ROYAUME DU MAROC

OFFICE MAROCAIN DE LA PROPRIETE INDUSTRIELLE ET COMMERCIALE
---

(19)

المملكة المغربية

المكتب المغربي للملكية الصناعية و التجارية
---

(12) FASCICULE DE BREVET

(11) N° de publication :
MA 35944 B1

(51) Cl. internationale :
F02C 7/10; F02C 1/10

(43) Date de publication :
01.12.2014

(21) N° Dépôt :
37373

(22) Date de Dépôt :
24.09.2014

(30) Données de Priorité :
30.03.2012 ES P201200343

(86) Données relatives à l'entrée en phase nationale selon le PCT :
PCT/ES2013/000071 15.03.2013

(71) Demandeur(s) :
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, Calle Ramiro de Maeztu, 7 OTRI-Viecerrectorado de Investigacion Universidad Politécnica de Madrid 28040 Madrid (ES)

(72) Inventeur(s) :
MARTÍNEZ-VAL PEÑALOSA, José María ; MUÑOZ ANTÓN, Javier ; MENGUAL MATAS, Rafael Rubén ; ABBAS CÁMARA, Rubén ; RAMOS MILLÁN, Alberto ; VALDÉS DEL FRESNO, Manuel ; ABANADES VELASCO, Alberto ; PIERA CARRETE, Mireira ; MONTES PITA, María José ; ROVIRA DE ANTONIO, Antonio

(74) Mandataire :
SMAS INTELLECTUAL PROPERTY

(54) Titre : **CYCLE DE BRAYTON À RÉFRIGÉRATION ENVIRONNEMENTALE PROCHE DE L'ISOTHERME CRITIQUE**

(57) Abrégé : Cycle régénérateur fermé, dont la température minimale du fluide de travail est à son tour proche de la température critique, mais supérieure à celle-ci, et proche de la température ambiante utilisée pour réfrigérer un foyer froid; on sélectionne la valeur de l'isobare supérieur pour qu'il coïncide avec l'isobare dit suprême, qui présente la valeur maximale moyenne de chaleur spécifique à pression constante, dans la zone péri-critique, au-dessus de l'isotherme critique, et délimitée en pression entre un cinquième et cinq fois la pression critique, en fixant l'isobare inférieur pour fournir le maximum d'un facteur dans lequel le numérateur est le travail spécifique, et le dénominateur la somme des valeurs absolues de la variation d'enthalpie spécifique de chaque étape du cycle.

الملخص

دورة مغلقة تجديدية تُقارب حرارتها الدنيا لسائل التشغيل في الوقت نفسه الحرارة الحرجة، غير أنها أعلى منها، كما أنها قريبة من الحرارة البيئية المستخدمة لتبريد البؤرة الباردة؛ يتم اختيار قيمة خط تساوي الضغط المرتفع بشكل يتزامن مع ما يسمى بخط تساوي الضغط الأقصى، والذي يمثل القيمة القصوى المتوسطة للحرارة المعينة تحت ضغطٍ ثابت، داخل النطاق المحيط بالنقطة الحرجة، وفوق خط التحارر الحرج، وهي محصورة من ناحية الضغط بين خُمس وخمسة أضعاف الضغط الحرج، حيث يتم تثبيت خط تساوي الضغط المنخفض لإنتاج أقصى ما يمكن من نسبةٍ يكون فيها بسط الكسر هي العمل المُعين، بينما يكون مقام الكسر هو مجموع القيم المطلقة لتغيّر المحتوى الحراري المعين لكل مرحلة في الدورة.

01 DEC 2014

دورة برايتون مع تبريد بيئي قريب خط التحارر الحرج

مجال التقنية

يتعلق الاختراع بدورة دينامية حرارية تتحرك حسب دورة برايتون، والتي يتم الاهتمام خلالها خصوصا بحرارة البوْرة الساخنة والبوْرة الباردة، والتي قد تكون إما الوسط البيئي أو المحيط المائي أو الغلاف الجوي. ويكتسي استخدامه أهمية بالغة في صناعة الطاقة خصوصا عندما تكون درجات حرارة البوْرة الحرارية منخفضة مقارنة مع المعتاد في مراكز الاحتراق الكيماوية. وهو ما يجعله قابلا للاستخدام خصوصا في مجال الطاقة الحرارية الشمسية أو الطاقة الحرارية الأرضية. علاوة على ذلك، يمكن استخدامه كدورة ذات حرارة منخفضة تقوم بتجميع الحرارة الزائدة في دورة ذات حرارة عالية.

المشاكل التقنية التي يجب حلها والمراحل التي سبقت الاختراع

فيما يخص التقنية فإن الدورات الدينامية الحرارية من نوع برايتون (التي يطلق عليها أيضا اسم جول-برايتون) هي معروفة على نطاق واسع. أما المراحل التي سبقت هذه الدورة فهي توجد في براءة الاختراع الأمريكية (US 125 166 A) التي تقدم بها جورج ب برايتون سنة 1872. في هذه الوثيقة، تم تقديم تحرك سائل في آلة ذات مكبس؛ وتتمثل الدورة المثالية في الآتي: 1) ضغط متساوي الأنتروبية لأحد السوائل، 2) تزويد الحرارة بضغط ثابت، 3) تمدد متساوي الأنتروبية للسائل، 4) تحويل الحرارة بضغط ثابت إلى أن يتم الرجوع إلى الأوضاع الأولى. لقد تم استخدام دورة برايتون بشكل كبير في الاستخدامات المتعلقة بالطاقة، حيث كانت أساس نظرية التوربينات الغازية.

من الناحية التقنية، فإن الدورات الدينامية الحرارية معروفة للحصول على طاقة تستخدم سوائل توجد في حالة حرارية تفوق النقطة الحرجة خلال كل الدورة، وبمعنى آخر، لا تنخفض عن الحرارة الحرجة T_{cr} وبذلك لا تعاني من التكثيف ولو بشكل جزئي، وهو ما يختلف مع دورات برايتون.

بالإضافة إلى دورات برايتون التي تتبع حرفيا وصف الأطوار الأربعة المذكورة سابقا، فإن مفهوم برايتون يشمل ما يسمى بالدورات التجديدية، حيث تكون فيها الحرارة الصادرة عن التوربينات أعلى من تلك الصادرة عن المكبس، وبذلك يتعين نقل الحرارة الزائدة للسائل إلى مخرج التوربينات، وبالتالي في فرع الضغط المنخفض، نحو السائل ذي الضغط المرتفع بعد الخروج من المكبس، وقبل أن يتلقى هذا الأخير الإضافة الحرارية الآتية من البوْرة الساخنة في المُنشأة. ويستدعي ذلك وجود عنصر بنّاء إضافي في تجسيد الدورة التجديدية يتوفر على مسارين، حيث يكون أحدهما أكثر حرارة وأقل ضغطاً يبرد السائل داخله، بينما يكون الاخر أكثر برودة وأكبر ضغطاً يسخن السائل فيه.

سيتم لاحقا عرض تحليل توثيقي للاختراعات الأقرب إلى مجال الديناميكية الحرارية هذا، مع الأخذ بعين الاعتبار الهدف المتمثل في تحسين التشغيل بالنسبة للمستويات التي يتم فيها تحديد درجة الحرارة القصوى T_M التي يجب على السائل الوصول إليها، في البوْرة الساخنة المتوفرة، وكذلك الحرارة الدنيا T_n حسب البوْرة الباردة المتوفرة. على هذا النحو، من المناسب الإشارة إلى الوثيقة EP 1 801 364 A1، والتي تتعلق بدورة دينامية حرارية من نوع رانكن، حيث تتطور أثناء التمدد في التوربينة إلى درجات حرارية أعلى من مستوى التحارر الحرج، بينما يتحرك السائل بعد ذلك داخل غرفة ثنائية الطور مُنتجا تكثيفا يصل مداه إلى طور السائل المُشبع، ومن هناك يتحرك عبر عملية ضخٍ لضغط المرجل ودخوله إلى التوربينة. لذلك، وبخلاف الاختراع الذي يتم تقديمه هنا، فإن سائل التشغيل في الوثيقة EP 1 801 364 A1 يشهد تغيرات في الطور.

إن براءة الاختراع الأمريكية US 8 006 496 B2 تصف جهازا يحول الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية من خلال دورات دينامية حرارية مثل رانكن أو برايتون وغيرهما. مع ذلك، وكما يتضح في الشكل 2A، في أحد أطوار الدورة يتحرك السائل داخل الغرفة ثنائية الطور، ويحدث بذلك تغيرا للطور أثناء هذا التطور. وفي تشكيلات أخرى (انظر الشكل 2C)، لا يتحرك السائل داخل المنطقة ثنائية الطور في الغرفة، غير أن حرارة التشغيل في بعض أجزاء الدورة تكون أقل من مستوى التحارر الحرج. في الجزء المخصص لتقديم براءة الاختراع هذه، تم إعداد تحليل مفصل للوثائق المتأتية من الملكية الصناعية في هذا المجال، حيث لم تظهر هناك أية إشارة إلى مجال الدينامية الحرارية الذي يقترحه هذا الاختراع، ولا إلى الأوصاف التي تطرأ على السائل الديناميكي الحراري ودورة تشغيله.

تصف الوثيقة US7926276 دورة برايتون مغلقة تجديدية تتمثل خصوصيتها في المصدر الحراري، ووجود معدن مذاب ومُؤكسد، غير أنها لا تصف أية حالة دينامية حرارية للدورة.

أما الوثيقة WO20011018663 فإنها تعرض نوعا آخر من دورة برايتون مغلقة، مع آلات للانتقال الإيجابي، دون إيراد مواصفات تخص البوزة الباردة ولا الطور التجديدي للاسترجاع الداخلي للحرارة.

في حين تصف الوثيقة US2009308072 دورة برايتون مفتوحة يتجسد عنصر الابتكار خلالها في استخدام الطاقة الشمسية لتنشيط استخلاص الهيدروجين من أحد الهيدريدات، وذلك لاستخدامه في غرفة احتراق.

ويستخدم الطلب US2010162792 أيضاً المصدر الشمسي الحراري لتنشيط دورة برايتون، غير أن هذه الدورة تُعد تقليدية ومفتوحة، ويحتمل أن يكون ذلك مفيدا لتسيير الطائرات غير المأهولة.

وتقدم الوثيقة WO2009125103 تعديلات على دورة برايتون مغلقة تتعلق بإجراء الضغط والتمديد عبر مراحل، غير أنها لا تضع الدورة في أية منطقة معينة من خريطة الملكيات الدينامية الحرارية.

بينما يصف الطلب US2011113780 دورة برايتون مغلقة تستخدم CO_2 كسائل تشغيل، غير أنها تستخدم مُسترجع حرارة كبوزة باردة لتغذية دورة رانكن بالطاقة، وبذلك يتعلق الأمر بدورة مُركبة مماثلة للدورات المعتادة، غير أنها ذات دورة مغلقة.

ويتم تقديم الطلب CA2740259 كنوع آخر من دورة برايتون يستخدم تغويز الغاز الطبيعي كبوزة باردة.

ولا تتوفر أية وثيقة من الوثائق المشار إليها على معلومات ذات صلة بالاختراع الذي يتم تقديمه هنا.

من ناحية أخرى، قام "Chen et al" في "مراجعة الدورات الدينامية الحرارية وسوائل التشغيل لتحويل الحرارة ذات الدرجة المنخفضة" (مراجعات الطاقة المتجددة والمستدامة، 14 (2010)، صفحات: 3059-3067، إلسفيير) بمراجعة دورات رانكن، وقد كان بعض منها يتجاوز درجة الحرارة الحرجة، مع سوائل تشغيل مختلفة عضوية. ولم يحدث في أية حالة أن تتطور الدورة بشكل تام في المنطقة ذات الحرارة الأعلى إلى مستوى التحارر الحرج، وتُنتج دائما تغيرا في الطور عبر الغرفة ثنائية الطور في الجزء الخاص بالتبريد.

سيتم لاحقا تقديم وصف ديناميي حراري للدورات من نوع برايتون، مع الاهتمام خصوصا بتلك التي تستخدم غازا مثاليا كسائل تشغيل باعتبار أنها الأكثر انتشارا، سواء كان هواءا أو خليطا مماثلا، حيث يتحرك سائل التشغيل المذكور في درجات حرارية أعلى من الدرجة الحرجة دون تغيير في الطور (وهو الشيء الذي يمكن إظهاره بسهولة في رسم بياني P-h، الضغط-المحتوى الحراري، أو T-S، الحرارة-إنتروبية). تعد دورة برايتون السائدة هي المستخدمة لتوربينات الغاز، سواء لتوليد الطاقة الكهربائية أو الطاقة الدافعة، خصوصا في مجال الطيران، حيث يكون ضغط خط تساوي الضغط المنخفض هو الجو، وبذلك يكون العادم مفتوحا نحو الجو، وعلى هذا النحو يتم جلب هواء الاحتراق من الجو، وتكون الدورة مفتوحة بالفعل. في هذه التطبيقات، تتجاوز الحرارة القصوى للدورة، في نهاية خط تساوي الضغط وقبل التمدد في التوربينة، بمئات الدرجات قيمة 1000 درجة مئوية، وكذلك عند مخرج التوربينة تبلغ درجة حرارة غاز العادم أكثر من 500 درجة مئوية، وهذا يعني درجات حرارية تتجاوز درجات الحرارة البيئية. ويتم عادة استغلال هذه الحرارة في الدورات التي تسمى "الدورات المركبة"، حيث يتم تغذية دورة رانكن من الماء/البخار حراريا بغازات العادم من دورة برايتون.

من المناسب أيضاً تصميم وتشغيل دورات برايتون مغلقة، والتي يتم خلالها المحافظة على سائل التشغيل باستمرار داخل أجهزة وأنابيب غير مفتوحة نحو الجو. في دورات برايتون هذه، يمكن للغاز المنبعث من التوربينة أو من المكبس بشكل عام أن يصل إلى درجات حرارية جد عالية، وعند تبريد كل هذه الحرارة باستخدام بوزة تبريد خارجية، يتم عادة استغلال جزء من هذه الحرارة بشكل تجديدي، حيث يتم تحويلها إلى السائل ذي الضغط المرتفع كما لو كان يخرج من المكبس.

من الواضح أن درجة الحرارة عند مخرج التوربينة تكون أقل أو في مستوى درجة الحرارة في مخرج المكبس، ولذلك لا يمكن إجراء دورة تجديدية.

تتمثل الحدود النظرية المشتركة في الحالات التجديدية وغير التجديدية عندما تتطابق درجات الحرارة في مخرج المكبس وفي مخرج التوربينة، وهي ما تسمى بالحالة المُعدلة، والتي تُستخدم لذلك كمرجع مشترك.

في الدورة غير التجديدية، يمكن اختيار درجة حرارة مخرج المكبس على نحو تكون فيه أكبر مما هي عليه في الحالة المُعدلة، ولذلك ينبغي استخدام نسبة من الضغوطات، بين الضغط الأعلى P_a والأدنى P_b، أعلى من نسبة الضغوطات في الحالة المُعدلة. ومع ذلك، يوجد في هذا التوجه حد أعلى يتمثل في درجة الحرارة القصوى T_M التي يمكن أن يصل إليها سائل التشغيل حسب البوزة الساخنة المتوفرة. يتم لاحقا تحليل حدود كل من الحالة المُعدلة والعليا، والآثار المترتبة لذلك على المردود والعمل المعين الصافي الناتج. ولإتمام الوصف الديناميي الحراري تم إطلاق رمز T_n على الحرارة الدنيا التي يحتاجها سائل التشغيل حسب البوزة

الباردة المتوفرة. ويتم إطلاق رمز "c" على نسبة الضغوطات أو نسبة الضغط، والتي هي خارج قسمة P_a/P_b؛ حيث تكون P_a هي الضغط الأعلى أو المرتفع، بينما تكون P_b هي الضغط الأدنى أو المنخفض. وأخيرا، يتم إطلاق الرمز Y على خارج قسمة الدرجات الحرارية المعينة ذات الضغط والحجم الثابت؛ C_p و C_v على التوالي.

في التوضيح الوارد أدناه، سيتم افتراض غازات مثالية في آليات مثالية عكوسة. وهذه المرجعية تفيد في الأغراض التوجيهية المتعلقة بماذا يحدث ولماذا. بعد ذلك، سيتم تسليط الضوء على السوائل التي لا تتصرف كالغازات المثالية في منطقة ديناميكية حرارية معينة، بينما تتصرف كغازات مثالية في أغلب أجزاء الحالات الديناميكية الحرارية. في هذه المناطق غير المثالية، سيتم البحث عن خصائص الغازات التي تقدم أفضل النتائج عندما يتم استغلالها في دورة قوة. وفي النهاية، يجب الأخذ بعين الاعتبار أن الآليات غير عكوسة، وإلا تعرضت لخسائر معلومة، والتي تؤثر أيضا على المُبادلات الحرارية.

عندما يتحرك غاز مثالي ذو C_p و C_v ثابتتين خلال مجالٍ بدون تغير في الانتروبية، فإن النسبة بين درجة الحرارة T_{al} تحت ضغط P_a ودرجة الحرارة T_b تحت ضغط P_b هي:

$$T_{al}/T_b = c^{(\gamma-1)/\gamma}$$

عندما لا يكون الغاز مثاليا، أو أن C_p و C_v غير ثابتتين، فإن العلاقة السابقة لا تنطبق، غير أنه يمكن استخدام علاقة مماثلة من خلال الاعتماد على عبارة Y لا تكون خارج قسمة الدرجات الحرارية المعينة ذات الضغط والحجم الثابت، بل تكون معاملا ثابت الحرارة ذو طبيعة ظاهراتية هو k، على نحوٍ يتم فيه استخدام التعبير التالي مع طابعه العام:

$$T_{al}/T_b = c^{(k-1)/k}$$

حيث لن تكون "k" قيمة ترتبط بشكل مباشر بالخصائص الأساسية مثل C_p و C_v.

انطلاقا من مدخل المكبس (توربينة، ذات اللولب، الحلزونية (المُلتفة)، ...)، يتم تحديد الدورة المغلقة غير التجديدية بشكل مثالي من خلال خطين متساويي الضغط ومجالين بدون تغيير في الانتروبية، مع الأطوار التالية:

1. تمدد بدون تغيير في الانتروبية يحدث في المكبس، انطلاقا من خط تساوي الضغط المرتفع P (النقطة العليا T في هذا الخط، والذي يسمى النقطة A كمُعرف داخلي في هذه الوثيقة، من أجل تسهيل كتابته دون إخلال بالدقة، والذي يصل فيه إلى T_M) إلى خط تساوي الضغط المنخفض P (النقطة العليا T في خط تساوي الضغط هذا، والذي يسمى النقطة B).

