيل ضمن سطوح المعاكس ، ويجري تخفيض اضافي لضغط المياه في الممدد 5 الذي تطرح منه المياه في بداية الايقاد الى خزان المياه المتكاثفة المتسخة ، وفيما بعد تنتقل الى المكثف التوربيني ، من الممدد يذهب البخار مع ضغط $2\,HP_c$ الى خط الاحتياجات الذاتية للمحطة .

يزداد ضغط البخار في مساره خلف جهاز الفصل مع مرور زمن الايقاد ويبرد البخار سطوح المحمص وفيما بعد يسخن انبوب الامداد ومع ازدياد الحمولة الحرارية تنخفض نسبة المياه الواردة الى جهاز الفصل الايقادي . وتقوم المنشأة التخفيضية التبريدية السريعة باستقبال البخار في مرحلة الايقاد وذلك دون مروره على التوربين الى ان تصل درجة حرارته الى المستوى المطلوب والمسموح به لتسخين جسم التوربين (تزيد بمعدل 50 °C عن حرارة الاشباع) ، بعد ذلك يصل البخار من خلال الصمام 8 الى التوربين ويبدأ الاخير بالدوران وتبدأ الحمولة الكهربائية بالارتفاع وعند وصول الحمولة الى نسبة $30\%D_n$ ينقطع

وصول الماء نهائيا الى جهاز الفصل ويزداد الضغط خلفه مقتربا من قيمته الاسمية . وبعد تساوي الضغوط والوصول الى درجة الحرارة الحسابية للبخار يفصل الخط الايقادي للممدد ويفتح الصمام الفاصل 1 وينتقل مولد البخار الى نظام العمل العادي .



الشكل (٩-٦): مخطط ايقاد مولد الجريان المباشر .

١- الصمام الفاصل ، ٢- صمام الاضعاف ، ٣- صمام بخاري ، ٤- جهاز الفصل الداخلي ، ٥- المبرد الايقادي ، ٦- خط الاستهلاك الذاتي، ٧- خط طرح البخار في مكثف العنفة ، ٨- صمامات انابيب النقل، ٩- خط تصريف البخار ، ط - طارحة الهواء ،م ت ر - مضخة التغذية الرئيسية ، م ت آ - مضخة التغذية الاقلاعية ، ق آ س ،ق آ ع - قسما الاشعاع السفلي والعلوي ،م آ - المنطقة الانتقالية ،م س ،م ح - المحمص الستائري والحملي ،م ت آ س - المنشأة التبريدية الاضعافية السريعة ، م ت - المياه التكثيفية .

الفصـــــــــل العاشـــــــر

مولدات البخار العاملـــــــــة على الوقود النووي

١٠-١ المفاعلات الذرية

يأخذ الوقود النووي اهمية كبيرة في الظروف الراهنة وفي المستقبل كمصدر من مصادر الطاقة الضرورية لكافة اوجه حياة المجتمع ،ويحتوي اليورانيوم الطبيعي على ٩٩,٣ ٪ من نظائر اليورانيوم ذات العدد الكتلي 238 U^{238} بينما يحتوي فقط على ٠,٧ ٪ من كتلته على النظائر U^{235} .

عندما تقذف ذرة اليورانيوم U^{235} بنيوترون واحد تحدث المعادلة النووية التالية :

$U^{235} + n =$ شظري الانقسام + γn + اشعة β + اشعة γ + الطاقة الحركية لنواتج الانشطار .

n – نيوترون

γ – عدد النيوترونات الثانوية الناتجة عن الانشطار

يتألف شطرا الانقسامات من نوى ذرات اليود والكريبتون ، ومن المعروف انه عند انشطار واحد غرام من يورانيوم U^{235} تطرح كمية من الطاقة تساوي $86,4.10^6$ KJ ، هذا مع العلم ان نسبة 85% من الطاقة المذكورة تنتج عن الطاقة الحركية لنواتج الانشطار .

عند اصطدام نواتج الانشطار مع ذرات العناصر للوسط المحيط تنكبح من ثم تتحول طاقتها الحركية الى طاقة الحركة الحرارية . هذا مع العلم ان النسبة العظمى لطاقة اشعة غاما تتحول ايضا الى طاقة حرارية .

