ROYAUME DU MAROC

OFFICE MAROCAIN DE LA PROPRIETE INDUSTRIELLE ET COMMERCIALE
---

(19)

المملكة المغربية

المكتب المغربي للملكية الصناعية و التجارية
---

(12) BREVET D'INVENTION

(11) N° de publication :
MA 27325 A1

(43) Date de publication :
02.05.2005

(51) Cl. internationale :
C10G 9/20; C22C 38/40; C22C 30/00

(21) N° Dépôt :
28048

(22) Date de Dépôt :
18.01.2005

(30) Données de Priorité :
25.07.2002 DE 102 33 961.9

(86) Données relatives à la demande internationale selon le PCT:
PCT/EP2003/004827 08.05.2003

(71) Demandeur(s) :
SCHMIDT+ CLEMENS GMBH+CO.KG., EDELSTAHLWERK KAISERAU, LEPPESTRASSE 2, 51789 LINDLAR (DE)

(72) Inventeur(s) :
WÖLPERT, PETER ; KIRCHHEINER, ROLF ; GANSER, BENNO ; JAKOBI, DIETLINDE

(74) Mandataire :
ABU-SETTA & PARTNERS

(54) Titre : **METHODES ET TUBES A COTELES UTILISES POUR LA DIVISION THERMIQUE DE L'HYDROCARBON**

(57) Abrégé : L'INVENTION CONCERNE UN PROCÉDÉ DE SÉPARATION THERMIQUE D'HYDROCARBURES EN PRÉSENCE DE VAPEUR, SELON LEQUEL UN MÉLANGE EST GUIDÉ À TRAVERS DES TUBES MUNIS D'AILETTES INTÉRIEURES HÉLICOÏDALES, QUI SONT CHAUFFÉS DEPUIS L'EXTÉRIEUR. POUR COMPENSER LA TEMPÉRATURE DANS LA PAROI DES TUBES ET SUR LA SECTION TRANSVERSALE DES TUBES, AINSI QUE POUR RÉDUIRE LE DÉPÔT DE COKE DE PYROLYSE AU NIVEAU DE LA PAROI INTÉRIEURE DES TUBES, UN ÉCOULEMENT SPIROÏDAL EST PRODUIT DANS LE MÉLANGE GAZEUX ET EST INTRODUIT PROGRESSIVEMENT AVEC UN ÉCOULEMENT ESSENTIELLEMENT AXIAL ET AVEC UN ÉCART CROISSANT PAR RAPPORT AUX AILETTES, DANS UNE ZONE NODALE.

طريقة وأنبوب مضلع يستخدمان لشق الهيدروكربونات حرارياً

Method and Ribbed Tube for Thermally Cleaving hydrocarbons

الملخـــص

يتعلـق الاختـــراع الراهـــن بعمليـــة لشـــق الهيدروكربونـــات حراريـاً thermally cleaving hydrocarbons في وجود بخار الماء steam، حيث يُـمرر خليط التلقـيم charge mixture خلال أنابيب tubes مسخنة بشكل خارجي تحتوي على أضلاع داخلية لولبية helical inner ribs، وبجعل درجة الحرارة في جدار الأنبوب وخلال المقطع العرضي cross section للأنبوب متجانسة بشكل أكبر، بالإضافة إلى تقليل ترسب فحم الكوك النـاتج مـن التحلل الحراري pyrolysis coke على الجدار الداخلي للأنبوب، توليـــد تدفـــق دوّامـــي swirling flow في خليط الغاز gas mixture حيـث يتم دمجه تدريجياً في منطقة قلبيـة core zone مع تدفق محوري axial flow في الغالب مع زيادة المســافة نصـف القطريـة radial distance عن الأضلاع ribs.

طريقة وأنبوب مضلع يستخدمان لشق الهيدروكربونات حرارياً

Method and Ribbed Tube for Thermally Cleaving hydrocarbons

مجال الاختراع

يتعلق الاختراع بعملية وأنبوب مضلع ribbed tube يستخدمان لشق الهيدروكربونات حرارياً thermally cleaving hydrocarbons في وجود بخار الماء steam، حيث يُمرر خليط التلقيم charge mixture خلال أنابيب مسخنة بشكل خارجي تحتوي على أضلاع داخلية لولبية helical inner ribs.