2. تبريد خارجي في البوْرة الباردة يتبع خط تساوي الضغط المنخفض P، انطلاقا من النقطة B إلى النقطة C، والتي تعد نقطة مخرج بوْرة التبريد، حيث يصل الغاز إلى درجة الحرارة T_n. تتكون البوْرة الباردة من مُبادلٍ يمر سائل التشغيل من مساره الأول، وفي المسار الثاني يمر المُبرّد الخارجي، حيث يكون الغلاف الجوي أو المحيط المائي أخر منفذ لهذه الحرارة؛ بالإضافة إلى أجهزة متنوعة يمكن أن تحدث التبريد الخارجي.

3. ضغط بدون تغيير في الانتروبية انطلاقا من النقطة C، والتي تعد T الأكثر انخفاضا في خط تساوي الضغط المنخفض P، إلى خط تساوي الضغط المرتفع P، المسمى نقطة D، الموجودة في نهاية ذلك الضغط، وهي النقطة التي تتوفر على أقل T في خط تساوي الضغط المرتفع للدورة. يتم إجراء الضغط داخل مكبس تم اختياره لكي يتلاءم مع نسبة الضغط الثابتة.

4. تزويد أساسي بالحرارة القادمة على الأقل من بوْرة ساخنة، ويمكن أن يكون جهازا مُلتقطا للطاقة الشمسية، أو مُبادلاً حراريا يعتمد أساساً على احتراق أي نوع من المحروقات سواءا كانت كتلة حيوية، أو وقودا أحفوريا، الخ. ويحدث هذا التزويد على طول خط تساوي الضغط المرتفع P، انطلاقا من النقطة D إلى النقطة A.

يمكن إضفاء طابع أكثر شمولية على الدورة من خلال افتراض أن الضغط والتمدد لا يتمان بدون تغيير في الانتروبية، وإنما يتمان بشكل بوليتروبي، بوجود معاملات والتي تقوم بتجميع مزايا الآليات والسائل. بيد أنه إذا لم تتم معرفة هذه الخصائص بشكل مُسبق فإن التحليل النظري يمكن أن يستند على التطورات الطارئة بدون تغيير في الانتروبية، والتي تم تحديدها بشكل كامل.

يمكن تحديد المردود η حسب المحتويات الحرارية المعينة للسائل، وحسب الصيغة

$$\eta = ((hA - hB) - (hD - hC))/(hA - hD)$$

أو بدلا من ذلك بالصيغة

$$\eta = ((hA - hD) - (hB - hC))/(hA - hD)$$

يُفضل أن يتوقف المردود على تنوع الخصائص الديناميةالحرارية في المجال العام ضغط-حرارة (P، T)، على الرغم من إمكانية استخدام صور أخرى. بشكل خاص، تُفيد صيغة هذه الخصائص في رسم بياني (h، P) بنسق "محتوى حراري معين" (h في المحور الأفقي) و "ضغط" (P في المحور العمودي)، ثم تُقاس التبادلات الحرارية بالتغيرات في المحتوى الحراري، وعمل الآليات، سواءا كان سلبيا أو مُستهلكاً (في آلات الضغط) أو كان إيجابيا أو تم إنجازه نحو الخارج (في آلات التمديد)، كما يمكن قياسه بالتغيرات في المحتوى الحراري. يطلق رمز Δh_c على تزايد المحتوى الحراري المعين في سائل التشغيل عند مروره بالمكبس، وتكون القوة الميكانيكية N_c المُستهلكة به هي

$$N_c = \Delta h_c \, m^{\cdot}$$

على نفس المنوال، يتم إطلاق رمز Δh_t على على تناقص المحتوى الحراري في سائل التشغيل عند مروره بالتوربينة أو المكبس، وتكون القوة الميكانيكية التي تم إحداثها بذلك هي

$$N_t = \Delta H_t \, m^{\cdot}$$

أما القوة الصافية المُتبقية كقوة نافعة N في المحور المشترك لكلتا الآلتين، والذي يُعد في نفس الوقت محور المولد الكهربائي، فتكون

$$N = N_t - N_c = m^{\cdot}(\Delta h_t - \Delta h_c)$$

في كلا التطورين للسائل داخل كل آلة يتم اعتبار النقل متساوي الانتروبية، وهو ما يجعل الأشكال التي تتخذها الخطوط متساوية الانتروبية في الخريطة (h، P)، وفي أي رسم بياني ديناميحراري آخر، تكون ذات أهمية قصوى لتحديد مواصفات الدورة. في المكبس، يتحرك الغاز المثالي على طول خط انتروبية ثابت، S_t، حيث ينزل انطلاقا من الضغط المرتفع P_a إلى الضغط المنخفض P_b؛ ويقلل في نفس الوقت المحتوى الحراري للسائل، والذي يتحول إلى قوة يتم إلحاقها بمحور الآلة. أما في المكبس، فيتم تزويد محوره بالطاقة كي يكتسب السائل مزيدا من المحتوى الحراري، ويمر انطلاقا من الضغط المنخفض P_b إلى الضغط المرتفع P_a على طول خط انتروبية ثابت S_c. وعلى هذا النحو يمكن كتابة معادلة القوة النافعة في المحور كالآتي:

$$N = m^{\cdot} \cdot \int \{ (\delta h/\delta P)_{St} - (\delta h/\delta P)_{Sc} \} dP$$

يمتد تكامل الجانب الأيمن انطلاقا من الضغط المنخفض P_b نحو الضغط المرتفع P_a، وهو ما يعطي فكرة عن أهمية أن يكون أول اشتقاق للدالة أكبر من الثاني. بعبارة أخرى، يجب أن يكون انحدار تساوي انتروبية التمدد أكبر من انحدار الضغط حتى يمكن الحصول على عمل نافع في محور الآلة.

اشتقاقات الدالة السابقة، للمحتوى الحراري المتعلق بالضغط ذي الانتروبية الثابتة، هي مساوية للحجم المعين، V، والموافق لكل تساوي للانتروبية، ولكل مستوى من الضغط، طبقا للصيغة التالية:

$$N = m^{\cdot} \cdot \int \{ V_{St} - V_{Sc} \} dP$$

على نفس المنوال، تكون خطوط التحارر مهمة، حيث أن درجات الحرارة مرتبطة بالتزويد الحراري للبوزة الساخنة، وعملية التبريد في البوزة الباردة. لذلك تُعد خطوط التحارر خطوطا أساسية لتحديد شروط المحيط الذي يجب أن تجري فيه الدورة.

تجدر الإشارة إلى أنه بسبب الطابع غير العكوسي الخاص بكل تطور ديناميحراري حقيقي، والذي يدوم لفترة محدودة، فإن التطورات المذكورة سابقا للدورة لا تتوافق تماما مع خطوط تساوي الضغط، وعندما توصف على أنها كذلك، فإن الضغط يشرع في الانخفاض إلى حد ما طيلة هذا الطور، كما أن خطوط تساوي الانتروبية ليست كذلك أيضا، حيث أن الانتروبية تشرع في النمو. يتم أخذ هذه التأثيرات بالاعتبار في بعض التطبيقات المعينة، حيث أنها تتوقف كثيرا على الآلات والمسارات المستخدمة لتحريك السائل؛ غير أنه لتحديد الدورة، بما في ذلك إعطاء مواصفات تتعلق بخصائصها الديناميةالحرارية، فيتم استخدام تعريفها النظري.

من المحتمل في ظل التوفر على آلات ضغط وتمديد محددة تُستخدم في تجسيد الدورة، أن يتم التمكن من تعديل أطوار التمدد والضغط بشكل أفضل من خلال التحولات البوليتروبية باستخدام أسس مُعدلة على التطورات الحقيقية؛ غير أنه عند تنويع هذه الأسس من آلات إلى أخرى، فإن المعادلة يجب أن تستند على التمثيل النظري لخطوط تساوي الانتروبية، حسب المعامل γ بالنسبة لحالة الغازات المثالية، أو المعامل k بالنسبة للغازات التي لا تتصرف بشكل مثالي.

تسمى قوة التزويد الخارجي بالحرارة في البؤرة الساخنة 'Q، بينما يسمى تغير محتواها الحراري Δh_q، حيث تكون صيغة 'Q بالواط.

$$Q' = m' \cdot (hA - hD) = m' \cdot \Delta h_q$$

وتسمى قوة استخلاص حرارة البؤرة الباردة 'E، سواءا تم ذلك في الجو أو في المحيط المائي، بينما يسمى تغير محتواها الحراري Δh_e (بالقيمة المطلقة) ، حيث تكون صيغة 'E

$$E' = m' \cdot (hB - hC) = m' \cdot \Delta h_e$$

ويجدر الانتباه إلى إلى أن القوة النافعة تتناسب مع الفارق $(\Delta h_t - \Delta h_c)$، بينما يكون تغير المحتوى الحراري المعين للدورة هو النمو الذي يحدث انطلاقا من نقطة المحتوى الحراري الأكثر انخفاضا في مخرج البؤرة الباردة، نحو نقطة المحتوى الحراري الأكثر ارتفاعا في مخرج البؤرة الساخنة، والذي يمكن التعبير عنه، بالقيم المطلقة لتغيرات المحتوى الحراري، على الشكل الآتي:

$$\Delta h_c + \Delta h_q$$

أو بدلا من ذلك بالصيغة

$$\Delta h_t + \Delta h_e$$

في الأخير تنبغي الإشارة إلى أمر لا يقل أهمية يتعلق بتبريد البؤرة الباردة، حيث أنه كلما كانت درجة الحرارة أكثر انخفاضا من تلك التي يتم إعدادها، سيكون المردود أكبر، كما هو الأمر في باقي متغيرات الدورة. في هذا الصدد، يجب الأخذ في الاعتبار بأن سائل التشغيل لا يجب أن تنزل درجة حرارته أبدا عن الدرجة الحرجة الخاصة به، حتى لا يشرع في التكاثف بفعل التغير في الطور. لذلك يجب أن تكون درجة الحرارة الدنيا التي يبلغها السائل في الدورة، التي تسمى T_n، أعلى من درجة الحرارة الحرجة للسائل المذكور، T_{cr}.

إن ذلك يعتبر أول إشارة إلى أهمية النقطة الحرجة في هذا الاختراع، كما يتم تفسيره في الفقرة التالية.

هذه المراجعة الحديثة يجب إتمامها بعرض خصائص دورة برايتون غير التجديدية عندما يكون سائل التشغيل غازا مثاليا، والذي يُعد الاستخدام الأمثل. يتم الانطلاق من شروط تشغيلية هي:

- الضغط المرتفع P_a
- الضغط المنخفض P_b
- درجة الحرارة القصوى التي يبلغها غاز التشغيل، $T_M = T_A$، حيث يتم الوصول إلى النقطة A
- درجة الحرارة الدنيا التي يبلغها غاز التشغيل، $T_N = T_C$، حيث يتم الوصول إلى النقطة C

من المعلوم أن مردود دورة برايتون للغاز المثالي تتوقف فقط على نسبة الضغط c، حسب المعادلة:

$$\eta = 1 - (1/c)^{(\gamma-1)/\gamma} = 1 - c^{(1-\gamma)/\gamma}$$

غير أنه في نفس الوقت يتم استيفاء

$$T_A/T_B = T_D/T_C = c^{(\gamma-1)/\gamma}$$

وإذا كان الأمر يتعلق بدورة مُعدلة، أي $T_D = T_B$، فإننا نجد

$$T_A/T_C = T_M/T_n = c^{2(\gamma-1)/\gamma}$$

علاوة على ذلك، يتم استيفاء

$$T_B = T_D = (T_A \cdot T_C)^{1/2}$$

وإذا أخذنا بعين الاعتبار صيغة المردود، فإنه يتم الوصول عند تخصيصه في الحالة المُعدلة إلى

$$\eta = 1 - (T_n/T_M)^{1/2}$$

والذي يكون دائما أقل بشكل منطقي من مردود كارنو، η_C

$$\eta_C = 1 - (T_n/T_M)$$

مع ذلك، فإن الدورة لا تحتاج إلى التعديل، حيث أن T_D يمكن أن تكون أكبر من T_B، بالرغم من أن ذلك يستدعي نسبة أكبر من الضغط. وفي الواقع، يمكن لهذه النسبة أن ترتفع إلى أن تتساوى T_D مع T_M، وبالتالي مع T_A. وإن أقصى نسبة ضغط c_M تؤدي إلى هذه الحالة تستوفي المعادلة التالية:

$$T_A/T_C = T_M/T_n = c_M^{(\gamma-1)/\gamma}$$

في هذه الحالة، يكون مردود الدورة كالآتي:

$$\eta = 1 - (T_n/T_M)$$

ويعني ذلك أنه يساوي مردود كارنو الذي يتحرك بين نفس الدرجات الحرارية القصوى، ويصل بذلك إلى أقصى ما يمكن، غير أنه يعاني من نقص جد خطير: في الحقيقة لا توجد هناك دورة، حيث أن خط تساوي انتروبية الضغط يتطابق مع خط تساوي انتروبية التمدد. الدورة غير موجودة، وبالتالي هناك حرارة يتم امتصاصها من البوزة الساخنة، والتي يتم تحويل جزء منها إلى طاقة ميكانيكية والباقي يتم إخراجه إلى البوزة الباردة. في الأغراض الحقيقية تعتبر دورة غير مفيدة، حيث أنه في الظروف المثالية المفترضة ودون وجود تعذر للانعكاس، فسيتم الحصول على آلة تقوم بالضغط وأخرى تقوم بالتمديد، دون استهلاك ولا توليد للطاقة. ومن الناحية العملية، حيث أن طابع اللانعكاس يعد أمرا حتميا، فلن يمكنها الاشتغال بل سوف تستهلك الطاقة.

إن ذلك يعد الإطار التقليدي لدورة برايتون مغلقة غير تجديدية، والتي تتوفر على حدود في المردود والنفع نظرا للمعادلات السابقة. مع ذلك، فإن الطبيعة تتوفر بشكل تلقائي أو عن طريق التركيب الصناعي على سوائل ذات خصائص مغايرة لخصائص الغاز المثالي. بشكل أوضح، توجد في أغلب السوائل، فوق خط التحارر الحرج ولكن قرب النقطة الحرجة، منطقة في الرسم البياني (h، P) يمكن أن نسميها النطاق المحيط بالنقطة الحرجة، والتي تكون فيها قيم الحرارة المعينة ذات الضغط الثابت أعلى بكثير من القيم الموجودة في النقط البعيدة عن هذه المنطقة. يجب أن نأخذ هذا الأمر بعين الاعتبار سواء بالنسبة للدورة غير التجديدية أو للدورة التجديدية، وهو ما سيتم وصفه لاحقا.

انطلاقا من مدخل آلة تمديد ((توربينة، ذات اللولب، الحلزونية، ...) يتم تحديد الدورة المغلقة التجديدية بشكل مثالي بواسطة خطين لتساوي الضغط وخطين لتساوي الانتروبية، مع وجود الأطوار التالية، ويجب الأخذ بالاعتبار أن هناك نقطتان مهمتان إضافيتان تظهران في الدورة، وبذلك يتم إعادة ترقيم كل النقط كالآتي:

1. تمدد متساوي الانتروبية يحدث في المكبس، انطلاقا من خط تساوي الضغط المرتفع P (النقطة العليا T في هذا الخط، والتي تسمى النقطة 101 كمُعرِّف داخلي لهذه الوثيقة، من أجل تسهيل كتابته دون إخلال بالدقة) إلى الخط المنخفض P (النقطة العليا T في خط تساوي الضغط هذا، والتي تسمى النقطة 102)، حيث يطلق رمز S_t على أنتروبية خط تساوي الانتروبية.
2. تبريد تجديدي يحدث في جانب الخط المنخفض P للمُبادل الحراري التجديدي، حيث يمر السائل من النقطة 102 إلى نقطة المخرج في المُبادل المذكور، التي تسمى النقطة 103 والموجودة في الخط المنخفض P، حيث تكون درجة حرارة النقطة 103 أكبر أو تساوي T نقطة مخرج المكبس، والموجودة في نهاية الطور 4 (التي تسمى النقطة 105).
3. تبريد خارجي في البوزة الباردة، يتبع خط تساوي الضغط المنخفض P، انطلاقا من النقطة 103 إلى النقطة 104 التي تعتبر نقطة مخرج البوزة الباردة. تتكون البوزة الباردة من مُبادل يمر من خلال مساره الأول سائل التشغيل، وفي المسار الثاني يمر المُبرِّد الخارجي، حيث يكون الغلاف الجوي أو المحيط المائي آخر منفذ لهذه الحرارة؛ بالإضافة إلى أجهزة متنوعة يمكن أن تحدث التبريد الخارجي.
4. ضغط متساوي الانتروبية انطلاقا من النقطة 104، والتي تعد T الأكثر انخفاضا في خط تساوي الضغط المنخفض P، إلى خط تساوي الضغط المرتفع P، حيث تكون النقطة 105 هي التي تحدد مخرج المكبس. يتم إجراء الضغط داخل مكبس تم اختياره لكي يتلاءم مع نسبة الضغط الثابتة، حيث يطلق رمز S_t على أنتروبية خط تساوي الانتروبية.
5. تسخين تجديدي يحدث في جانب الخط المرتفع P للمُبادل الحراري التجديدي، حيث يمر السائل من النقطة 105 إلى النقطة 106 على طول الخط المرتفع P، وتكون درجة حرارة النقطة 106 أصغر أو تساوي T نقطة مخرج المكبس في نهاية الطور 1 (نقطة 102). النقطة التي تسمى 106 هي نقطة مخرج المُبادل الحراري التجديدي في مسار الخط

المرتفع P. خلال دورة مثالية، يكون المحتوى الحراري المُكتسب في هذا الطور (h105 – h106) مُساوياً للمحتوى الحراري الضائع في الطور 2 (h103 – h102).

6. تزويد أساسي بالحرارة القادمة على الأقل من بؤرة ساخنة، ويمكن أن يكون جهازا مُلتقطا للطاقة الشمسية، أو مُبادلاً حراريا يعتمد أساساً على احتراق أي نوع من المحروقات سواءا كانت كتلة حيوية، أو وقودا أحفوريا، الخ. ويحدث هذا التزويد على طول خط تساوي الضغط المرتفع P، انطلاقا من النقطة 106 إلى النقطة 101.

يمكن تحديد المردود η للدورة كالآتي:

$$\eta = ((h101 - h102) - (h105 - h104))/(h101 - h106)$$

أو بدلا من ذلك بالصيغة

$$\eta = ((h101 - h106) - (h103 - h104))/(h101 - h106)$$

كل الدورات التجديدية تتوفر أساسا على نفس الميزة، حيث أن قيمتي V_{St} و V_{Sc} ليستا مقترنتين بشكل مباشر، حيث يفصل بينهما الطور التجديدي، وكلما فصل بينهما بشكل أكبر، كلما كانت قيمة الأول أكبر من الثاني، وبالتالي تكون القوة N الناتجة أكبر، والتي تساوي:

$$N = m \cdot \int \{ V_{St} - V_{Sc} \} dP$$

منطقيا، يشتمل هذا التحسن على تكلفة، وهي تكلفة المُبادل التجديدي الذي سيتم تقييمه في حينه.