بتسبب اشتراك احد النيوترونات الثانوية الناتجة عن التفاعل السابق في حدوث تفاعل آخر مثل المعادلة النووية المذكورة ، وتحدث سلسلة من التفاعلات ذات الاندفاع الذاتي والتي يؤدي فيها انشطار نواة واحدة من U^{235} الى انشطار واحدة اخرى مثلها وهكذا ..... ، ويقوم المفاعل النووي بوظيفة تنظيم عملية التفاعل النووي السابق .

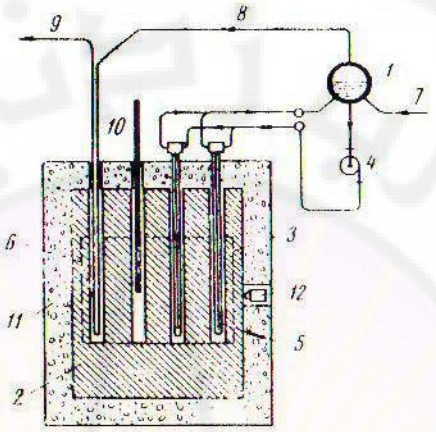
يملك النيوترون الناتج عن التفاعل النووي السابق طاقة قدرها $E_n = 5$ Mev ولهذا السبب فان احتمال حدوث التفاعل النووي السابق ضعيف للغاية نظرا للسرعة الكبيرة للنيوترون ، فاذا تمكنا من تخفيض طاقته الى مستوى طاقة الحركة الحرارية $E_n = KT = 0,025$ eV (K ثابتة بولتسمان) فاننا سنتمكن من رفع احتمال التفاعل الف مرة ولانتاج النيوترونات البطيئة تستخدم الاجسام المبطئة ، وهي عبارة عن مركبات تحتوي على العناصر الخفيفة (الماء او الغرافيت) ، ولا تستطيع ذرات العناصر الثقيلة القيام بهذا الدور ذلك انه عند اصطدام

النيوترونات مع الذرات الثقيلة تنعكس عنها حسب الاصطدام المرن ، وبالتالي فهي لاتفقد شيئا من طاقتها الحركية ، تشارك النيوترونات التي تصطدم بالاجسام المبطئة في حركتها الحرارية ويغادر قسم منها المفاعل بينما يعود قسم آخر اليه ، وبشكل عام يتسبب الجسم المبطىء في تخفيض نسبة النيوترونات الصائعة الى الوسط الخارجي وفي تشكيل ما يشبه الغيمة النيوترونية التي يكتسب اليورانيوم في كل لحظة عددا من نيوتروناتها، بينما يعوض نفس العدد نتيجة التفاعل المتسلسل، وتنتقل الطاقة الحرارية الناتجة عن التفاعل الى السائل الذى يدور في الانابيب وهو مايدعى بالجسم الناقل للطاقة الحرارية . ويسمى المفاعل الذى يدور فيه الجسم الناقل ضمن الانبوب بالمفاعل القنالي ، هناك نوع آخر من المفاعلات هو النوع الهيكلي ، وفيه يتحرك الجسم الناقل للطاقة الحرارية بدون استخدام الانابيب، فهو يحيط بالعناصرالطارحة للطاقة الحرارية من كل جانب .

١ـ المفاعل النووي القنالي

يحتوي المفاعل النووى القنالي (الشكل ١٠ـ١) على المنطقة النشطة التي تتألف من الجسم الغرافيتي 2 الذي يتوضع فيه الجزء المركزي من المفاعل ومن الاقنية التكنولوجية ، ويتألف القنال التكنولوجي (الشكل ١٠ـ٢) من العنصر الطارح للحرارة ومن الانابيب التي تستخدم لمرور الجسم الناقل للطاقة الحرارية الناتجة عن كبح نواتج الانشطار النووي . ويتوضع العنصر الطارح للحرارة مع

الانابيب ضمن الهيكل الخارجي المشترك للقنال .



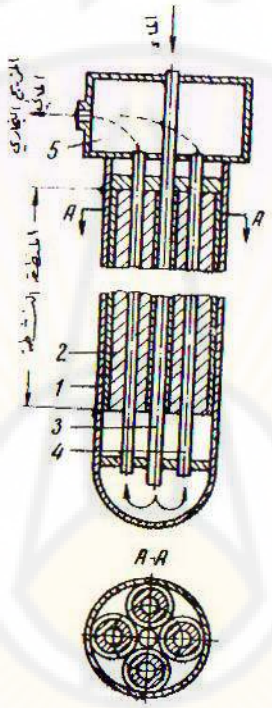
الشكل (١٠-١) : المفاعل القنالي .