لقد تم أخذ هذه الدورة التجديدية بالاعتبار، خصوصا في آخر التطورات الحديثة، بالنسبة للضغوطات (بما في ذلك خط تساوي الضغط المنخفض) التي تتجاوز الضغط الحرج للسائل P_{Cr}، كما هو مشار إليه فيما يتعلق ببراءة الإختراع الأمريكية US 8 006 496 B2 (خصوصا الشكل 2C).

خلال الاختراع المُقدم في هذا الطلب، تمت تحت منظور جديد دراسة فائدة أن تكون البؤرة الباردة في دورة برايتون تجديدية هي البيئة المحيطة بشكل مباشر، سواءا كانت الغلاف الجوي أو المحيط المائي، ويتم اختيار سائل التشغيل كي تتلاءم خصائصه مع الشروط المناسبة لإنتاج مردود عالٍ في الدورة، من أجل تحويل جزء ثمين من الطاقة الحرارية المأخوذة من البؤرة الساخنة إلى طاقة ميكانيكية نافعة في محور الآلات. ويتم اختيار السائل حسب شروط الوسط المذكور آنفا، ويعتبر ذلك أمرا جوهريا لاستخدام الوسط البيئي مباشرة لذلك الغرض، سواءا كان المحيط المائي أو الغلاف الجوي الذي يكون متميزا بمناخ الموقع الذي سيتم فيه تأسيس المنشأة التي تشتغل طبقا لهذه الدورة. في هذا المناخ يتم تحديد التوزيع السنوي لدرجات الحرارة، أو يتم فقط في هذا التوزيع تحديد الأوقات (اليومية، الفصلية) التي سوف تشتغل خلالها المنشأة. من خلال هذه القيم الإحصائية يتم استنباط توزيع عادي مع درجة حرارية متوسطة T_{av} وانحراف نمطي σ؛ وانطلاقا من هذه المعطيات يمكن اختيار القيمة الممثلة T_r لدرجة حرارة التبريد. إذا تم اعتبار T_r مثل $\sigma + T_{av}$، فسوف تكون هناك حرارة بيئية فوق قيمة T_r هذه فقط 16% من الوقت، وإذا تم اعتبار T_r مثل $2\sigma + T_{av}$، فسوف تكون هناك حرارة بيئية فوق قيمة فقط 2,5% من الوقت. باختصار، يتم اختيار قيمة T_r حسب المعايير التقنية-الاقتصادية للمشروع الذي يُستخدم فيه الاختراع، وسوف تشارك قيمة Tr المذكورة في مواصفات الاختراع.

يتمثل الاختراع في استغلال خصوصيات بعض السوائل من أجل تشغيل دورة برايتون مغلقة، من خلال العمل في شروط ضغط تقوم بتحسين عملها بالنسبة لبعض الشروط الحرارية المعينة في البؤرة الساخنة والباردة، والتي تتميز بقيم T_M و T_n. من أجل ذلك سيتم الأخذ بعين الاعتبار ليس فقط المردود الطاقي العادي، بل أيضا ما يلزم لتوليد وحدة للطاقة، بما في ذلك كل المكونات التي تكون الدورة، والذي يتم قياسه انطلاقا من المحتوى الحراري وأيضا بواسطة التقييم الاقتصادي المتعلق بكل مُكوّن، وهو ما يؤدي إلى صياغة الاختراع انطلاقا من اختيار السائل حسب نقطته الحرجة الديناميكية الحرارية، وأيضا إلى اختيار خطوط تساوي ضغط التشغيل، ونقط تشغيل كل طور في الدورة.

وصف المشروع

في دورات برايتون التي لا يمكن فيها استرجاع الحرارة، نظرا لأن درجة حرارة مخرج المكبس تكون أكبر أو تساوي درجة حرارة مخرج التمديد، وفي حالة الغاز المثالي، فقد تمت ملاحظة أن المردود يتوقف فقط على نسبة الضغط c

$$\eta = 1 - (1/c)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

يتم تغيير قيمة C انطلاقا من من حدها الأدنى الذي يتناسب مع الحالة المُعدّلة نحو الحد الأقصى، ويعني ذلك أن $T_D = T_A = T_M$، بحيث يساوي هذا الأخير المردود الأكبر، وهو مردود كارنو؛ بينما يتواجد في حدود الحالة المُعدلة المردود الأصغر. على أية حال، اذا تم ضرب المردود في الحرارة المضافة في خط تساوي الضغط المرتفع، يتم الحصول على التأثير النافع للدورة Y، والذي يمثل العمل المعين الصافي الذي تم إنجازه

$$Y = \eta \cdot C_p \cdot (T_M - T_D)$$

نطلق رمز x على $c^{(\gamma-1)/\gamma}$ وباستخدام العلاقة بين T_D و T_n بالنسبة لتساوي انتروبية المكبس، يمكن الحصول على أقصى ما يمكن من الدالة Y فيما يتعلق بـ x (والتي يمكن أيضا رفعها إلى الحد الأقصى بالنسبة إلى c، باعتبار أن x دالة متزايدة، ذات قيمة Y ثابتة بالنسبة لسائل معين). وتكون الدالة Y واشتقاقها Y' بالنسبة إلى x كالأتي

$$Y = (1 - (1/x)) \cdot C_p \cdot (T_M - T_n \cdot x)$$

$$Y' = (1/x^2) \cdot C_p \cdot (T_M - T_n \cdot x) + (1 - (1/x)) \cdot C_p \cdot (-T_n)$$

وإذا تمت مساواة الصيغة الأخيرة بـ 0 نحصل على

$$T_M/x^2 = T_n$$

وبالتالي

$$T_M/T_n = c^{2(\gamma-1)/\gamma}$$

وهو ما يسمى بالحالة المُعدّلة، حيث تكون $T_D = T_B$، وبالتالي تكون أكبر نسبة ضغط هي تلك التي تنطبق على الصيغة السابقة، والتي نسميها c_a.

$$C_a = (T_M/T_n)^{\gamma/2(\gamma-1)}$$

بالنسبة إلى قيمة $\gamma = 1,28$ على سبيل المثال، يساوي الأس الأخير 2,29. وإذا تم اعتبار $T_n = 320$ K و $T_M = 673$ K كقيم لدرجات الحرارة، فإن النسبة بين درجات الحرارة هي 2,1 ونسبة الضغط في الحالة المُعدّلة هي ca=5,47.

وإذا كان السائل المستخدم سوف يتصرف كغاز مثالي في المنطقة الدينامية الحرارية التي تهمنا، فإنه يمكن اختيار P_a و P_b بحرية، طالما كانت العلاقة c_a قائمة بينهما. مع ذلك، تتميز السوائل الحقيقية بخصائص دينامية حرارية لا سيما قرب النقطة الحرجة، وخصوصا بالنسبة لدرجات الحرارة القريبة من الدرجة الحرجة، وفي تلك الحالة يختلف تصرفها عن تصرف الغازات المثالية. وعندما تكون درجة الحرارة فوق الدرجة الحرجة بكثير، يتصرف السائل عموما كغاز مثالي خصوصا في ظل الضغوطات التي تكون أقل من الضغط الحرج.

في خطوة أولى، يتمثل الاختراع في اختيار سائل تشغيل يحتوي على منطقة دينامية حرارية قرب النقطة الحرجة، التي نسميها النطاق المحيط بالنقطة الحرجة، والتي يوجد فيها خط التحارر T_n، والذي شأنه شأن جميع خطوط التحارر في المنطقة المذكورة يمثل في رسم بياني من نوع محتوى حراري-ضغط نقطة انحناء نتيجة للقيم المرتفعة للحرارة المعينة ذات الضغط الثابت والمتأصلة في هذه المنطقة، خصوصا بالنسبة لخط تساوي الضغط الحرج. في نقط الانحناء التي تظهر على خطوط التحارر في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة، تتوفر خطوط التحارر على جزء يوازي بشكل ملموس خطوط تساوي الضغط، ولذلك تتوفر على قوائم عمودية عند خطوط تساوي الانثالبي؛ أما بالنسبة للتصرف المعتاد لخطوط التحارر، ونقصد بذلك الغاز المثالي، فإنها تكون عمليا بشكل متعامد مع خطوط تساوي الضغط. وهذا يحدث فعليا في الضغوطات التي تفوق النطاق المحيط بالنقطة الحرجة، كما يحدث ذلك أيضا في الضغوطات التي تقل عن النطاق المحيط بالنقطة الحرجة. على نفس المنوال، تُظهر خطوط التحارر في كل حالة مجموعة من الأقواس التي تشبه ربع دائرة نحو الأعلى ونحو الأسفل، والتي تقود انطلاقا من مناطق تصرف الغاز المثالي أو ما يماثله نحو نقط الانحناء التي يُظهرها كل خط للتحارر في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة.

يحدث في هذه المنطقة فعلٌ دينامي حراري ينبغي الإشارة إليه، والذي يشكل الفرق بين السوائل الحقيقية والغاز المثالي. بالنسبة لخط التحارر فوق الدرجة الحرجة وتحت ضغط جد منخفض، تبقى الحرارة المعينة ذات الضغط الثابت C_p ثابتة، وفي رسم بياني ديكارتي h، P (المحتوى الحراري في المحور الأفقي، والضغط في المحور العمودي) يكون خط التحارر خطا مستقيما عموديا يتوافق مع خط تساوي الانثالبي، بينما يتعامد مع خطوط تساوي الضغط. وعندما يقترب الضغط من درجة الضغط الحرج، وذلك عند الدخول في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة، فإن الحرارة المعينة C_p ذات الضغط الثابت ترتفع بشكل ملموس مع الضغط، وهو

ما يؤدي إلى أن تبدأ قيمة المحتوى الحراري لنقط خط تساوي الضغط في الانخفاض كلما بلغت تلك النقط درجات أعلى من الضغط، حيث تأخذ شكل خط أفقي، وهو أمر يحدث فقط عند تساوي درجات الحرارة في الحالة الحرجة، حيث يأخذ شكل خط أفقي في الرسم البياني المذكور وبالضبط في النقطة الحرجة، والتي تعد نقطة فريدة كما هو معلوم ذات C_p غير محدودة رسميا. في خطوط التحارر القريبة من الدرجة الحرجة (بالنسبة لدرجات الحرارة العالية كما هو واضح، مثل جميع الدرجات الحرارية التي تم اعتبارها في هذا الاختراع) لا يصل انحناء خط التحارر إلى مستوى المنحنى الأفقي، غير أنه يقترب من ذلك، وهو ما يستدعي وجود قيم جد عالية لـ C_p. وعند استمرار ارتفاع الضغط في خط التحارر، يميل هذا الأخير إلى اتخاذ الشكل العمودي، ويدخل في منطقة جديدة تبقى فيها C_p ثابتة، وذات قيمة أقل من قيمتها في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة. إن هذا يعد حقيقة بالنسبة لمعادلة الحالة لكل السوائل الحقيقية، على الرغم من أنها لا تتوفر جميعها كميا على نفس التشكيلة من خطوط التحارر بالمقارنة مع خطوط تساوي الضغط. إن استغلال هذه الظاهرة الديناميكية الحرارية يُشكل جزءا من مواصفات الاختراع.

هناك حقيقة ملموسة أخرى في تلك المنطقة، وهي أن النسبة وما يمثله خارج القسمة بين الدرجات الحرارية المعينة ذات الضغط الثابت والحجم الثابت، لا تُصور بشكل جيد التغير النسبي للضغط والحرارة طوال أحد خطوط تساوي الانتروبية. وهذا التصوير نقدمه عبر مُعامل ظاهري K، والذي يمكننا من خلاله كتابة

$$T_{alta} = T_{baja} \cdot c^{(k-1)/k}$$

حيث أن c هي نسبة الضغوطات المرتفعة على المنخفضة. وهذا ينطبق خصوصا على خط تساوي انتروبية الضغط، والذي يعتبر الأقرب إلى النقطة الحرجة، أما فيما يخص خط التمديد فإننا نفترض بأن تاثير النطاق المحيط بالنقطة الحرجة قد اختفى عمليا، ولذلك يمكن تصويره بالنسبة γ.

مع هذا التصوير ومن أجل تحديد الدورة، يتم الانطلاق من درجة حرارة دنيا لسائل التشغيل T_n و حرارة قصوى T_M، ويتم اعتبار الحرارة المعينة ذات الضغط الثابت في خط تساوي الضغط المرتفع C^*_p أكبر من نظيرتها في خط تساوي الضغط المنخفض C'_p. لتعديل الدورة ولكي تتوافق درجة حرارة مخرج المكبس T_D مع درجة حرارة مخرج آلة التمديد T_B، فإن الصيغة التي تم تقديمها سابقا تُعد غير صالحة، بل يجب إيجاد تعديل بواسطة البيانات المذكورة، وهكذا نحصل على:

$$T_D = T_n \cdot c^{(k-1)/k}$$

$$T_M = T_B \cdot c^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$T_M = T_n \cdot c^{(k-1)/k} \cdot c^{(\gamma-1)/\gamma} = T_n \cdot c^{(2-(\gamma+k)/\gamma k)}$$

حيث يتم مساواة T_B و T_D من أجل إيجاد درجة حرارة التعديل، مع إطلاق Ψ على

$$\Psi = (k-1)\gamma/((\gamma-1)k)$$

درجة حرارة التعديل $T_a = T_B = T_D$ هي

$$T_a = (T_M^{\Psi} \cdot T_n)^{1/(1+\Psi)}$$

كما أن نسبة الضغط c_{ar} التي يجب استخدامها في هذا التعديل تستوفي

$$c_{ar}^{(2-(\gamma+k)/\gamma k)} = T_M/T_n$$

$$c_{ar} = (T_M/T_n)^{1/(2-(\gamma+k)/\gamma k)}$$

من أجل صياغة خدمات الدورة يجب استخدام القيم المطلقة لتغيرات المحتوى الحراري في البوتة الساخنة والباردة

التسخين: $\Delta h_q = C^*_p \cdot (T_M - T_n \cdot c^{(k-1)/k})$

التبريد: $\Delta h_e = C'_p \cdot (T_M \cdot c^{(1-\gamma)/\gamma} - T_n)$

مردود هذه الدورة المثالية باستخدام سائل حقيقي هو

$$\eta = (\Delta h_q - \Delta h_e)/\Delta h_q$$

$$\eta = 1 - (C'_p \cdot (T_M \cdot c^{(1-\gamma)/\gamma} - T_n)/(C^*_p \cdot (T_M - T_n \cdot c^{(k-1)/k})))$$

يحتاج الاختراع إلى أن يوفر السائل الذي تم اختياره قوة نافعة أكبر من نظيرتها في دورة غاز مثالي تكون فيه T_n و T_M متساويتين، حيث تكون القوة النافعة هي ناتج المردود في القوة المضافة أثناء التسخين. أي الفارق

$$C^*_p \cdot (T_M - T_n \cdot c^{(k-1)/k}) - C'_p \cdot (T_M \cdot c^{(1-\gamma)/\gamma} - T_n)$$

يجب أن تكون أكبر من

$$C^*_p \cdot ((T_M - T_n \cdot c^{(\gamma-1)/\gamma}) - (T_M \cdot c^{(1-\gamma)/\gamma} - T_n))$$

ويعني ذلك أن الغاز الذي تم اختياره للاستخدام في الاختراع يجب أن يتوفر على الخصائص الدينامية الحرارية المناسبة في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة، حيث تكون هذه الخصائص كالآتي:

- أنه على طول أي خط لتساوي الانثالبي في هذه المنطقة الدينامية الحرارية، فإن C_p ترتفع كلما ارتفع الضغط.
- أن المعاملات الظاهرية K لخطوط تساوي الانثالبي القريبة من النقطة الحرجة، لن تكون أعلى بشكل كبير من قيمة النسبة والغاز المثالي، والذي سيتم حسابه لاحقا.

توجد هناك مجموعة من المواد التي تتوفر على نقطة حرجة مهمة بالنسبة لتطبيقات هذا الاختراع. وعلى سبيل المثال لا الحصر، يتم ذكر عدد من هذه المواد في الجدول 1، مُعرفة بصيغتها الكيماوية أو اسمها الشائع أو اسمها الصناعي (خصوصا المُبرِّدات المسماة "R")، حيث يتم تقديم الضغط الحرج بالبار، و T_{cr} بالدرجات الحرارية المئوية؛ كما تمت إضافة النيتروجين كمثال معاكس للغاز الذي يتوفر على قيمة T_{cr} جد بعيدة من الحرارة البيئية:

	CO2	الإيثان	R134a	R32	R410a	R125	R116	N2
P_{cr} (bar)	74	49	41	58	49	36	31	34
Tcr (^oC)	31	32	101	78	72	66	20	- 147

الجدول 1: درجات الضغط والحرارة الحرجة لسوائل مختلفة

تجدر الإشارة إلى أن الدورة المُعدّلة لا تتوفر على درجات حرية في تحديدها، باستثناء اختيار الضغط المنخفض (أو المرتفع)، حيث أن T_n و T_M هي شروط الوسط المحددة لهذا التطبيق. وعلى العكس من ذلك، فإن الدورات التجديدية – التي تعد خلالها الدورة المُعدّلة حالة محدودة – تسمح بدرجة حرية تعتبر أساسية للحصول على أفضل النتائج في كل حالة يتم تحديدها.