١- هيكل ، ٢- الجسم الغرافيتي ، ٣- المنطقة النشطة ، ٤- مضخة الدوران القسري ، ٥- القنال التكنولوجي الغليلياني مع العناصر الطارحة للحرارة ، ٦- القنال التكنولوجي التحميصي مع العناصر الطارحة للحرارة ، ٧- امداد مياه التغذية ، ٨- خروج البخار المشبع ، ٩- خروج البخار المحمص ، ١٠- عمود التحكم ، ١١- جدران الحماية البيولوجية ١٢- حجرة التأيين .

تصنع العناصر الطارحة للحرارة من الوقود النووي الذى يكون على هيئة قضبان او انابيب او صفائح ،ويغطى العنصر من الخارج بالكبسولة المعدنية التي تمنع الوقود النووي من الاختلاط مع الجسم الناقل للحرارة ويؤدي اهتراء الكبسولة الى خروج نواتج الانشطار والمواد المشعة الاخرى الى الاطار الخارجي للجسم الناقل للحرارة وهذا ما يؤدي الى ظهور الاخطار العديدة . ولذلك تصنع الكبسولة من المواد المقاومة

للصدأ ولتأثير النشاط الاشعاعي ، تلتصق الكبسولة باحكام على الوقود النووي وذلك لتأمين الانتقال الحراري الفعال ولتجنب الرفع الزائد لدرجة الحرارة ضمن الكبسولة .

ان النتائج الاستثمارية الحسنة لعمل المفاعلات الغليانية ادى الى انتاج المفاعلات التي يمكن فيها تحميص البخار في اقنية تكنولوجية خاصة (الشكل ١٠-٣) .



الشكل (١٠-٢) القنال التكنولوجي .

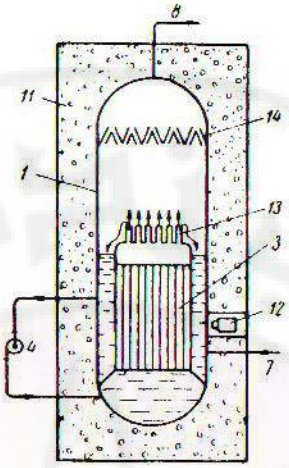
١- هيكل القنال ، ٢- اليورانيوم ، ٣-الانبوبة الهابطة ،
٤- الانبوبة الصاعدة ، ٥- رأس القنال .

يجري تنظيم عمل واستطاعة المفاعل النووي بالاستعانة باعمدة التحكم التي تتألف من المواد التي تمتلك قابلية عالية لامتصاص النيوترونات (كادميوم ، بور) ، وتتوضع اعمدة التحكم داخل المنطقة النشطة ،وعند رفعها الى الاعلى تزداد سرعة التفاعل النووي التسلسلي ، وهذا ما يؤدي الى زيادة استطاعة المفاعل ، ان تغير عمق اعمدةالتحكم ينظم شدة التفاعل التسلسلي وبالتالي تنظم الاستطاعة الحرارية المنطلقة ففي الوقت الذي يجري فيه احراق الوقود النووي تغير اعمدة التحكم عمقها بصورة اوتوماتيكية بمساعدة جملة كينيماتيكية ترتبط عبر مخطط الكتروني مع حجرة التأيين 12،وعند خروج المفاعل عن نظام عمله العادي الى نظام خطر تهبط اعمدة التحكم الاضافية آنيا لايقاف عمل المفاعل .

٢- المفاعل النووي الغليائي

ويتحالف من خزان فولاذي شاقولي بتراوح قطره بين 5÷6 m (الشكل ١٠-٣) وتتوضع منطقته النشطة داخل الماء ، يحتوي المفاعل على اجهزة الفصل الدوامية لعزل الرطوبة عن البخار،وتقوم الممرات المعيقة المتواجدة في اعلى المفاعل بمتابعة فصل البخار عن القطرات العالقة به .