لقد أشرنا إلى أن الدورات المثالية التي لا تتوفر على إمكانية استعادة الحرارة تمتد بين نسب الضغط التي تتراوح بين الحالة المُعدّلة c_a، ودرجة الضغط القصوى c_M، والتي تكون في حالة الغاز المثالي كالآتي:

$$c_a = (T_M/T_n)^{\gamma/2(\gamma-1)}$$

$$c_M = (T_M/T_n)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

في الحالة التجديدية، يمتد تصنيف نسب الضغط من 1 إلى c_a، ويكون 1 حالة محدودة لا تعتبر فعليا دورة، حيث أن خط تساوي الضغط المرتفع والمنخفض يتطابقان. لدراسة مردود الدورة وتحسينها، نقوم بتحديد العلاقات التالية باستخدام المُعلمات f و z و s:

$$z = (T_M/T_n)^{1/2}$$

$$f = c/c_a$$

$$s = f^{\gamma/(\gamma-1)}$$

باعتبار أن النقط هي الآن كالآتي:

101 = بدء التمدد

102 = انتهاء التمدد، وبدء التبادل التجديدي في خط تساوي الضغط المنخفض

103 = انتهاء التبادل التجديدي في خط تساوي الضغط المنخفض وبدء التبريد في البؤرة الباردة

104 = انتهاء التبريد وبدء الضغط

105 = انتهاء الضغط وبدء التبادل التجديدي في خط تساوي الضغط المرتفع

106 = انتهاء التبادل التجديدي في خط تساوي الضغط المرتفع وبدء التسخين في البؤرة الساخنة

العلاقات بين درجات الحرارة في دورة مثالية ذات سائل مثالي تكون كالآتي:

$$T103 = T105 = T104 \cdot c^{(\gamma-1)/\gamma} = T_n \cdot c^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$T106 = T102 = T101 \cdot c^{(1-\gamma)/\gamma} = T_M \cdot c^{(1-\gamma)/\gamma}$$

وتكون التغيرات المطلقة للمحتوى الحراري كالآتي:

التسخين: $\Delta h_q = C_p \cdot (T_M - T106) = C_p \cdot (T_M - T_M \cdot c^{(1-\gamma)/\gamma})$

التبريد: $\Delta h_e = C_p \cdot (T103 - T104) = C_p \cdot (T_n \cdot c^{(\gamma-1)/\gamma} - T_n)$

وبالتالي يحصل المردود على الصيغة الآتية:

$$\eta = 1 - T_n \cdot (z \cdot s - 1)/(T_M \cdot (1 - z \cdot s))$$

باشتقاق طرح هذه الصيغة، من أجل إيجاد حده الأدنى، يتم الحصول على المعادلة التي ترفع المردود إلى الحد الأقصى، وهي:

$$Z^2 \cdot s^2 - 2 \cdot z \cdot s + 1 = 0$$

والتي يتمثل حلها الوحيد في:

$$S = 1/z = (T_n/T_M)^{1/2}$$

وهو ما يؤدي إلى أن تكون قيمة f حتى تصل إلى أقصى η هي:

$$f_{max} = (T_n/T_M)^{\gamma/2(\gamma-1)} = 1/c_a$$

$$c_{max} = f_{max} \cdot c_a = 1$$

بالتالي فإن نسبة الضغط التي من خلالها يتم الحصول على أقصى مردود هي c = 1، وهو ما يعني أن خط تساوي الضغط المرتفع وخط تساوي الضغط المنخفض يتطابقان، وبذلك يمكن القول عمليا بأنه ليست هناك دورة. إن المردود الأقصى في تلك الحالة المحدودة التي نسميها η_1، يبقى غير محدد باعتبار أنه يُطرح على شكل 0/0؛ وهو ما يتم حله حسب قاعدة أوبيتال، حيث نحصل على:

$$\eta_1 = 1 - (1/z^2) = (T_n/T^M)$$

والذي يعتبر مردود كارنو، غير أنه لسوء الحظ يُستخدم في حالة تكون قوتها الإجمالية صفرية، وبذلك تكون القوة الصافية أو النافعي صفرية أيضا. مع ذلك، فإن مدى الدورة التي يمكن رفعه إلى الحد الأقصى (دون التناقض المتأصل بأنه ليس هناك دورة) هي القوة النافعة، حيث تكون

$$x = c^{(\gamma-1)/\gamma}$$

تبقى القوة النافعة N ذات تدفق كتلي m' لسائل التشغيل

$$N = m' \cdot C_p \cdot (T_M(1 - (1/x)) - T_n \cdot (x-1))$$

وبمساواة اشتقاقها 0 تبقى كالآتي:

$$x^2 = T_M/T_n$$

ويعني ذلك أن أقصى قيمة لـ N هي الحالة المُعدّلة، وبذلك تبقى الصيغة كالآتي:

$$T_M/T_n = c^{2(\gamma-1)/\gamma}$$

إن الحالة المُعدّلة هي التي تنتج أكبر قوة نافعة في الدورة، بالرغم من أنها تتوفر على أقل مردود، وذلك لكونها تتلقى أكبر نسبة من الحرارة من البؤرة الساخنة، بالنسبة لبعض الشروط البيئية المعينة، والتي يتم التعبير عنها من خلال T_n و T_M.

هذه الصياغة للحالة المُعدّلة المثالية يمكن أن تمتد إلى حالة السائل الحقيقي، والذي لا يحدث الضغط خلالها عبر خط تساوي الانتروبية للمعامل γ بل للمعامل k، حيث تكون في هذه الحالة c_{ar} هي نسبة ضغط التعديل الحقيقي

$$C_{ar} = (T_M/T_n)^{1/(2-(\gamma+k)/\gamma k)}$$

حيث تكون الحالات التجديدية محددة بين $c = 1$ و c_{ar}.

يحدد الاختراع من خلال صياغة أولية أساسية استخدام دورة برايتون مُعدّلة توجد في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة، حيث تستوفي

$$T_{cr} < Tn$$

بالإضافة إلى

$T_n - T_{cr} < 50$ K، بالنسبة لتبريد البؤرة الباردة بالماء

$T_n - T_{cr} < 100$ K، بالنسبة لتبريد البؤرة الباردة بالهواء

كما يتم أيضا استيفاء المعايير التالية بالنسبة لخط تساوي الضغط المنخفض P_b وخط تساوي الضغط المرتفع P_a، لوضع الدورة في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة.

$$0{,}1.P_{cr} < P_b < P_{cr}$$

$$0{,}5.P_{cr} < P_a < 5.P_{cr}$$

علاوة على ذلك، يجب أن يستوفي سائل التشغيل الذي تم اختياره الشرط التالي: داخل الحيز الديناميكي الحراري الموجود بين درجات الحرارة T_n و T_M، ودرجات الضغط المنخفضة P_b والمرتفعة P_a التي اختيارها، فإن القيمة المتوسطة بين T_n و T_M للحرارة المعينة ذات الضغط الثابت C_p بالنسبة لخط تساوي الضغط ترتفع كلما ارتفع الضغط.

على أية حال، يُعمّق الاختراع درجة الحرية التي توجد في الدورات التجديدية، والتي يمكن تفسيرها نوعيا كالآتي: من أجل المرور في الدورة من التحارر T_n إلى التحارر T_M يمكن المرور عبر النسبة القصوى الممكنة للضغط، والتي ترتبط بالحالة المُعدّلة التي لا تحتاج إلى تبادل تجديدي للحرارة؛ أو اختيار طريق ذي نسبة ضغط أقل، وكلما كانت هذه النسبة أقل كلما كان على تغير المحتوى الحراري المترتب عن التبادل التجديدي للحرارة أن يكون أكبر.

يجب اعتبار هذه الدرجة من الحرية ليس فقط من ناحية توازن المحتوي الحراري للدورة في حد ذاته، وإنما من ناحية الكلفة الاقتصادية لتجسيد هذه الدورة. من الواضح أن مكونات الدورة لا تُكلف جميعها نفس الكلفة من وحدات الطاقة المنقولة أو المعالجة من أجل تحويلها جزئيا إلى طاقة ميكانيكية. وبصورة عامة من ناحية وحدات القوة، فإن الآلات تعتبر أغلى بشكل ملموس من المُبادلات. وهذا يعني أنه عند إدراج التقييم الاقتصادي فإن الدورات التجديدية تتميز بحاجتها إلى عمل أقل في الآلات، علاوة على قوة حرارية أكبر يتم تحويلها في المُبادل. وفي الوقت نفسه، غالبا ما يكون مُبرّد البؤرة الباردة أيضا رخيصا نسبيا. على العكس من

ذلك، ليس من السهل إيجاد صيغة وحيدة للبؤرة الساخنة. يمكن أن يكون غازا، وفي بعض الحالات يمكن أن يتكون من مرجل رخيص عموما، غير أن وقوده يكون غاليا أو غاليا جدا. وهناك حالة تكتسي أهمية خاصة تتمثل في الطاقة الشمسية الحرارية، حيث أن البؤرة الساخنة تكون عبارة عن مجال من مُركّزات ضوء الشمس المتمركزة فوق بعض المُستقبلات التي يتم تبريدها بسائل يمكن أن يكون نفس سائل الدورة أو سائل مختلف، والذي يتم من خلاله تسخين سائل التشغيل. في بعض الحالات يكون الوقود بلا ثمن، حيث يكون هو الأرض؛ غير أن الاستثمار الخاص في اللاقطات يكلف الكثير. لذلك توجد هناك حالات متنوعة ينبغي أخذها بعين الاعتبار، ويمكن ذلك من خلال تقييم تغيرات المحتوى الحراري التي تحدث في كل مُكون، وتقدير الكلفة الإجمالية المتناسبة معه، وإضافة كلفة الاستثمار والتشغيل، وبما أن تحديد هذه التكاليف يعد أمرا خارج إطار الاختراع، فإن ذلك سيتوقف على دراسة حالة تقنية-اقتصادية لا يمكن اختصارها في بيانات موضوعية. وفي كل الأحوال، من المهم جدا التأكيد على أن التأثير الإيجابي يُعبر عنه بالفرق بين متغيرين للمحتوى الحراري، اي المُتغير في البؤرة الساخنة ناقص المتغير في البؤرة الباردة، بينما تكون الكلفة هي جمع المكونات التي تعمل في كل طور.

في أول الأمر يتم تقديم حالة الغاز المثالي كسائل تشغيل في الدورات التجديدية، ثم يتم المرور بعد ذلك إلى السوائل الحقيقية في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة الخاصة. وغني عن القول أنه في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة لأحد السوائل، مثل CO_2 على سبيل المثال، والذي يتمدد انطلاقا من 10 بار إلى 150 بار، ومن 31 درجة مئوية إلى 400 درجة مئوية تقريبا، يمكن لسائل آخر مثل N_2 أن يكون له تصرف مثالي، وهو ما يسمح بمقارنة الحالة الحقيقية مع المثالية في نفس المجال الدينامي الحراري. هناك مسألة مهمة تتعلق بالنفع في حالة الغاز المثالي، ذلك أنه في أية دورة تجديدية، يكون تغير المحتوى الحراري – بالقيمة المطلقة – في الضغط مساويا لتغير المحتوى الحراري للتبريد في البؤرة الباردة؛ كما يكون التغير في التمدد مساويا للتغير في التسخين في البؤرة الساخنة؛ ويرجع ذلك إلى أن خطوط التحارر في الغاز المثالي تكون متعامدة تماما مع خطوط تساوي الضغط في الرسم البياني ضغط-محتوى حراري، ولذلك يكون مناسبا أكثر لدراسة هذه الدورات. لذلك يتم تمييز ثلاث تغيرات للمحتوى الحراري فيها، والتي تتم صياغتها حسب خصائص الغاز والشروط البينية ونسبة الضغط، والتي تُستخدم عبر المُعلَم x عوض استخدامها بشكل صريح، وهو الآتي:

$$x = c^{(\gamma-1)/\gamma}$$

تغيرات المحتوى الحراري الثلاث هي:

التسخين/التمدد $Q = C_p \cdot (T_M - T_M/x)$

التبريد/الضغط $E = C_p \cdot (T_n \cdot x - T_n)$

التبادل التجديدي $G = C_p \cdot (T_M/x - T_n \cdot x)$

تتم إضافة وزن التكلفة 1 إلى هذه الأخيرة، أما بالنسبة للأوليين:

التسخين/التمدد: الوزن $(1 + a)$

التبريد/الضغط: الوزن $(1 + b)$

حيث تكون a و b مبدئيا أكبر من 1، إلا في حالة ظهور ابتكار تكنولوجي أو تصنيع غير متوقع.

يتم تحديد الدالة النفعية المثالية L كالآتي:

$$L = (Q - E) / ((1+a) \cdot Q + (1+b) \cdot E + G)$$

حيث: ثابتة $= Q + E + G = C_p \cdot (T_M - T_n)$

يجب أن يتم إلغاء بسط كسر اشتقاق L بالنسبة إلى x في أقصى الدالة النفعية المذكورة، ويؤدي ذلك إلى

$$0 = (Q' - E') \cdot ((1+a) \cdot Q + (1+b) \cdot E + G) - ((Q - E) \cdot (a \cdot Q' + b \cdot E'))$$

بإدراج النسبة بين درجات الحرارة القصوى، $r = T_M/T_n$، يتم الوصول إلى معادلة x التي تُعطي القيمة القصوى لـ L

$$x^2(1+a+b-(1/r))-2(a+b)x+1+a+b-r=0$$

$$x_{max}=((2(a+b)+(4(a+b)^2-4(1+a+b-(1/r))\cdot(1+a+b-r))^{1/2}/2(1+a+b-(1/r))$$

وهو ما يتوافق مع نسبة الضغط المثالية، c_{max}

$$C_{max}=x_{max}^{y/(y-1)}$$

نسبة الضغط هذه التي تنتج الحد الأقصى في الدالة النفعية تتوقف بشكل ملموس على الأوزان الاقتصادية المرتبطة بكل مكون. على سبيل المثال، إذا كانت r=2 و a=b=1 فإننا نحصل على قيمة x_{max} = 1,29؛ والتي تنزل إلى 1,224 إذا تغير التقييم إلى a=b=2,5. وهذا يعني أنه عندما تكون آلة الضغط أو التمدد أو البوزة الساخنة أو جميعها (حيث أن المُحدد هو مجموع a+b) جد مكلفة فيما يتعلق بالمُبادل التجديدي، فإنه من الأمثل ضغط القليل (أقل من قيمة x، وبالتالي من c) والحصول على مُبادلات تجديد جد كبيرة. وفي الواقع، من السهل إظهار أنه عندما يمتد جمع a+b إلى ما لانهاية، فإن x_{max} تمتد حتى 1، ونفس الشيء بالنسبة إلى c_{max}.

إن قيمة x_{max} مثل التي تم تعيينها في المثال الأول، بالنسبة لحالة N_2، والتي تتوفر على γ= 1,41، تؤدي إلى نسبة ضغط تبلغ 2,4. وبالنسبة إلى CO_2 الذي يعتبر غازا مثاليا (وليس حقيقيا) فإن γ= 1,28، أما c فتكون نتيجتها 3,2. غير أنه إذا تم أخذ المثال الثاني بعين الاعتبار، بالنسبة للآلة والبوزة الساخنة الأكثر تكلفة فيما يتعلق بالمُبادل التجديدي، حيث تكون x_{max}= 1,22، فإن نسب الضغط التي يتم الحصول عليها هي 2 و 2,5 على التوالي بالنسبة إلى N_2 و CO_2. ويكون ذلك مرتبطا بمردود (في الدورة المثالية) يبلغ 44%، والذي يعد نسبة مرتفعة حقا بالنسبة لدورة ذات بوزة باردة تبلغ 313 K، وبوزة ساخنة تبلغ 373 K.

خلال العرض الذي تم تقديمه بخصوص حالة الغاز المثالي، يكمن الاختراع في استخدام دالة محدودة كدالة نفعية، وبذلك يتم تبرير دورة برايتون – باستخدام التحسين- ذات نسبة ضغط منخفضة أو جد منخفضة، وذات تبادل تجديدي حراري جد كبير. على هذا النحو، يمكن استغلال الطاقة المُكلفة - كالطاقة الشمسية – من خلال الاستثمار في المُركّزات والمُستقبلات الضرورية، والتي بفضل هذا النوع من دورة برايتون ذات نسبة التجديد الكبيرة، يمكن استغلالها مع مردود جيد.

يحدد الاختراع في نسخته الكاملة النطاق المحيط بالنقطة الحرجة لسوائل التشغيل المُختارة، باعتباره الأمثل لاستغلال هذا النوع من الدورات باستخدام الغازات الحقيقية، حيث يتم استغلال الخصائص التي تم عرضها سابقا قرب C_p والمعامل الظاهري k فيما يتعلق بتطور درجة الحرارة والضغط على طول خط تساوي الانتروبية؛ من أجل ذلك تتم صياغة التحليل الآتي، والذي سيتم من خلاله استنباط صيغة الاختراع في نسخة أكثر كمالا.

لتحقيق ذلك الغرض يجب الشروع أولا بتذكر القوانين التي تحكم المُبادلات الحرارية، بشكل واقعي غير مثالي كما حدث في الحالات السابقة، حيث يتم قبول أن درجة حرارة السائل البارد عند المخرج ستكون متطابقة مع درجة حرارة السائل الساخن عند مدخله، كما أن درجة حرارة السائل الساخن ستكون متطابقة مع درجة حرارة السائل البارد عند المدخل. وهذا يعتبر من الناحية الفيزيائية غير ممكن، وحتى لو تعلق الأمر بالحالة المثالية فإن ذلك يستدعي حجما لانهائيا. سيكون الأنسب هو افتراض فرق في درجة الحرارة بين السائل الساخن والبارد، في كل قسم من حركته وفي اتجاه معاكس لكل واحد منهما. مع ذلك، فإن هذا الفرق المستمر على طول المسار يعتبر جد صغير مقارنة مع الفرق $T_M - T_n$، نظرا لأن الأمر يتعلق بمُبادل يعمل في ظروف متوازنة، وسيتم توضيح ذلك في التفسير النظري.

في الحالة الحقيقية لا يكون المُبادل متوازنا، حيث أن ذلك يحدث إذا كانت $m' \cdot C_p$ متساوية بالنسبة لكلا السائلين البارد والساخن. أما الآن فإن m′ لا تزال متساوية (وهو ما يتوافق مع قوة المنشأة) غير أن C_p هي أكبر عند خط تساوي الضغط المرتفع، والتي سوف نسميها C^*_p، من نسبتها عند خط تساوي الضغط المنخفض، والتي سوف نسميها C'_p. ويرجع ذلك إلى العمل في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة التي تعتبر تعريفا لهذا الاختراع، بالنسبة لهذا النوع من الدورة.

الحرارة G المُتبادلة هي

$$G = C^*_p \cdot (T106-T105) = C'_p \cdot (T102-T103)$$

ولكن مع فارق مهم، حيث أن T106 هي أقل من T102، كما أن T103 هي أكبر من T105، ولذلك يمكن كتابة

$$T102 - T106 = \Delta Ts$$

$$T103 - T105 = \Delta Ti$$

وفي نفس الوقت، سيتم استيفاء علاقة الفعالية للمُبدّل ε

$$\varepsilon = C'_p \cdot (T102 - T103) / C'_p \cdot (T102 - T105)$$

حيث تم استخدام C'_p (التي تختفي في خارج القسمة)، لأن الذي يحكم خدمات المبادل ويحددها هو السائل الذي تتغير درجة حرارته بأكبر قدر، وهو الذي يتوفر على أقل حرارة معينة.

بالرغم من أنه لا يُنصح بها عموما لأسباب اقتصادية وقيم عالية للفعالية، فمع ذلك في هذه الحالة حيث تكون القفزات في T المُعينة لكل سائل انطلاقا من دخوله إلى خروجه أكبر بكثير من فارق درجة الحرارة اللوغاريتمية المتوسطة بينها، فإنه يمكن الذهاب إلى ε قريبا من 1، وهو ما يعني أيضا أنه مع خروج السائل الساخن (الذي يتوفر على حرارة معينة أقل) فإن درجة حرارته تتساوى تقريبا عند دخول السائل البارد، ولذلك تكون ΔTi عمليا صفرية (الأمر ليس كذلك بالنسبة إلى ΔTs). نتيجة لمجموعة علاقات T في أطوار الدولة المختلفة، يتم الحصول على

$$T102 = T101 \cdot c^{(1-1)/\gamma} = T101/x$$

$$T105 = T104 \cdot c^{(k-1)/k} = T104 \cdot x'$$

$$T106 = T102 - \Delta Ts = T_M/x - \Delta Ts$$

$$T103 = T105 + \Delta Ti = T_n \cdot x' + \Delta Ti$$

حيث تم استخدام مُعلمات الضغط

$$x = c(y-1)/y$$

$$x' = c(k-1)/k$$

وتكون تغيرات المحتوى الحراري بالقيمة المطلقة في البؤرة الساخنة والباردة كالآتي

$$Q = C^*_p \cdot (T_M - T_M/x + \Delta Ts)$$

$$E = C'_p \cdot (T103 - T104) = C'_p \cdot (T_n \cdot x' + \Delta Ti - T_n)$$

لتحديد ΔTs وإدراجها في المعادلة Q، يمكن صياغة الفارق T102 – T105 عن طريق خطي تساوي الضغط المرتفع والمنخفض، حيث

$$\Delta Ts = (T102 - T103) \cdot (1 - C'_p/C^*_p) + \Delta Ti = \varepsilon \cdot (T_M/x - T_n \cdot x') \cdot (1 - C'_p/C^*_p) + \Delta Ti$$

وهو ما يسمح بكتابة

$$Q = C^*_p \cdot (T_M - T_M/x + \varepsilon \cdot (T_M/x - T_n \cdot x') \cdot (1 - C'_p/C^*_p) + \Delta Ti)$$

إن استخدام الاختراع في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة يكون مبررا فقط إذا كان بسط كسر الدالة النفعية يرتفع، ويعني ذلك إذا ارتفع الفارق Q - E. ويمكن اختبار ذلك بحساب رقمي مُفصل باستخدام خصائص السائل الذي تم اختياره، غير أنه من أجل إقرار مواصفات الاختراع فإنه من الضروري إنهاء التحليل الحالي لوضع المعايير ذات الصلة باختيار السائل وقيم الضغط ودرجة الحرارة. الفرضيات المبسطة المقبولة المستخدمة هي ε=1 و $\Delta Ti = 0$.

باستخدام R من أجل تحديد نسبة C'_p/C^*_p، فإن تغير ΔQ للحالة الحقيقية مقارنة مع الحالة المثالية (R=1 و k=y) يبقى كالاتي:

$$\Delta Q = C^*_p \cdot (1 - R) \cdot (T_M/x - T_n \cdot x')$$

والذي سيكون إيجابيا إذا كانت R أقل من الوحدة بشكل كافٍ، وكانت x' لا تتزايد بشكل مفرط، وهو ما يعني أن نسبة الضغط المُستخدمة يجب أن تكون في مستوى معتدل. إن ارتفاع نسبة ΔE للبؤرة الباردة والتي يجب أن تكون أقل من السابقة بالقيمة المطلقة هي:

$$\Delta E = C'_p \cdot (T_n \cdot x' - T_n) - C^*_p \cdot (T_n \cdot x - T_n) = C^*_p \cdot (R \cdot (T_n \cdot x' - T_n) - (T_n \cdot x - T_r))$$

وباستخدام نسبة $r=T_M/T_n$ يتم الوصول إلى

$$\Delta Q - \Delta E = C^*_p \cdot T_n \cdot ((1 - R) \cdot (r/x) + x + R - x' - 1)$$

ومن أجل أن يكون هذا الفرق إيجابيا فإنه يجب استيفاء الآتي:

$$x' - x < (1 - R) \cdot ((r/x) - 1)$$

والذي يمكن منه استنتاج شرط أساسي، وهو أن تكون r أكبر من x، وهذا لا يمكن استيفاؤه دائما، حيث أن الضغط سينتج بخلاف ذلك درجة حرارة أعلى من T_M، ولن تكون هناك طريقة لإغلاق دورة برايتون. مع ذلك، كلما كانت نسبة الضغط منخفضة بالنسبة للزوج T_M و T_n كلما كان خارج القسمة أكبر، ويسهل بشكل أكبر استيفاء المعيار، والذي يعتبر أساسا معيارا لنسبة الضغط القصوى التي يمكن استخدامها، وذلك حسب تغير الخصائص الديناميكية الحرارية للغاز المثالي انطلاقا من المنطقة التقليدية وإلى النطاق المحيط بالنقطة الحرجة، والذي يوفر قيم R و k، حيث

$$x = c^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$x' = c^{(k-1)/k}$$

تجدر الإشارة إلى أنه بالنسبة لدرجات حرارة تتجاوز الدرجة الحرجة بشكل كبير، فإن التصرف يصبح مجددا مثل تصرف الغاز المثالي، بحيث أن النطاق المحيط بالنقطة الحرجة لا يتحدد فقط بواسطة P ولكن أيضا بواسطة T، وبالنسبة لقيم T تتجاوز ضعف قيمة T_{Cr} (باستخدام الوحدة K) فإنه يمكن اعتبار تلك المنطقة منتهية، وتكون قيمة C_p ثابتة. مع ذلك، في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة حيث يحدث جزءٌ أو حتى كلّ التبادل التجديدي للحرارة، فإن خطوط تساوي الضغط ستكون لها قيمة C_p متوسطة وأعلى من القيمة المتوسطة في خطوط تساوي الضغط خارج تلك المنطقة. ويتم الحصول على القيمة المتوسطة لـ C_p من خلال تقسيم ارتفاع المحتوى الحراري في طول خط تساوي الضغط بين درجتي حرارة تحدان المنطقة، على ذلك الارتفاع في درجة الحرارة.

يتم تحديد النطاق المحيط بالنقطة الحرجة في الاختراع بمجال لدرجات حرارية تمتد انطلاقا من درجة الحرارة الحرجة T_{Cr} بالإضافة إلى زيادة الحد ΔT المُختار بين 1 K و 40 K، ودرجة حرارة نهاية النطاق T_{fin} التي يتم اختيار قيمتها بين 1,5 و 3 مرات قيمة T_{Cr}، التي يتم قياسها دائما بمقياسٍ مطلق لدرجات الحرارة؛ حيث يبقى النطاق المحيط بالنقطة الحرجة محصورا من ناحية الضغط بين خطوط تساوي الضغط لخُمس درجة الضغط الحرجة، وخمسة أضعاف درجة الضغط الحرجة المذكورة؛ كما أنه يوجد في في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة خط لتساوي الضغط يسمى بالأقصى ويُمثّل من خلال ضغطه P_{sup}، وفي هذا الخط يحصل اشتقاق القيمة المتوسطة لـ C_p، فيما يتعلق بنسبة الضغط التي تم قياسها مقارنة بدرجة الضغط الحرجة، على القيمة الأعلى في كل خطوط تساوي الضغط في تلك المنطقة؛ ويكون خط تساوي الضغط المذكور هو خط تساوي الضغط الذي يتم اختياره كخط لتساوي الضغط المرتفع في الدورة، والذي يتم قياسه كزيادة في المحتوى الحراري المعين في البؤرة الساخنة، ناقص المحتوى الحراري الممنوح في البؤرة الباردة؛ ويكون مقام الكسر هو مجموع القيم المطلقة لتغيرات المحتوى الحراري المعين لكل طور، والتي تتم موازنتها ببعض المعاملات التي تم اختيارها عند استخدام الاختراع قيد الذكر، والتي تقوم بتقييم تكلفة الوحدة لكل نوع من المكونات المستخدمة في كل طور؛ وإذا سلّمنا في هذا التوصيف بأنه لا توجد هناك عوائق ميكانيكية ضد اتخاذ خط تساوي الضغط الأقصى كخط لتساوي الضغط المرتفع، وفي حالة عدم القدرة على اعتبار قيمة P_{sup} المذكورة مفرطة، فيتم إقرار خط تساوي الضغط المرتفع في أقصى قيمة مسموح بها في التطبيق المعني، ويتم رفع قيمة الدالة النفعية إلى الحد الأقصى حسب ما تم تحديده.

وصف موجز للأشكال

يعرض الشكل 1 رسما بيانيا ديناميا حراريا (P،h) يظهر فيه النطاق المحيط بالنقطة الحرجة الخاص بثاني أكسيد الكربون CO_2، حيث تم تمثيل المحتوى الحراري المعين بالجول/كلغ في الخط الأفقي وتم تمثيل الضغط بالبار في الخط العمودي. كما تم تمثيل خط التحارر الحرج ومجموعة من خطوط التحارر القريبة، علاوة على الغرفة ثنائية الطور سائل-بخار وعددا من خطوط تساوي الانتروبية بخطوط تخطيطية متقطعة وقصيرة، بالإضافة إلى عدد من خطوط ثبات الحجم بخطوط تخطيطية متقطعة طويلة.

ويعرض الشكل 2 مُخططا لرسم بياني عام (P،h) تم فيه إدراج خمسة دورات مختلفة، أربعة منها تقليدية، والخامسة هي التي يُستخدم فيها الاختراع.

يمثل الشكل 3 دورة تجديدية مثالية مع نقطها الدينامية الحرارية الأساسية على شكل رسم بياني (P،h)، حيث تمت الإشارة خلاله بخط تخطيطي متقطع إلى خطين للتحارر.

يمثل الشكل 4 مُخططا للمكونات الضرورية لتجسيد دورة تجديدية، مع نقطها الدينامية الحرارية الأساسية.

يمثل الشكل 5 مُخططا آخر لمكونات الدورة، حيث تم إدراج مكونات لغرض التحكم بها، خصوصا من الناحية البارومترية.

يمثل الشكل 6 مخططا لدورة تجديدية تمت تغذيتها بحرارة زائدة عن دورة برايتون ذات غرفة للاحتراق، ومن ثم، مع الكثير من الطاقة الحرارية في غازات العادم.

لتسهيل فهم الأشكال والتجسيدات المفضلة للاختراع، يتم أدناه ربط العناصر ذات الصلة به، والتي تظهر في الأشكال المذكورة:

1. آلة تمديد، أو توربينة.
2. مجمع السحب لآلة التمديد.
3. مجمع العادم في المكبس.
4. مجمع العادم في المكبس الذي يربط مسار الضغط المنخفض للمُبادل الحراري التجديدي.
5. مسار الضغط المنخفض للمُبادل الحراري التجديدي.
6. أنابيب الضغط المرتفع للمُبادل الحراري التجديدي.
7. مُبادل حراري تجديدي.
8. أنابيب الضغط المرتفع لمُبادل التزويد الأساسي بالحرارة، أو بؤرة التسخين (9).
9. بؤرة التسخين.
10. مدخل الطاقة الحرارية الخارجية إلى بؤرة التسخين.
11. مخرج الطاقة الحرارية الخارجية من بؤرة التسخين.
12. أنابيب الضغط المنخفض لمُبادل التبريد للبؤرة الباردة.
13. مُبرّد البؤرة الباردة.
14. مدخل السائل البارد الخارجي لمُبرّد البؤرة الباردة.
15. مخرج السائل البارد الخارجي لمُبرّد البؤرة الباردة.
16. مجمع السحب لآلة الضغط، أو المكبس.
17. الة الضغط، أو المكبس.
18. مُجمّع الدفع لآلة الضغط.
19. أنبوب أو مسار الدفع لآلة الضغط.
20. مخرج سائل الضغط المنخفض من المُبادل الحراري التجديدي.
21. مدخل سائل الضغط المرتفع في المُبادل الحراري التجديدي.
22. مخرج سائل الضغط المرتفع من المُبادل الحراري التجديدي.

23. مدخل سائل الضغط المنخفض إلى المُبادل الحراري التجديدي.

24. مخرج سائل الضغط المرتفع من مُبادل التزويد الأساسي بالحرارة، أو بؤرة التسخين.

25. محور الدوران لآلة التمديد، وآلة الضغط، وللمُولد الكهربائي أيضا (غير مُمثل لأنه يعتبر خارج إطار الاختراع).

26. مرتكز المحمل ومتراس الإغلاق للمحور في جهة الضغط المنخفض لآلة التمديد.

27. مرتكز المحمل ومتراس الإغلاق للمحور في جهة الضغط المنخفض لآلة الضغط.

28. مرتكز المحمل ومتراس الإغلاق للمحور في جهة الضغط المرتفع للآلة المُوسعة.

29. مرتكز المحمل ومتراس الإغلاق للمحور في جهة الضغط المرتفع لآلة الضغط.

30. هيكل إعادة تجميع السائل حول متراس الضغط المرتفع (28) في المكبس.

31. أنبوب تفريغ السائل من الهيكل (30) إلى مستودع التخزين للضغط المنخفض.

32. صمام تعديل الضغط في أنبوب التفريغ (31).

33. مرتكز المحمل ومتراس الإغلاق لمحور الهيكل (30).

34. هيكل إعادة تجميع السائل حول متراس الضغط المرتفع (28) في آلة الضغط.

35. أنبوب تفريغ السائل من الهيكل (34) إلى مستودع التخزين للضغط المنخفض.

36. صمام في أنبوب تفريغ السائل (35) من الهيكل (34) إلى مستودع التخزين للضغط المنخفض.

37. مرتكز المحمل ومتراس الإغلاق لمحور الهيكل (34).

38. أنبوب استخلاص السائل من أنبوب الدفع في المكبس.

39. صمام تخفيف الضغط المرتفع في أنبوب الاستخلاص (38).

40. أنبوب ربط أو تحويل مستودعات الضغط المنخفض (52) مع مسار العادم لآلة التمديد.

41. صمام تخفيف الضغط المنخفض في أنبوب التحويل (40).

42. مستودعات تخزين سائل الضغط المرتفع.

43. صمام أنبوب الحقن (48) انطلاقا من المستودعات (42) إلى أنبوب الدفع للمكبس (19).

44. صمامات المستودعات (42) في الوصلات مع المسار (19).

45. صمامات المستودعات (42) في أنبوب تفريغ مستودعات الضغط المرتفع نحو مستودعات الضغط المنخفض.

46. أنبوب تفريغ مستودعات الضغط المرتفع (42) نحو مستودعات الضغط المنخفض (52).

47. صمام قطع وتخفيض الضغط (تصفيح) في أنبوب تفريغ مستودعات الضغط المرتفع (42) نحو مستودعات الضغط المنخفض (52).

48. أنبوب الحقن من مستودعات الضغط المرتفع (42) في أنبوب الدفع بالمكبس (19).

49. ضاغط إضافي في الأنبوب (48).

50. صمام الإغلاق الجزئي للمرور، موضوعة في مسار الدفع للمكبس.

51. أنبوب شحن مستودعات الضغط المنخفض (52) من أنبوب العادم بالمكبس (1) ومن مستودعات الضغط المرتفع (42).

52. مستودعات تخزين الضغط المنخفض.

53. صمامات شحن أو ملء مستودعات الضغط المنخفض.

54. أنبوب الحقن من المستودعات (52) في أنبوب العادم بالمكبس.

55. ضاغط إضافي في الأنبوب (54).

56. صمامات التخفيف لمستودعات الضغط المنخفض (52).

57. أنبوب التخفيف من الضغط المُفرط لمستودعات الضغط المنخفض (52).

58. صمام الأمان للأنبوب (57).

59. أنبوب شحن مستودعات الضغط المنخفض (52) انطلاقا من هياكل إعادة تجميع التسربات (30) و (34).

60. صمام الأنبوب (59).

61. مكبس دورة برايتون ذات درجة حرارية عالية، والتي تنضم إليها دورة الاختراع لاستغلال حرارة غازات العادم من توربينته الغازية.

62. منفذ هواء الغلاف الجوي.

63. مسار الهواء المضغوط.

64. غرفة الاحتراق لدورة برايتون ذات درجة الحرارة العالية.

65. محور المكبس (61) والتوربينة (67) لدورة برايتون ذات درجة الحرارة العالية.

66. مسار حقن غازات الاحتراق في التوربينة (67).

67. توربينة الغاز لدورة برايتون ذات درجة الحرارة العالية.

68. حقن الوقود في غرفة الاحتراق (64).

69. مسار العادم لتوربينة الغاز (67).

70. مسار نقل غازات العادم المُبرَّدة نحو المسخن الأولي للهواء المضغوط (71) ونحو الجو.

71. مسخن أولي للهواء المضغوط قبل الاحتراق، من أجل استغلال الحرارة المُتبقية من غازات العادم (اختياري).

72. تفريغ غازات دورة برايتون ذات درجة الحرارة العالية.

بالإضافة إلى المُعلمات السابقة، تتم الإشارة إلى عناصر فيزيائية للمسار من أجل تنفيذ الدورة وأنظمتها الفرعية، في الرسوم التي تستخدم الأرقام التالية لتحديد كيانات نسبٍ متنوعة:

100. دورة الاختراع الديناميكية الحرارية، مُمثلة في رسم بياني (P،h).

101. نقطة ديناميكية حرارية للخروج من بؤرة التسخين والدخول إلى المكبس.

102. نقطة ديناميكية حرارية للخروج من المكبس والدخول في مسار الضغط المنخفض لمُبادل الحرارة التجديدي (7).

103. نقطة دينامية حرارية للخروج من مسار الضغط المنخفض لمُبادل الحرارة التجديدي (7)، والدخول في البوزة الباردة (13).

104. نقطة دينامية حرارية للخروج من البوزة الباردة (13) والدخول في المكبس (17).

105. نقطة دينامية حرارية للخروج من المكبس (17) والدخول في أنابيب الضغط المرتفع لمُبادل الحرارة التجديدي.

106. نقطة دينامية حرارية للخروج من مُبادل الحرارة التجديدي (7) والدخول إلى بوزة التسخين (9).

1000. دورة رانكن تقليدية.

2000. دورة رانكن تتجاوز الدرجة الحرجة.

3000. دورة برايتون مفتوحة في خط تساوي الضغط المنخفض (1 بار).

4000. دورة برايتون فوق الدرجة الحرجة (من ناحية الضغط).

وصف صيغة لإنجاز الاختراع

يحتاج الاختراع إلى تحديد السوائل التي تستوفي الشروط المقررة في مواصفات الاختراع؛ والتي توثر على درجة الحرارة الحرجة التي يجب أن تتراوح بين 0 درجة مئوية و $T_r + \Delta T_t$.