ينحصر سقف استطاعة المفاعلات الهيكلية في المجال 400÷500 MW وذلك بسبب الصعوبات التكنولوجية المتعلقة بتصميم الخزان العمودي ذي الاقطار الكبيرة ، بينما تتمتع المفاعلات الذرية القنالية بامكانيات كبيرة لزيادة استطاعتها ، تعمل المفاعلات الهيكلية في نظام الدوران الطبيعي والقسري معا .



الشكل (١٠-٣): المفاعل الهيكلي.

١- ١٢ انظر الشكل ١٠-١ ، ١٣- اجهزة الفصل الدوامية ،

١٤- جهاز فصل البخار ذي الطبقة الشرائحية .

١٠-٢ الاجسام الناقلة للطاقة الحرارية

وتستخدم لامتصاص الطاقة الحرارية في المفاعل ومن ثم تنقلها الى جسم التشغيل مباشرة او الى وسيط آخر،واهم المواد المستعملة الماء الغاز (غاز الفحم بصورة خاصة) المركبات الهيدروكربونية (الديفينيل $C_{12}H_{10}$ ، $C_{18}H_{14}$) ، المعادن السائلة او سبائكها (الصوديوم او سبائكه مع البوتاسيوم ، البيزموت او سبائكه مع الرصاص) .

ان اهم الصفات المطلوبة من الاجسام الناقلة هي :

١- الناقلية الجيدة والسعة الكبيرة للحرارة ؛

٢ـ الاحتفاظ بالصفات الفيزيائية والكيميائية في ظروف التاثير الاشعاعي :

٣ـ انخفاض درجة حرارة الانصهار (اقل من درجة الهواء الخارجي)

٤ـ امكانية التسخين حتى الدرجات العالية من الحرارة .

يمتلك الماء ناقلية جيدة للحرارة نسبيا ، وهو بالاضافة الى ذلك ذو سعة حرارية كبيرة ؛ولكن رفع درجة حرارته يتطلب رفع مستوى الضغط فيه ، وعلى العكس من ذلك بالنسبة للناقل المعدني الذى لايرتبط عامل رفع درجة حرارته مع مستوى الضغط فيه ،بالاضافة الى ذلك فهو يتصف بناقليته الحرارية العالية (معامل التوصيل الحراري فيه اعلى – بعشرات المرات من نظيره للماء $\lambda_{Na} = 130\ \lambda_{H_2O}$ ؛ وبالتالي يكون الطرح الطاقي اكثر منه في حالة الماء.ومن ناحية اخرى فـــان استخدام الناقل المعدني السائل يتسبب في ظهور الصعوبات التكنولوجية العديدة المتعلقة بالاستثمار (مثلا عند تشغيل المفاعل) وذلك بسبب ارتفاع درجة انصهار المعدن (للصوديوم مثلا درجة الانصهار 98°C) و تتيح سبيكة Na (56 %) و K (44 %) تخفيض درجة الانصهار حتى 28 °C مع الاحتفاظ للصوديوم بمعامل التوصيل ،

يتصف الناقل العازي بامكانية رفع درجة الحرارة فيه الى مستوى عال ، ولكن من ناحية اخرى فانه يمتلك ناقلية منخفضة للطاقة الحرارية وهذا ما يجعله قليل الفاعلية نسبيا ،ولهذا السبب يعمد في المفاعلات التي تستخدمه الى رفع كثافته عن طريق زيادة الضغط العامل فيه ، وكذلك ترفع سرعة جريانه ، وتستخدم المبادلات الحرارية ذات الانابيب المضلعة لزيادة سطوح التبادل ، ان زيادة كثافة وسرعة جريان الغاز

تتطلبان استخدام المراوح الضخمة التي تستهلك قدرا كبيرا من الطاقة الكهربائية المنتجة في المحطة وللمقارنة نذكر ان 5÷6 % من الطاقة المولدة في المحطة تذهب لتحريك المضخات التي تدور الناقل المائي بينما تستهلك نسبة 20 % من الطاقة المولدة لتحقيق نفس الهدف في حالة الناقل الغازي .