تتغير T_r بشكل ملموس في الموقع الجغرافي، غير أنه يجب أخذ مجموعة من السوائل بعين الاعتبار لكونها مرشحة للاستخدام في الاختبار، وهي المُبينة في الجدول 2

السائل	درجة الضغط الحرج (بار)	درجة الحرارة الحرجة (درجة مئوية)
CO2	73,77	30,98
R134a ($C_2H_2F_4$)	40,59	101
R125 (C_2HF_5)	36,18	66,02
R116 (C_2F_6)	30,42	19,88
R32 (CH_2F_2)	57,84	78,11
الإيثان (C_2H_6)	48,72	32,17
إن-بينتان	33,64	196,5

جدول 2: درجات الضغط والحرارة الحرجة لسوائل التشغيل المحتملة

يمكن اعتبار 30 درجة مئوية كقيمة مُمثلة لـ T_r. وبالنسبة للفرق النهائي في درجات الحرارة في مُبرّد البؤرة الباردة ΔT_t ، فإن قيمته سوف تتوقف على ما إذا كان سيتبرَّد بالماء أو الهواء، حيث أن معامل الانبعاث الحراري للهواء يعتبر أقل بكثير من نظيره في الماء، وبالتالي فإن فرقه ΔT_t يجب أن يكون أكبر. كقيم مناسبة يمكن منح هامش بين 5 و 20 درجة مئوية للماء، وما بين 20 و 40 درجة مئوية للهواء، مع قيم مستحسنة تتمثل في 10 درجات مئوية للماء و 25 درجة مئوية للهواء. ونصل بذلك إلى قيم T_{min} تبلغ 40 درجة مئوية و 55 درجة مئوية على التوالي. اعتمادا على هذه الفرضيات البيئية والفرق النهائي، فإنه في الجدول السابق لا يمكن استخدام السوائل R125، و R134a، و R32، و إن-بينتان في الاختراع في أي حال من الأحوال. يمكن استخدام الإيثان، غير أنه يعاني من سلبية قابليته للاشتعال. لذلك تبقى السوائل المثالية هي CO_2 و R116 (سادس فلوريد الإيثيل). غير أنه إذا تم تغيير الفرضيات، وتم أخذ قيم أعلى لكل من T_r أو ΔT_t أو لكليهما بالاعتبار، فإنه يمكن الوصول إلى استخدام R125 و R32 وحتى R134a.

يقدم الجول 3 قائمة بقيم C_p بالنسبة إلى CO_2 في نطاقه المحيط بالنقطة الحرجة

الضغط	Cp (kJ/kg.K)			
(بار)	100 درجة مئوية	200 درجة مئوية	300 درجة مئوية	400 درجة مئوية
148	2,07	1,27	1,20	1,20
74	1,28	1,13	1,13	1,16
37	1,06	1,06	1,09	1,13
19	0,98	1,02	1,08	1,12
9	0,95	1,01	1,07	1,12

جدول 3: قيم C_p بالنسبة إلى CO_2 تحت درجات ضغط وحرارة مختلفة.

يجب إكمال هذه المعلومة بقيم مُعاملات خطوط تساوي الانتروبية بالنسبة للخطوط المهمة. بالنسبة إلى CO_2 في خط تساوي الانتروبية بقيمة انتروبية تبلغ J/kg.K 700-، بين 40 درجة مئوية و 34,35 بار؛ و 100 درجة مئوية و 71 بار، التي تمثل الضغط، فإن المعامل الظاهري k يساوي 1,31. بالنسبة لخط تساوي الانتروبية بقيمة انتروبية تبلغ J/kg.K 23-، بين 400 درجة مئوية و 71 بار؛ فإن قيمة المعامل y هي 1,22.

يحتاج الاختراع إلى أن يكون الفرق الآتي

$$\Delta Q - \Delta E = C_p \cdot T_n \cdot ((1 - R) \cdot (r/x) + x + R - x' - 1)$$

إيجابيا، ولذلك يجب استيفاء الآتي:

$$x' - x < (1 - R) \cdot ((r/x) - 1)$$

حيث

$$x = c^{(y-1)/y}$$

$$x' = c^{(k-1)/k}$$

توضح الأمثلة الرقمية التالية استخدام الاختراع:

بما أن القيم: $r = T_M/T_n = 673/313 = 2,15$ ، و $x=1,2$ ، و $R=0,92$، و $y=1,22$. فإن المعيار يصبح:

$$0,0633 > x' - 1,2$$

وتكون نسبة الضغط المفترضة هي:

$$C = x^{y/(y-1)} = 2,75$$

سوف تكون القيمة القصوى لـ x' هي 1,2633، ومنها سيتم استنتاج القيمة القصوى لـ k

$$c = 2,75 = 1,2633^{k/(k-1)}$$

ومن ذلك يتم الحصول على القيمة القصوى المقبولة لـ k وهي 1,31، والتي تُعد عمليا أقصى ما يمكن قبوله حسب البيانات السابقة.

إذا تم أخذ نسبة ضغط أقل بالاعتبار، مثل 2، فإن النتيجة تكون مقبولة بشكل واضح، حيث أنه في هذه الحالة تكون $x= 1,133$، و $x'= 1,178$، و $R=0,93$، بينما تبقى r بقيمة 2,15، على نحو يستوفي مبدأ عدم تساوي المعيار

$$x' - x = 0,045 < (1 - R).((r/x) - 1) = 0,063$$

يتضمن تخفيض نسبة الضغط c رفع قيمة G، وهي الحرارة التي يتم نقلها عبر المُبادل التجديدي، حيث تساوي

$$G = C'_p \cdot (T_M/x - T_n \cdot x' + \Delta Ti)$$

ومع تخفيض c، ومن ثم x و x'، سيرتفع المطروح منه في الأقواس وينخفض المطروح، وبذلك ترتفع قيمة G. وبالرغم من هذا التأثير الذي يحمل انعكاسا اقتصاديا سلبيا، فإنه يتوفر على ميزة جد مهمة حيث أنه يُمكّن استغلال طاقة حرارية تبلغ درجات حرارية معتدلة نسبيا في بؤرته الساخنة كالطاقة الحرارية الشمسية، مع مردود جيد وآلات بسيطة نظرا لتوافقه مع نسب ضغط جد معتدلة.

لحساب المردود النظري لهذه الدورة نستخدم المعادلات الآتية:

$$Q = C_p \cdot (T_M - T_M/x + \Delta Ts)$$

$$E = C'_p \cdot (T_n \cdot x' + \Delta Ti - T_n)$$

انطلاقا من القيم المذكورة سابقا، x= 1,133، x'= 1,175، T_M= 673 K، T_n= 313 K، C_p=1,17 kJ/kg·K، C'_p= 1,08 kJ/kg·K؛ يتم الحصول على 369 K في مخرج الضغط و 594 K في مخرج التمدد؛ كما ينزل تدفق الضغط المنخفض وأدنى C'_p بالتالي من 594 إلى 369، وذلك استنادا إلى فرضية قصوى بأن $\Delta T_i = 0$ ، وبذلك يبقى النقل في المُبادل التجديدي كالآتي:

$$G = 1,088 \cdot (594 - 369) = 245 \text{ kJ/kg}$$

ويعني ذلك أن درجة الحرارة في المُبادل ترتفع بنسبة 209 K (= 245/1,17) وتصل إلى 578 K في فرع الضغط المرتفع، حيث يجب أن ترتفع إلى حد 673 K في البوّرة الساخنة، وهو ما يفترض قيمة Q تساوي:

$$Q = 1,17 \cdot (673-578) = 111 \text{ kJ/kg}$$

من جهة أخرى، يكون استخلاص المحتوى الحراري المعين E في البوّرة الباردة كالآتي:

$$E = 1,088 \cdot (369-313) = 61 \text{ kJ/kg}$$

وبذلك يكون المردود الذي تم إيجاده هو:

$$\eta = (111 - 61)/111 = 0,45$$

وهذا يعتبر مردودا نظريا. إن الاختراع في الواقع يتجسد اعتمادا على مكونات غير مثالية تعاني من اللاانعكاسات (خصوصا الالات) التي تتوفر على حجم محدود (خصوصا مبادلات الحرارة) والتي تتوفر على زمن محدد لكي يتم انجاز الطور الموافق للدورة، الشيء الذي يؤدي أيضا إلى حدوث تطورات غير مثالية.

من أجل أخذ هذه التأثيرات بعين الاعتبار، تم حساب دورة جديدة أُدرج فيها مردود داخلي في آلات من فئة 90%، وهو ما يعني أن المكبس يحتاج إلى نسبة 11% أكثر من الطاقة لرفع ضغط P_b و P_a؛ بينما تمنح آلة التمديد 90% من القوة في المحور مقارنة مع الحساب النظري.

يمثل الجدول 4 هذه الدورة حسب نقطها الأساسية:

النقطة	المحتوى الحراري (جول/كلغ)	الضغط (بار)	الانتروبية (J/kg-K)	درجة الحرارة (درجة مئوية)	الحجم المعين (متر^3/كلغ)
101	475942	100	69,96	500	0,01476
102	355657	38,34	83,7	389,9	0,03257
103	86277	38,34	-423,9	141,4	0,01919
104	-18651	38,34	-712,7	45	0,01298
105	37225	100	-705,7	128,3	0,006235
106	306605	100	-172,2	356,3	0,01176

الجدول 4: بعض المُعلمات الدينامية الحرارية في نقط مختلفة من الدورة.

أما الجدول 5 فيتضمن خدمات هذه الدورة الواقعية

خصائص الدورة الواقعية لـ CO_2		
مردود الدورة	η	0,3804
علاقة الحرارة المُضافة / الحرارة الإجمالية		0,386
علاقة الحرارة المُستبعدة / الحرارة المضافة		0,6196

نسبة الضغوطات	ρ	2,608
نسبة الضغط عند مدخل التوربينة (بار)	P_a	100
نسبة الضغط عند مخرج التوربينة (بار)	P_b	38,34
درجة الحرارة عند مدخل التوربينة (درجة مئوية)	T_{max}	500
درجة الحرارة عند مخرج البؤرة الباردة (درجة مئوية)	T_{min}	45

جدول 5: قيم بعض مُعلمات الدورة

من إجمالي الحرارة المُضافة على طول خط تساوي الضغط المرتفع، يأتي 38,6% من البؤرة الساخنة، بينما يتم نقل 62,4% الإضافية عبر مُبادل الحرارة التجديدي، وهو ما يمكن اعتباره إعادة للطاقة الحرارية لـ 1,61 = (0,624/0,386). ويعني هذا أن المُبادل المذكور من ناحية الانتروبية يبلغ 1,61 مرة البؤرة الساخنة، ومع ذلك يمكن أن يكون أرخص بكثير كما سيتم تحليله لاحقا.

خلال هذه الدورة الواقعية، يكون الفارق اللوغارتمي المتوسط لدرجات الحرارة ΔT_m كالآتي:

$$\Delta T_{lm} = \{(T102-T106) - (T103 - T105)\}/Ln\{(T102-T106)/(T103 - T105)\}$$

وهو ما يعطي قيمة تقارب 20 درجة مئوية.

أما بالنسبة لمُبادلات الحرارة، فإنه من المهم تذكر معادلتها المتعلقة بالنقل الحراري، وهي:

$$Д = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$$

حيث تكون Д هي القوة الحرارية المنقولة، و U هي المعامل العام لنقل الحرارة الذي يتوقف على السوائل المستخدمة، والذي ليس من الأنسب رفع قيمته كثيرا وإلا سترتفع قوة الضخ كثيرا؛ أما A فهي منطقة النقل الحراري. وكلما كانت تلك المعادلة أكبر، كلما كان المُبادل أغلى. ومن أجل تفادي التكاليف والأحجام الباهظة، يجب السماح بقيمة أعلى في الفارق اللوغارتمي المتوسط لدرجات الحرارة ΔT_m، والذي يعني من الناحية العملية أن T نقطة 106 يجب أن تكون أقل قليلا من T نقطة 102، وعلى نفس النحو يجب أن تكون T نقطة 105 أقل قليلا من T نقطة 103. وفي الحالة السابقة بلغت قيمة الفارق 21 درجة مئوية.

إذا افترضنا أن لدينا حقلا للاقطات الشمسية المكافئة (CCP) يتوفر على كثافة خطية للقوة تبلغ 5 كيلوات/متر، وأن هذه اللاقطات تجمع قوة حرارية تبلغ 100 ميغاوات يتم التقاطها من خلال CO_2 الذي يُستخدم كسائل تسخين ذو ضغط يبلغ 100 بار (P_a في المثال السابق). وهذا يعني 20 كلم من اللاقطات، مع أنابيبها المُستقبلة المناسبة. فإن التدفق الكتلي m' الذي يجب تحريكه هو

$$Q = 100\ MW = m' \cdot (h101-h106) = m' \cdot (0,476\ MJ/kg - 0,306\ MJ/kg)$$

وهو ما يعطي القيمة m' = 588 MJ/kg (والتي تنقسم منطقيا إلى مسارات عديدة متوازية يبلغ طولها الإجمالي 20 كلم كما ذُكر سابقا).

يجب أن تمر هذه الكمية نفسها عبر المُبادل التجديدي (G)، الذي سيكون مُكونا بشكل مثالي من حزمات من الأنابيب المُثبتة داخل هيكل. ويتوقف المعامل العام لنقل الحرارة U على سرعة مرور السائل البارد والساخن، حيث يمر كل منهما في مساره، ويرافق ذلك جانب سلبي يتمثل في أنه كلما ارتفعت السرعة ارتفع معدل ضياع الشحن المانومتري، بل وترتفع أيضا قوة الضخ. إذا افترضنا أن $U = 250\ W/m^2.K$، فإنه ينتج عن ذلك أن منطقة النقل الحراري تبلغ $32.200\ m^2 = 161\ MW / 5.000\ W/m^2$، وهو ما يمكن الحصول عليه باستخدام 10.000 من الأنابيب المتوازية.

في تطبيق معين تكون فيه درجات الحرارة القصوى والدنيا معروفة، فإنه من الضروري اختيار درجة الضغط المرتفع ودرجة الضغط المنخفض. بالنسبة للأولى، فإن الخيار الأمثل هو خط تساوي الضغط الذي يسمى الأقصى والذي تُمثل درجة ضغطه بواسطة P_{sup}، والتي يحصل خلالها اشتقاق القيمة المتوسطة لـ C_p في خط تساوي الضغط المذكور، فيما يتعلق بنسبة الضغط التي يتم قياسها باعتبار الضغط الحرج،على القيمة الأكثر ارتفاعا في كل خطوط تساوي الضغط في تلك المنطقة.

بالنسبة إلى CO_2 الذي ينحصر في درجات حرارة النطاق المحيط بالنقطة الحرجة المتراوحة بين 100 و 400 درجة مئوية، فإن قيم اشتقاق (dC_{pm}/dc_c) هي التي يتم منحها لاحقا بالنسبة لدرجات ضغط مختلفة، حيث تكون C_{pm} هي القيمة المتوسطة للحرارة المعينة ذات الضغط الثابت في خط تساوي الضغط المعني، بينما تكون c_c هي النسبة بين درجة الضغط المعنية ودرجة الضغط الحرجة. بالنسبة إلى 50 بار، فإن ذلك الاشتقاق يساوي 0,265 (بمقياس kJ/kg.K)؛ ويرتفع إلى 0,21 بالنسبة إلى 200 بار. وحسب هذه المعطيات، فإن خط تساوي الضغط الأقصى سيكون خط 130 بار.

يتم اختيار خط تساوي الضغط المنخفض من خلال تقديم أقصى قيمة لدالة نفعية حقيقية، والتي تتوافق مع نسبة يكون فيها بسط الكسر هو العمل المعين الصافي للدورة، والذي يُقاس كارتفاع للمحتوى الحراري المعين في البؤرة الساخنة، ناقص المحتوى الحراري الممنوح في البؤرة الباردة؛ بينما يكون مقام الكسر هو مجموع القيم المطلقة لتغيرات المحتوى الحراري المعين لكل طور، والتي تتم موازنتها ببعض المُعاملات التي تم اختيارها عند استخدام الاختراع قيد الذكر، والتي تقوم بتقييم تكلفة الوحدة لكل نوع من المكونات المستخدمة في كل طور.

إذا كانت قيمة خط تساوي الضغط الأقصى مرتفعة بشكل غير مقبول لأسباب ميكانيكية بالنسبة للتطبيق المعني، فيتم تثبيت قيمة الضغط المرتفع الأقصى المسموح به، ثم يجري اختيار قيمة خط تساوي الضغط المنخفض حسب الخطوات السابقة. وسيتم لاحقا تقديم مخطط لهذا التحسين الذي تم تطبيقه على دورة ذات CO_2 بقيمة 70 بار لخط تساوي الضغط المرتفع، ودرجة حرارة دنيا تبلغ 31 درجة مئوية بينما تبلغ درجة الحرارة القصوى 400 درجة مئوية.

بالنسبة للتحسين يتم تحديد تغيرات المحتوى الحراري المعين التالية بالقيمة المطلقة: الإضافة الحرارية (المحتوى الحراري) في البؤرة الساخنة (Q)؛ استخلاص الحرارة (المحتوى الحراري) من البؤرة الباردة (E)؛ الحرارة المُتبادلة في المُبادل التجديدي (G)؛ التغير الإجمالي لمحتوى الحراري في الآلات (M)، بالإضافة إلى القيم المطلقة للضغط والتمدد؛ وإلى ذلك تتم إضافة وزن تقييمي m إلى M؛ ووزن تقييمي g إلى G وإلى E (حيث أن الأمر يتعلق بمُبادلات حرارة تقليدية، في كلتا الحالتين). يتم تخصيص وزن الوحدة لـ Q، بحيث تمثل m تكلفة معالجة جول (J) من الطاقة في الآلات فيما يتعلق بإضافة جول (J) في البؤرة الساخنة؛ في مركز حراري تكون فيه اللاقطات الشمسية مُكلفة وتحتاج إلى مساحة كبيرة، ونظرا لضعف الإشعاع الشمسي (من الناحية الصناعية)، فإنه يمكن تخصيص وزن m=0,5 للآلات؛ ووزن g=0,1 للمُبادلات؛ ويتم تحديد الدالة النفعية الحقيقية F كالآتي:

$$F = (Q - E)/(m.M + g.G + g.E + Q) = \eta/(m.(M/Q) + g.(G/Q) + g.(1-\eta) + 1)$$

يُلخص الجدول 6 الحالات 3 المقترحة، حيث P_a = 70 بار

P_b	c	R	η	M/Q	G/Q	F
54,21	1.29	0,98	0,38	0,775	6,09	0,18
30,45	2,30	0,955	0,393	1,14	1,48	0.221
13,40	5,23	0,937	0,316	1.428	0,107	0,18

الجدول 6: قيم بعض المُعلمات المحددة المتعلقة بالاختراع

في هذه الحالة يتم الحصول على درجة ضغط منخفض تبلغ 30,45 بار، والتي تعتبر متوافقة مع التقديرات السابقة لنسب الضغط التي ترتفع قليلا عن 2، بحيث يتم الحصول ليس فقط على أكبر قيمة للدالة النفعية الحقيقية، وإنما أيضا على أفضل مردود.