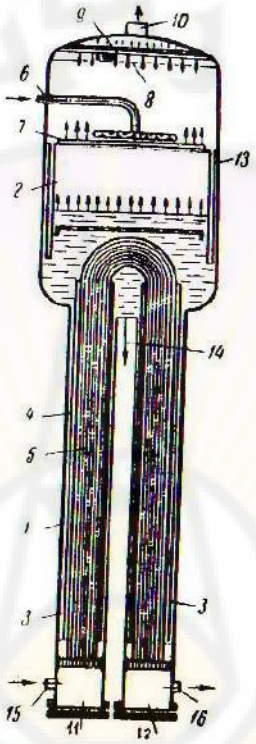
ومن الناحية الاخرى فان الناقل الغازي يخفض الى حد بعيد الخطر الاشعاعي الذى يحدث عند تسرب او انفلات الجسم الناقل الى الوسط الخارجي ، بينما يؤدي تسرب الناقل المائي او المعدني الى ظهور الاخطار الجسيمة المتعلقة بالاشعاع وبابقاء المفاعل بدون تبريد . تتيح نواقل الحرارة الغازية والمعدنية تحميص البخار الى مستويات حرارية عالية على عكس الناقل المائي .

١٠-٣ مولدات البخار المستخدمة في محطات الطاقة الذرية

مولدات البخار ذات الناقل المائي

وهي عبارة عن خزان للتسخين تتوضع في داخله مجموعة من الانابيب الملتوية على شكل حرف U توضع بشكل يتوافق مع توضع حلة المولد وتتصل نهايات الانابيب المذكورة بلوحة الانابيب ، يصل الناقل المائي الى حجرة الدخول (الشكل ١٠-٥ ، الوضعية 11) ثم يخرج من الطرف الاخر للانابيب 12 . يتم في مولد البخار نقل الطاقة الحرارية من الجسم الناقل للحرارة الى جسم التشغيل وبذا يتولد البخار الرطب في الخزان ولتخفيف نسبة الرطوبة داخله يجهز مولد البخار بأجهزة خاصة ومعقدة

لفصل الرطوبة ولغسيل البخار الناتج ،ذلك ان المواصفات المطلوبة من البخار في حالة المفاعلات الذرية اعلى بكثير من مثيلاتها في حالة مولدات البخار العاملة على الوقود العضوي ،



الشكل (١٠-٤) مولد البخار ذي الناقل المائي

١- مبادل حراري على شكل U وغلافه ، ٢- الحلة الشاقولية ، ٣- الجزء الهابط ، ٤- القميص المعدني ، ٥- حزمة الانابيب ، ٦- دخول مياه التغذية ، ٧- جهاز غسيل البخار ، ٨- جهاز فصل الرطوبة ، (الطريقة الشرائحية) ٩- سقف استقبال البخار ، ١٠- خروج البخار ، ١١و١٢ - حجرات دخول وخروج الناقل المائي ١٣- انابيب مياه التغذية ، ١٤- طرح المياه زائدة الملوحة ، ١٥و١٦ - دخول وخروج الناقل المائي .

تنفذ انابيب ومختلف عناصر الاطار الاولي (دورة الجسم الناقل) من الفولاذ المقاوم للصدأ ، وذلك للتخفيف من نسبة المواد المشعة التي يمكن ان تترسب على جوانب الاطار الداخلية والتي تشكل خطرا كبيرا على حياة العاملين في المحطة .

لتخفيف نسب الاستهلاك من المعادن الغالية الثمن ، يمرر الجسم الناقل داخل الانابيب بينما يمر جسم التشغيل في الفراغ بين الانابيب .