يتم تجسيد هذه الدورة عبر تجميع مكوناتها الخمسة الأساسية في مسار، بالإضافة إلى أنابيب الربط، وتتمثل هذه المكونات الخمسة في الآتي:

- المكبس أو التوربينة (1)، والتي يتلقى مجمع السحب (2) الخاص بها سائل نظام الإضافة الحرارية (9)، حيث يكون مُجمع العادم (3) لآلة التمديد موصولا بمسار الضغط المنخفض للمُبادل التجديدي (5) عبر مسار للضغط المنخفض (4). في هذا المسار (4) يتم وضع أنابيب (4) الربط مع مستودعات تخزين الضغط المنخفض (52).

- مُبادل الحرارة التجديدي (7) الذي يتوفر – على وجه التدقيق – على مسارين: مسار الضغط المنخفض (5) خارج الأنابيب، ومسار الضغط المرتفع (6) داخل الأنابيب، غير أنه يعتبر مُكونا واحدا.
- مُبرِّد البؤرة الباردة (13) الذي من خلال أنابيبه (12) يمر سائل التشغيل إلى أن يصل إلى مُجمع مدخل (16) المكبس (17).
- المكبس (17) الذي يكون مُجمع الدفع (18) الخاص به موصولا بأنابيب (6) الضغط المرتفع لمُبادل الحرارة التجديدي (7). في أنبوب الدفع (19) المذكور يمكن اختيار وضع صمام لتعديل التدفق (50) علاوة على أنبوب الاستخراج (38) الذي يتصل بمستودع تخزين سائل الضغط المرتفع، وأنبوب حقن (48) سائل الضغط المرتفع في أنبوب الدفع (19).
- جهاز أو نظام إضافة الحرارة إلى بؤرة التسخين (9) الذي يمكن أن تكون له أشكال متنوعة، وذلك حسب طبيعة ومنشإ الحرارة المضافة، والتي يمكن أن تأتي بشكل مباشر أو غير مباشر من منشأة لالتقاط الطاقة الحرارية الشمسية، أو يمكن أن تكون ذات منشأ جيوحراري، أو أن تأتي من أي نوع من المحروقات، أو المفاعلات أو الاشعاعات النووية، ويمكن أن تأتي خصوصا من حرارة الارتداد في دورة برايتون ذات درجة حرارة أعلى، في فرعها البارد، من درجة حرارة بؤرة التسخين (9) لهذه الدورة.

لغرض الشروع في شحن وتفريغ السائل، والتوفر بذلك على القدرة على تعديل الدورة من خلال ضبط مستويات الضغط بها بالدرجة المطلوبة من أجل ظروف التشغيل، يتم التوفر على بعض أنظمة تعديل الضغط المرتفع والضغط المنخفض، والتي تشتمل على المكونات التالية المرتبطة فيما بينها كما هو مبين في هذه الوثيقة:

- يشتمل نظام تعديل خط تساوي الضغط المرتفع على:
  - أنبوب استخراج السائل (38) من أنبوب الدفع (19) للمكبس، مع صمام تخفيف (39) للضغط المرتفع في أنبوب استخلاص السائل المذكور (38).
  - جهاز أو أكثر (42) لتخزين سائل الضغط المرتفع، والذي يصب فيه أنبوب الاستخلاص المذكور (38).
  - أنبوب حقن سائل الضغط المرتفع (48) الذي ينطلق من مستودعات التخزين (42)، ويحقن السائل في أنبوب الدفع (19) للمكبس، حيث يستخدم لهذه الأغراض مكبسا إضافيا (49) للضغط المرتفع الذي يتم تثبيته في أنبوب الحقن المذكور (48).
  - أنبوب تفريغ (46) تلك المستودعات (42)، والمُزوَّد بصمام قطع وتصفيح (47)، حيث يتم حقن السائل في مستودعات تخزين الضغط المنخفض (52)، مع وجود صمامات (45) في أعلى نظام التفريغ المذكور، وأخرى لملء (53) مستودعات الضغط المنخفض (52).

- يشتمل نظام تعديل خط تساوي الضغط المنخفض على:
  - أنبوب تحويل (40) سائل الضغط المنخفض الذي ينطلق من مسار العادم (4) لآلة التمديد، مع صمام تخفيف الضغط المنخفض (41) في ،بوب التحويل المذكور.
  - جهاز أو أكثر لتخزين سائل الضغط المنخفض (52)، والذي يصب فيه أنبوب التحويل المذكور (40).
  - أنبوب حقن (54) سائل الضغط المنخفض الذي ينطلق من مستودعات التخزين المذكورة (52)، ويحقن السائل في مسار العادم (4) بالمكبس، حيث يستخدم لذلك الغرض مكبسا إضافيا (55) للضغط المنخفض تم تثبيته في أنبوب الحقن المذكور (54)، مع وجود صمامات تفريغ (56) تنضاف إلى صمامات شحن (53) المستودعات (52)، علاوة على صمام التحكم (41).

فضلا عن ذلك، يتوفر في المستودعات (52) أنبوب تخفيف (57) لغرض الأمان، مع إمكانية تفريغ سائل مستودعات تخزين الضغط المنخفض في الجو، كما أنه مجهز بصمام أمان (58) يتم فتحه عند الضغط المفرط.

تتلقى مستودعات الضغط المنخفض (52) بالإضافة إلى ذلك السائل الذي يتم تجميعه من قبل نظام إعادة تجميع التسربات، والذي يوجد حول مرتكزات محمل المحور (25)، سواء بالنسبة لآلة التمديد (1) التي يحيط الهيكل الخاص بها (30) بمرتكز المحمل في جهة الضغط المرتفع (28)، أو بالنسبة للمكبس (17) الذي يحيط الهيكل الخاص به (34) بمرتكز المحمل في جهة الضغط المرتفع (29)؛ وانطلاقا من الهيكل (30) لآلة التمديد ينطلق أنبوب (31) مُزود بصمام (32) تعديل الضغط، والذي يتصل بأنبوب (59) شحن مستودعات الضغط المنخفض (52)، حيث يتحكم صمام خاص (60) بفتحه وإغلاقه؛ وانطلاقا من الهيكل (34) للمكبس ينطلق أنبوب (35) مزود بصمام (36) تعديل الضغط، والذي يتصل بأنبوب (59) شحن مستودعات الضغط المنخفض (52).

يتم تعديل تشغيل الدورة بشكل ذاتي من خلال استيفاء التوازنين الأساسين: التوازن الميكانيكي وتوازن المحتوى الحراري. يتم استيفاء التوازن الأول في حالة توقف التشغيل عندما يساوي إجمالي قوة الدفع للنظام إجمالي قوة كبح السائل، بما في ذلك ضياع الشحن المانومتري بسبب طابع عدم الانعكاس، بالإضافة إلى النشاط المُقاوم للمولد الكهربائي المشترك نحو المحور (25)؛ بينما يتم استيفاء توازن المحتوى الحراري عندما يوجد السائل بعد انتهاء الدورة في نفس الظروف الدينامية الحرارية التي كان عليها في بداية الدورة.

تتوقف تلك التوازنات على المواصفات المعينة للآلات المُستخدمة، وكذلك على مُبادلات الحرارة، والتي تُشكل جميعها المكونات الخمسة الأساسية للدورة في الاختراع. يمكن أن يتعرض تشغيل الدورة للعرقلة نتيجة لأفعال خارجية، خصوصا بسبب تغيرات عزم مقاومة المولد الكهربائي أو الآلة التي تمتص القوة النافعة التي تم توليدها، أو بسبب التغيرات الحرارية في بؤرة التسخين أو في البؤرة الباردة. من أجل إعادة ظروف تشغيل الدورة حسب الهوامش التي تم تحديدها في الاختراع، يتم استخدام أنظمة تعديل الضغط في خط تساوي الضغط المرتفع وخط تساوي الضغط المنخفض. إذا كان ينبغي رفع الضغط في كل واحد من خطي تساوي الضغط، فيتم حقن السائل؛ ويتم ذلك بالنسبة لخط تساوي الضغط المرتفع من خلال حقن السائل عبر أنبوب الحقن (48) في أنبوب الدفع للمكبس (19)، حيث يتم تشغيل المكبس الإضافي (49) وفتح الصمامات (44) و (43)؛ بينما يتم ذلك بالنسبة لخط تساوي الضغط المنخفض عبر حقن السائل في أنبوب الربط (40) في مسار العادم (4) لآلة التمديد، حيث يتم تشغيل المكبس الإضافي (55) وفتح الصمامات (56) و (41)؛ وإذا كان الأمر يستدعي تخفيض الضغط، فيتم استخراج السائل؛ ويحدث ذلك بالنسبة لخط تساوي الضغط المرتفع من خلال تفريغ السائل عبر أنبوب الاستخراج (38) انطلاقا من مسار الدفع (19) للمكبس، وفتح الصمامات (39) و (44)؛ ويتم ذلك بالنسبة لخط تساوي الضغط المنخفض من خلال تفريغ السائل عبر أنبوب الربط (40) انطلاقا من مسار العادم (4) لآلة التمديد، وفتح الصمامات (41) و (53).

بعد وصف الاختراع بشكل واضح، يُستنتج أن الإعدادات الخاصة التي تم وصفها سابقا قابلة لإجراء تعديلات تفصيلية طالما كانت لا تؤثر على المبدأ الأساسي وجوهر الاختراع.

مطالبات

1- دورة برايتون ذات تبريد بيني قريب من خط التحارر الحرج T_{Cr} لسائل التشغيل، والذي يتحرك في دورة مغلقة بين ضغط منخفض P_a وضغط مرتفع P_b تفوق درجته درجة الضغط المنخفض، ويتضمن:

- طور تمدد يتم في آلة تمديد (1)؛
- تبريد تجديدي يحدث في جهة الضغط المنخفض لمُبادل الحرارة التجديدي (7)؛
- تبريد خارجي في بوُرة باردة تتوفر على مُبرِّدها الخاص (13)؛ حيث يتبع خط تساوي الضغط المنخفض؛
- ضغط في مكبس (17) حتى خط تساوي الضغط المرتفع؛
- تسخين تجديدي يحدث في جهة الضغط المرتفع لمُبادل الحرارة التجديدي (7)؛
- إضافة حرارية ذات ضغط مرتفع تأتي من بوُرة تسخين (9) خارجية، والتي يصل سائل التشغيل في نهايتها إلى درجة حرارته القصوى في الدورة T_M.

يتم إجراء التبريد المذكور للبوُرة الباردة بواسطة سائل خارجي تبلغ درجة حرارته T_r، والذي يعتبر خاصية المنفذ الأخير للحرارة التي يقدمها الوسط البيئي، وحيث تكون ΔT_r هي الفارق النهائي للحرارة في مُبرِّد البوُرة الباردة، أو الفارق بين درجة الحرارة الدنيا لسائل التشغيل في الدورة وبين درجة الحرارة البيئية T_r، **ويتميز** بالآتي:

- تكون درجة الحرارة الحرجة TCr لسائل التشغيل المُختار لهذه الدورة أقل من مجموع Tr زائد ΔT_r، حيث يسمى هذا المجموع Tn، وهي درجة الحرارة الدنيا لسائل التشغيل في الدورة؛
- يجب أن تكون درجة حرارة خط تساوي الضغط المنخفض P_b في نفس الوقت:
  - أعلى من عُشر درجة الحرارة الحرجة P_{Cr} لسائل التشغيل المُختار،
  - أقل من الضغط الحرج P_{Cr} لسائل التشغيل المُختار؛

- كما ينبغي لدرجة ضغط خط تساوي الضغط المرتفع Pa أن تكون في نفس الوقت:
  - أعلى من خمس الضغط الحرج PCr لسائل التشغيل المُختار؛
  - أقل من خمسة أضعاف الضغط الحرج PCr لسائل التشغيل المُختار؛

كما يستوفي سائل التشغيل المُختار، داخل الحيز الديناميي الحراري الذي يقع بين درجتي الحرارة T_n و T_M ودرجتي الضغط المنخفض P_b والمرتفع P_a المختارتين، القيمة المتوسطة بين T_n و T_M للحرارة المعينة ذات الضغط الثابت C_p بالنسبة لخط تساوي الضغط، حيث ترتفع إذا ارتفعت درجة الضغط.

2- دورة برايتون ذات تبريد بيني قريب من خط التحارر الحرج T_{Cr} لسائل التشغيل حسب المطالبة رقم 1، **والمتميزة** بالآتي:

- يتم تحديد مدخل المكبس (17) من قبل درجة الحرارة الدنيا لسائل التشغيل Tn ودرجة ضغط خط تساوي الضغط المنخفض P_b، وهو ما يوفر حالة ديناميةحرارية واضحة تتوافق معها أنتروبية S_c، والتي يتميز خط تساوي انتروبيتها بمعامل ظاهري k يقوم بربط النسبة بين درجات حرارة المخرج T105 ودرجة حرارة المدخل T104 في المكبس، مع نسبة ضغط c حسب القانون

$$(T105/T104) = c(k-1)/k$$

- يتم تحديد مدخل آلة التمديد (1) عبر اختيار خط تساوي الضغط المرتفع P_a، والذي يساوي حاصل ضرب قيمة تساوي الضغط المنخفض في نسبة الضغط c؛ وقيمة T_M لدرجة الحرارة القصوى التي يبلغها سائل التشغيل في البوُرة الساخنة، وهو ما يوفر حالة ديناميةحرارية واضحة تتوافق معها أنتروبية St، والتي يتميز خط تساوي انتروبيتها بمعامل ظاهري بين درجات الحرارة المعينة ذات الضغط الثابت والحجم الثابت γ؛

وحيث يتم تحديد معامل Ψ كالآتي:

$$\Psi = (k-1)\gamma/(\gamma-1)k$$

وهو ما يحدد دورة يتم فيها إلغاء تبادل الحرارة التجديدي، وتكون فيها حرارة السائل في مخرج المكبس (17) وحرارة السائل في مخرج آلة التمديد (1) متطابقتان، ونسمي تلك القيمة T_a باعتبارها درجة حرارة التعديل، والتي يتم تحديدها بواسطة قيمة درجة التحارر T_n و T_M حسب الصيغة:

$$T_a = (T_M^{\Psi} T_n)^{1/(1+\Psi)}$$

وتكون نسبة الضغط c_{ar}، التي يتم تطبيقها في آلات هذه الدورة المُعدلة الحقيقية هي:

$$C_{ar} = (T_M/T_N)^{1/(2-(\gamma+k)/\gamma k)}$$

3- دورة برايتون ذات تبريد بيني قريب من خط التحارر الحرج T_{Cr} لسائل التشغيل حسب المطالبتين السابقتين، **والمتميزة** بأنها محصورة بين القيمة الدنيا T_n والقيمة القصوى T_M لدرجة حرارة سائل التشغيل، حيث تكون الدورات التجديدية المثالية محددة من قبل نسبة الضغط المستخدمة، والتي يجب أن تكون في نفس الوقت أكبر من 1 وأصغر من c_a، حيث تكون هذه الأخيرة

$$C_a = (T_M/T_N)^{\gamma/2(\gamma-1)}$$

وحيث يتم تحديد دالة نفعية مثالية L كالتالي:

$$L = (Q - E) / ((1+a)\,Q + (1+b)\,E + G)$$

حيث:

- يكون بسط الكسر هو القوة الصافية المتولدة في الدورة، والتي تعتبر المحتوى الحراري المُضاف في البوْرة الساخنة (Q) ناقص المحتوى الحراري المُستخرج في البوْرة الباردة (E)؛
- يكون مقام الكسر هو مجموع التغيرات الثلاثة للمحتوى الحراري: أ) في طور التسخين والتمدد (Q)، ب) في طور التبريد والضغط (E)، ج) في طور التبادل التجديدي (G)، حيث:

$$Q = C_p\,(T_M - T_M/x)$$

$$E = Cp\,/T_n\,x - T_n)$$

$$G = Cp\,(T_M/x - T_n\,x)$$

وحيث تكون "a" و "b" عاملا تقييم يتم اختيارهما حسب طبيعة الآلات المستخدمة، فإن $a > 1$ و $b > 1$ ، بينما تكون x مُعلما مُحددا كالآتي:

$$x = c^{(\gamma-1)/\gamma}$$

على نحو توجد فيه قيمة قصوى لنسبة الضغط التي ترفع قيمة الدالة النفعية الحقيقية L للحد الأقصى، وتتوافق مع:

$$C_{max} = x_{max}^{\gamma/(\gamma-1)}$$

حيث تتوقف x_{max} على عاملي التقييم "a" و "b" اللذان تم اختيارهما حسب طبيعة الآلة المستخدمة، وعلى نسبة درجات الحرارة r التي تم تحديدها كمعامل بين T_M و T_n على النحو التالي:

$$x_{max} = ((2(a+b) + (4(a+b)^2 - 4(1+a+b-(1/r))\,(1+a+b-r))^{1/2}/2(1+a+b-(1/r))$$

4- دورة برايتون ذات تبريد بيني قريب من خط التحارر الحرج T_{Cr} لسائل التشغيل حسب المطالبات السابقة، والتي **تتميز** بأن سائل التشغيل في منطقة تحرك الدورة يتوفر على حرارة معينة ذات ضغط ثابت في خط تساوي الضغط المرتفع C^*_p أكبر من