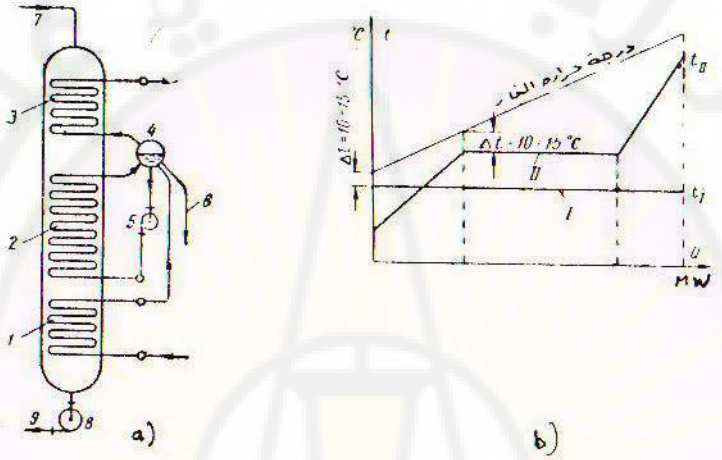
٢- مولدات البخار ذات الناقل الغازي

وهو عبارة عن خزان فولاذي (الشكل ١٠-٥) كبير تمر من خلاله عرضيا مختلف سطوح التسخين ، ومن المعروف ان معامل النقل الحراري من الغازات الى سطح التسخين ضعيف نسبيا ولكن نظافة الغاز تسمح بتشديد التبادل الحراري عن طريق تضليع الانابيب التي يمر فيها جسم التشغيل وتمرر الغازات بسرعة كبيرة حول الانابيب وتحت ضغط مرتفع (يتراوح الضغط في الطرف الغازي بين $3 \div 6$ MPa) .

تتوضع سطوح التسخين داخل الخزان بشكل افقي ويسير البخار في وحدة التبخير في نظام الجريان القسري ، وعند استخدام الضغط المرتفع في طرف البخار تفضل مخططات الجريان المباشر .

يتيح استخدام الموفر والمحمص في مولدات البخار ذات الناقل الغازي رفع فعالية الانتقال الحراري والحصول على بخار محمص الشكل ١٠-٥ يبين على مخطط درجة الحرارة t وكمية الحرارة Q تغير هذه الكميات بالنسبة للغاز ولجسم التشغيل-الماء. المنحني I يمثل درجة حرارة جسم التشغيل في حالة الاكتفاء بسطوح توليد البخار ، المنحني II

يعكس وجود الموفر والمحمص الى جانب سطوح توليد البخار، من المقارنة بين المنحنيين نرى ان الموفر يزيد من الضاغط الحراري Δt بين جسم التشغيل والغاز في الطرف البارد ، كما ويمكّن المحمص من رفع درجة حرارة البخار المحمص الى مستويات عالية .



الشكل (١٠–٥) مخطط ولد البخار ذي الناقل الغازي .

a – مولد البخار ، b – مخطط t – Q ،

١– مسخن الماء ، ٢– سطح البخر ، ٣– محمص ، ٤– الحلة ٥ – مضخة قسرية ، ٦– انبوب طرح المياه زائدة الملوحة ، ٧– الغاز المسخن من المفاعل ، ٨– مروحة الدفع .

٣– مولدات البخار ذات الناقل المعدني

يتعرض الناقل الحراري المعدني عند مروره في المفاعل للتنشيط الكيميائي وللتلوث الاشعاعي ، وهذا ما أدى الى تعقيد مخططات

المبادلات الحرارية المستخدمة في تلك الحالة ولضمان الامان الصناعي للنفر العامل في المحطة وضعت مخططات محطات الطاقة ذات الاطـــر الثلاث حيث ينقل المعدن السائل الطاقة الحرارية عبر الاطار الاول الى المبادل الحراري المتواجد بين الاطارين الاول والثاني ، ومولد البخار عبارة عن مبادل حراري يجري في احد طرفيه الناقـــل الحراري الوسيطي (الاطار الثاني) بينما يجري المزيج المائـــي البخاري في الطرف الاخر (الاطار الثالث) .

لقيت مولدات البخار ذات الناقل المعدني انتشارا ضيقا نظرا لارتفاع ثمنها ولتعقيد مخططاتها .

الفهـــــــــــرس

الفصل الاول تصنيف مولدات البخار والمخطط التقني لانتـــــاج البخـــــار ٠

١-١	المخطط التقني لانتاج البخار	١
١-٢	مولدات البخار وتصنيفاتها	٤
١-٣	المميزات الاساسية لمولدات البخار	١١

الفصل الثاني احتراق الوقـــود العضـــوي

٢-١	انواع الوقود وتركيبه	١٣
٢-٢	مميزات الوقود العضوى	١٩
	١- الوقود الصلب	١٩
	٢- الوقود السائل	٢١
	٣- الغاز الطبيعي	٢٤
٢-٣	حرارة احتراق الوقود	٢٧
٢-٤	عناصر نظرية الاحتراق	٣٠
	آ- احتراق الوقود الغازي	٣١
	ب- احتراق الوقود الصلب	٣٥
	ج - احتراق الوقود السائل	٣٧