الحرارة المعينة ذات الضغط الثابت في خط تساوي الضغط المنخفض C'_p؛ كما أن سائل التشغيل يتم اختياره من بين السوائل التي تستوفي الصيغة التالية:

$$x' - x < (1 - R)\cdot((r/x) - 1)$$

حيث:

$$x = c^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$x' = c^{(k-1)/k}$$

$$R = C'_p/C^*_p$$

$$r = T_M/T_n$$

وحيث تكون k هي المعامل الظاهري الذي يقوم بربط النسبة بين درجات حرارة المخرج T105 ودرجة حرارة المدخل T104 في المكبس، مع نسبة ضغط c حسب القانون

$$(T105/T104) = c(k-1)/k$$

5- دورة برايتون ذات تبريد بيني قريب من خط التحارر الحرج T_{Cr} لسائل التشغيل حسب المطالبات السابقة، والتي **تتميز** بوجود نطاق محيط بالنقطة الحرجة في مجال لدرجات حرارية تمتد انطلاقا من درجة الحرارة الحرجة T_{Cr} بالإضافة إلى زيادة الحد ΔT المُختار بين 1 K و 40 K، ودرجة حرارة نهاية النطاق T_{fin} التي يتم اختيار قيمتها بين 1,5 و 3 مرات قيمة T_{Cr}، التي يتم قياسها دائما بمقياس مطلق لدرجات الحرارة؛ حيث يبقى النطاق المحيط بالنقطة الحرجة محصورا من ناحية الضغط بين خطوط تساوي الضغط لخمس درجة الضغط الحرجة، وخمسة أضعاف درجة الضغط الحرجة المذكورة، مع أن هذه القيمة القصوى للحد يمكن أن تنخفض لاعتبارات ميكانيكية؛ كما أنه يوجد في النطاق المحيط بالنقطة الحرجة خط لتساوي الضغط يسمى بالأقصى ويُمثَّل من خلال ضغطه P_{sup}، وفي هذا الخط يحصل اشتقاق القيمة المتوسطة لـ C_p، فيما يتعلق بنسبة الضغط التي تم قياسها مقارنة بدرجة الضغط الحرجة، على القيمة الأعلى في كل خطوط تساوي الضغط في تلك المنطقة؛ ويكون خط تساوي الضغط المذكور هو خط تساوي الضغط الذي يتم اختياره كخط لتساوي الضغط المرتفع في الدورة؛ حيث يتم تثبيت خط تساوي الضغط المنخفض لمنح القيمة القصوى لدالة نفعية حقيقية، والتي تتوافق مع نسبة يكون فيها بسط الكسر هو العمل المعين الصافي للدورة، والذي يتم قياسه كزيادة في المحتوى الحراري المعين في البوزة الساخنة، ناقص المحتوى الحراري الممنوح في البوزة الباردة؛ ويكون مقام الكسر هو مجموع القيم المطلقة لتغيرات المحتوى الحراري المعين لكل طور، والتي تتم موازنتها ببعض المعاملات التي تم اختيارها عند استخدام الاختراع قيد الذكر، والتي تقوم بتقييم تكلفة الوحدة لكل نوع من المكونات المستخدمة في كل طور؛ وإذا سلَّمنا في هذا التوصيف بأنه لا توجد هناك عوائق ميكانيكية ضد اتخاذ خط تساوي الضغط الأقصى كخط لتساوي الضغط المرتفع، وفي حالة عدم القدرة على اعتبار قيمة P_{sup} المذكورة مفرطة، فيتم إقرار خط تساوي الضغط المرتفع في أقصى قيمة مسموح بها في التطبيق المعني، ويتم رفع قيمة الدالة النفعية إلى الحد الأقصى حسب ما تم تحديده؛ وهو ما يتم تجسيده بتغيرات المحتوى الحراري المعين بالقيمة المطلقة، والتي تحدث في الإضافة الحرارية في البوزة الساخنة (Q)؛ واستخراج الحرارة من البوزة الباردة (E)؛ والحرارة المُتبادلة في المُبادل التجديدي (G)؛ والتغير الإجمالي لمحتوى الحراري في الآلات (M)، بالإضافة إلى القيم المطلقة للضغط والتمدد؛ وإلى ذلك تتم إضافة وزن تقييمي m إلى M؛ ووزن تقييمي g إلى G وإلى E، كما يتم تخصيص وزن الوحدة لـ Q، بحيث تمثل m تكلفة معالجة جول (J) من الطاقة في الآلات فيما يتعلق بإضافة جول (J) في البوزة الساخنة؛ وبنفس الطريقة، تمثل g نسبيا ما يكلفه تبادل جول في أحد المُبادلات، حيث تكون F الدالة النفعية الحقيقية ويتم تحديدها كالآتي:

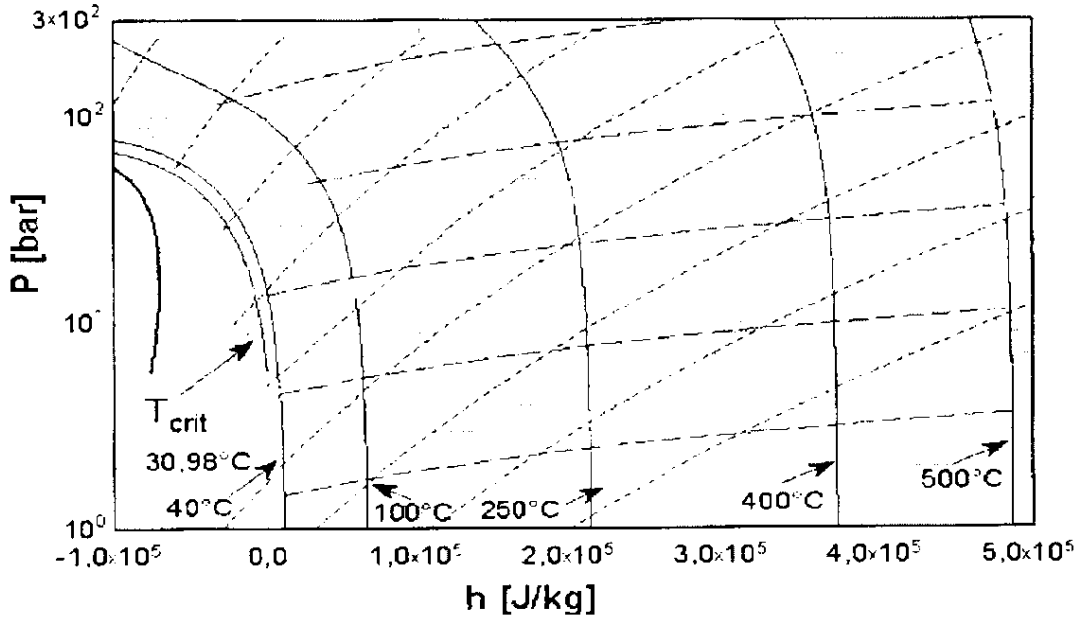
$$F = (Q - E)/(m.M + g.G + g.E + Q) = \eta/(m\cdot(M/Q) + g\cdot(G/Q) + g\cdot(1-\eta) + 1)$$

6- دورة برايتون ذات تبريد بيني قريب من خط التحارر الحرج T_{Cr} لسائل التشغيل حسب أي من المطالبات السابقة، و**تتميز** بكون الحرارة المضافة في بوزة التسخين (9) تأتي من أحد المصادر التالية:

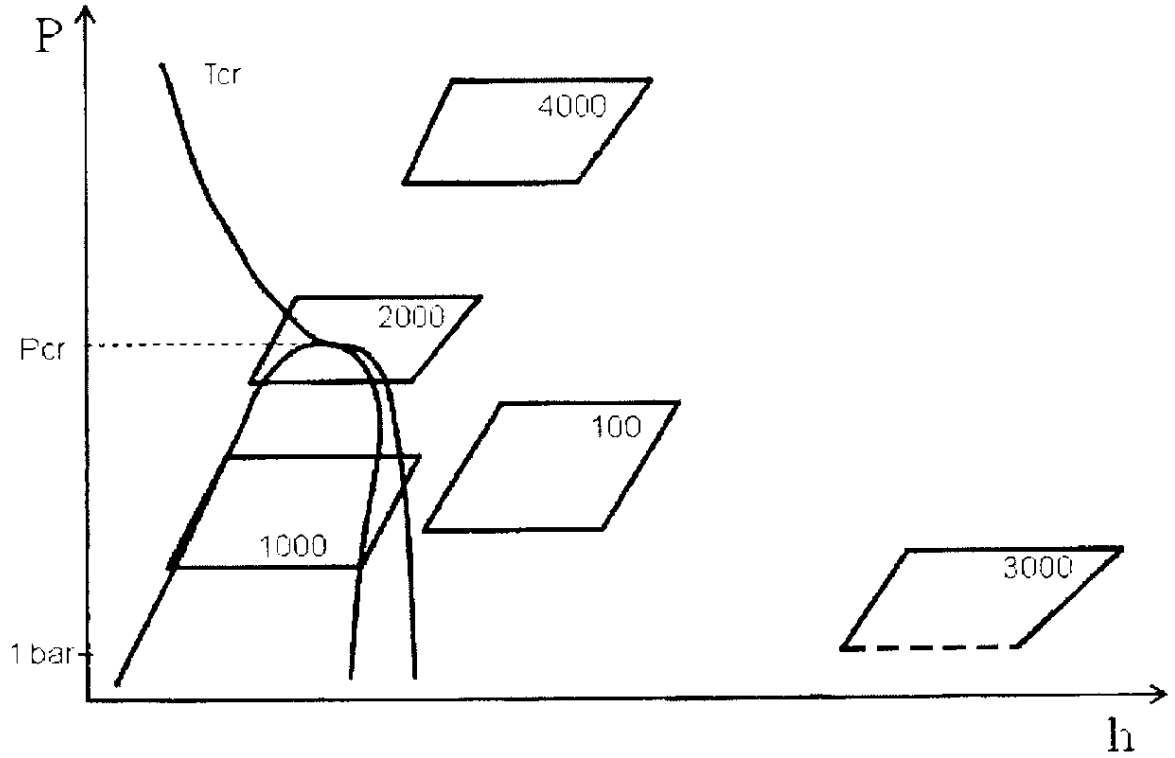
- منشأة لالتقاط الطاقة الحرارية الشمسية،
- من منشأ جيوحراري،
- من أي نوع من المحروقات،
- من المفاعلات أو الاشعاعات النووية،

- من حرارة الارتداد في دورة برايتون ذات درجة حرارة أعلى، في فرعها البارد، من درجة حرارة بؤرة التسخين (9) لهذه الدورة.

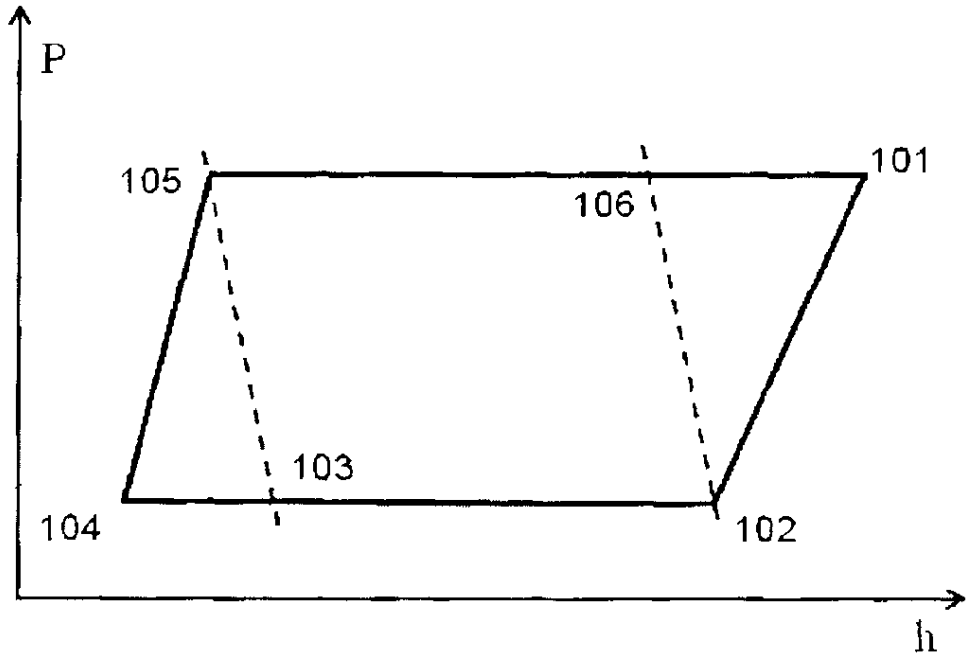
3/1



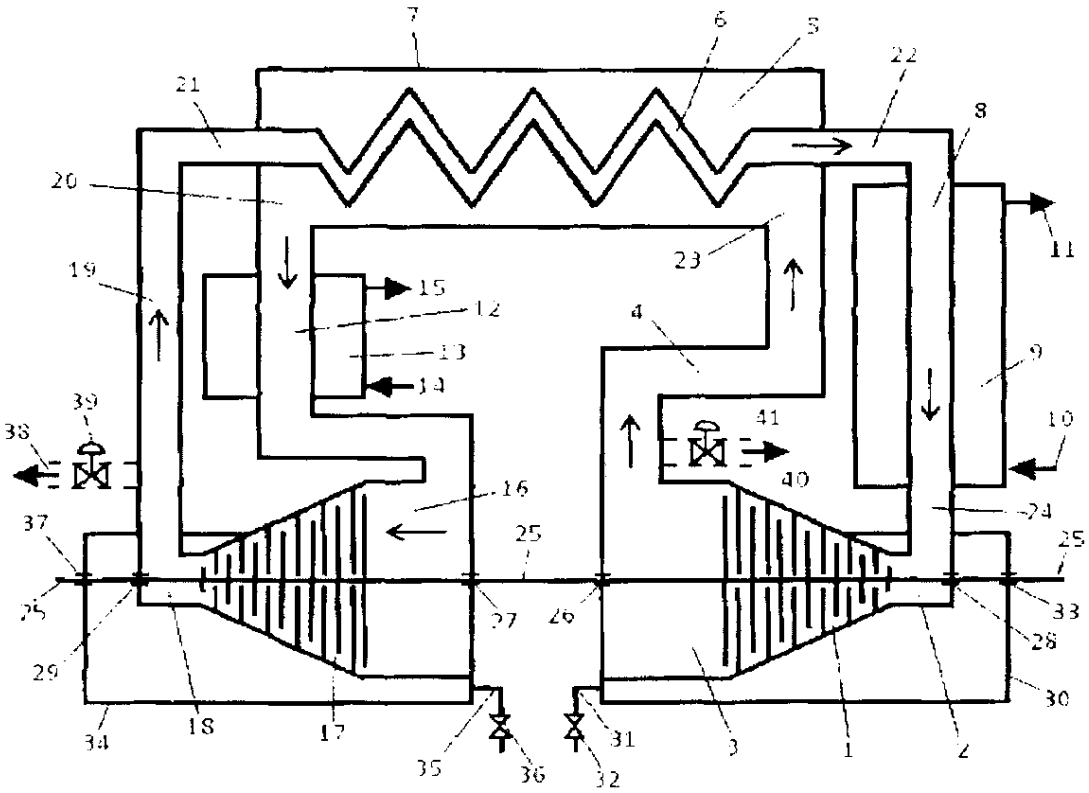
الشكل 1

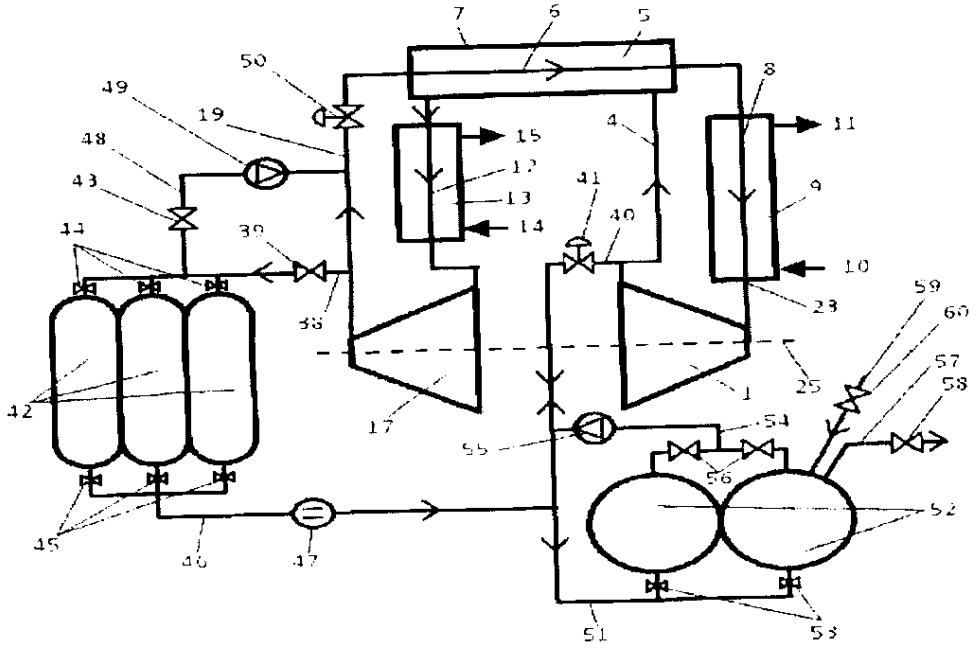


الشكل 2

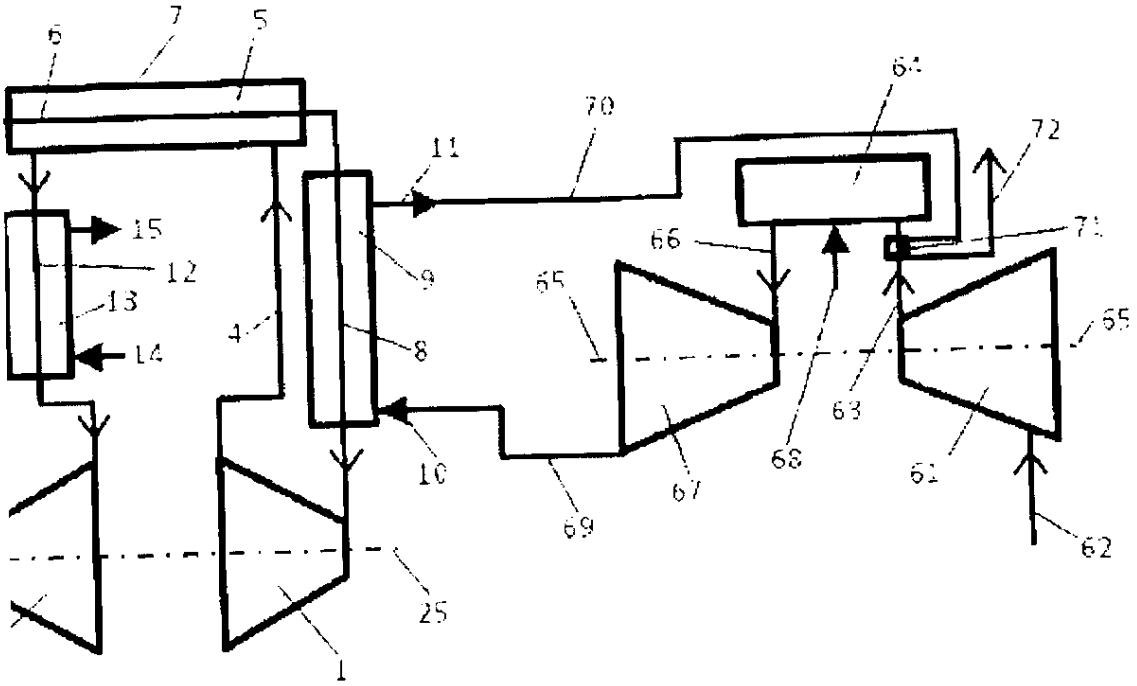

P
105
101
106
103
104
102
h

الشكل 3


7
6
5
22
21
8
20
23
11
19
15
12
4
13
14
9
39
41
10
38
40
16
24
37
25
25
26
27
46
33
28
29
30
34
18
17
35
36
31
32
3
1
2



الشكل 5



الشكل 6