Damascus University

٢–٥ حساب هواء الاحتراق والغازات الناتجة ٣٩

آ– حساب هواء الاحتراق للوقودالصلب والسائل ٣٩

ب – حساب هواء الاحتراق للوقود الغازي ٤١

جـ – تركيب وكمية نواتج الاحتراق التام للوقود الصلب والسائل ٤٢

د – تركيب وكمية نواتج الاحتراق التام للوقود الغازي ٤٧

٢–٦ تسرب الهواء الى مسار غازات الاحتراق ٤٩

٢–٧ انتالبي نواتج الاحتراق الغازية ٥٦

الفصل الثالث الميزان الحراري لمولد البخار وفعالية الاحتراق

٣–١ معادلة الميزان الحراري ٥٩

٣–٢ ضياعات الحرارة مع الغازات الخارجة ٦٢

٣–٣ ضياعات الحرارة لرداءة الاحتراقالكيميائية ٦٦

٣–٤ ضياعات الحرارة لرداءة الاحتراق الميكانيكية ٦٨

٣–٥ ضياعات الحرارة بسبب التبريد الخارجي ٦٩

٣–٦ ضياعات الحرارة الفيزيائية مع الخبث ٧١

٣–٧ مردود مولد البخار ومنشأة توليد البخار ٧٢

الفصل الرابع اجهزة الايقـــاد

٤–١ اجهزة ايقاد الوقود الصلب ٧٥

٤-٢ اجهزة ايقاد الوقود السائل والغازي ٨٨
٤-٣ اعداد المازوت والغاز الطبيعي ١٠٧

الفصل الخامس اسس الحساب الهيدروليكي لمولدات البخار والنظام الحراري لسطوح التسخين

٥-١ انظمة الجريان المائي البخاري ١١٢
٥-٢ مؤشرات الجريان المائي البخاري ١١٥
٥-٣ شروط تبريد معدن سطح التسخين ١٢١
٥-٤ اسس الحساب الهيدروليكي للجملة المفتوحة ١٣١
٥-٥ اسس الحساب الهيدروليكي للجملة المغلقة ١٤٧

الفصل السادس تصميم سطوح التسخين

٦-١ تصميم سطوح التسخين البخرية ١٦١
٦-٢ تصميم المحممات وتنظيم درجة حرارة التحميص ١٦٥
٦-٣ التحكم بدرجة حرارة البخار المحمص ١٧٣
٦-٤ سطوح التسخين ذات الحرارة المنخفضة ١٨٤

الفصل السابع اعداد المياه والنظام المائي لمولد البخار

٧-١ مواصفات الماء وتأثير الشوائب المنحلة والمعلقة ١٩٦
٧-٢ اسس معالجة المياه ٢٠٠
٧-٣ مصادر اتساخ البخار ٢٠٤
٧-٤ طبيعة انحلال المواد في البخار ٢٠٧

٧-٥ طرق تنقية البخار ٢٠٩
٧-٦ النظام المائي لمولد البخار ٢١٨

الفصل الثامن حساب الانتقال الحراري في مولد البخار

٨-١ حساب الانتقال الحراري في غرفة الموقد ٢٢٤
٨-٢ حساب الانتقال الحراري في سطوح التسخين الحملية ٢٣٥
٨-٣ حساب الانتقال الحراري في سطوح التسخين الستائرية ٢٤٧
٨-٤ مسائل وطرق وتسلسل الحساب الحراري ٢٥٠

الفصل التاسع معدات المسار الهوائي الغازي واقلاع مولد البخار

٩-١ المسار الهوائي الغازي واختيار مراوح التهوية والامتصاص ٢٦٠
٩-٢ حماية سطوح التسخين من الترسبات ولواقط الرماد ٢٦٦
٩-٣ ايقاد مولد البخار ٢٧١

الفصل العاشر مولدات البخار العاملة على الوقود النووي

١٠-١ المفاعلات الذرية ٢٧٧
١٠-٢ الاجسام الناقلة للطاقة الحرارية ٢٨٣
١٠-٣ مولدات البخار المستخدمة في محطات الطاقة الذرية ٢٨٥

جامعة دمشق



مطبعة المحبة

سعر المبيع للطالب ١٩٠ ل.س