خلفية الاختراع

ولقد أثبت أن الأفران الأنبوبية tube furnaces التي يمرر فيها خليط من الهيدروكربون/بخار الماء hydrocarbon/steam خلال مجموعة من الأنابيب المنفردة أو المتعرجة individual or meandering tubes (ملفات شق أنبوبية cleaving tube coils) عند درجة حرارة تزيد عن 750°م (درجة مئوية °C) مصنوعة من سبائك الكروم-النيكل-الفولاذ chromium-nickel-steel المقاومة للحرارة والتي يكون لها مقاومة عالية للأكسدة oxidation أو التقشر scaling ولها مقاومة عالية للكربنة carburization تكون ملائمة للتحلل الحراري pyrolysis للهيدروكربونات عند درجات حرارة مرتفعة (مشتقات الزيت الخام crude oil derivatives). وتشتمل الملفات الأنبوبية على مقاطع أنبوبية مستقيمة، رأسية الدوران متصلة مع بعضها البعض عن طريق أكواع أنبوبية على شكل حرف يو U-shaped tube bends أو تكون مرتبة بشكل متواز بالنسبة لبعضها البعض؛ ويتم تسخينها عادة بمساعدة حارقات جانبية side-wall burners وفي بعض الحالات أيضاً بمساعدة حارقات سفلية bottom burners وبذلك يكون لها ما يعرف بجانب فاتح light side، يواجه الحارقات، وما يعرف بجانب غامق dark side، يحيد بـ 90° بالنسبة لها، أي يدور باتجاه

2 MAI 2005

صفوف الأنابيب. ويزيد متوسط درجات حرارة الفلز المتشكل منه الأنبوب Tube Metal temperature (TMT) في بعض الحالات عن 1000°م.

وتعتمد مدة صلاحية استخدام أنابيب الشق إلى حد كبير جداً على مقاومة التزحف creep resistance ومقاومة الكربنة، وكذلك على معدل التكويك coking rate، لمادة الأنبوب. ويتمثل عامل حاسم لمعدل التكويك، أي تشكيل طبقة من الرواسب الكربونية carbon deposits (فحم الكوك coke الناتج من التحلل الحراري) على الجدار الداخلي للأنبوب، بالإضافة إلى نوع الهيدروكربونات hydrocarbons المستخدمة، في درجة حرارة الغاز المستخدم للشق الموجود في منطقة الجدار الداخلي وما يُعرف بشدة التشغيل، حيث يخفي تأثير ضغط النظام system pressure وزمن البقاء residence time في النظام الأنبوبي على معدل إنتاج الإثيلين ethylene. وتضبط شدة التشغيل على أساس متوسط درجة حرارة مخرج الغازات المستخدمة للشق (مثلاً 850°م). وكلما زادت درجة حرارة الغاز في المنطقة المجاورة للجدار الداخلي للأنبوب عن درجة الحرارة هذه، كلما زاد مدى تشكل طبقة فحم الكوك coke الناتج من التحلل الحراري، ويسمح إجراء عزل لهذه الطبقة بزيادة درجة حرارة الفلز المتشكل منه الأنبوب بشكل إضافي. وعلى الرغم من أن سبائك الكروم-النيكل-الفولاذ chromium-nickel-steel alloys التي تحتوي على كربون carbon بنسبة تبلغ 0.4%، كروم chromium بنسبة تزيد عن 25٪ ونيكل nickel بنسبة تزيد عن 20%، على سبيل المثال كروم chromium بنسبة 35%، نيكل nickel بنسبة 45% وإذا كان مناسباً نيوبيوم niobium بنسبة 1%، حيث تستخدم بصفتها مادة الأنبوب لها مقاومة عالية للكربنة، فإن الكربون carbon ينتشر نحو الجدار الأنبوبي مع نقص في طبقة الأكسيد oxide layer، حيث يؤدي ذلك إلى كربنة ملموسة بنسب كربون carbon تتراوح من 1% إلى 3% على أعماق جدار wall depth تتراوح من 0.5 إلى 3 ملم mm. ويُصاحب هذا تقصف embrittlement-ملموس في مادة الأنبوب، مع خطر تشكل شقوق في حالة تراوح الحمولات الحرارية، خاصة عندما يتم تشغيل الفرن وإيقافه.

ولتكسير الرواسب الكربونية (تكويك) المترسبة على الجدار الداخلي للأنبوب، يكون من الضروري إيقاف عملية الشق بين الحين والآخر وحرق فحم الكوك coke الناتج من التحلل

الحراري بمساعدة خليط من بخار الماء/الهواء. وهذا يتطلب إيقاف العملية لمدة تبلغ 36 ساعة، وبذلك يتم الحصول على تأثير عكسي ملموس على النواحي الاقتصادية للعملية.

ومن المعروف كذلك من براءة الاختراع البريطانية رقم 796 969 استخدام أنابيب الشق التي تحتوي على أضلاع داخلية. وبالرغم من أنه ينتج عن الأضلاع الداخلية من هذا النوع مساحة سطحية داخلية internal surface area، تكون عبارة عن نسبة مئوية صغيرة جيدة، على سبيل المثال 10%، أو أكبر، مع تحسن مقابل في انتقال الحرارة، فإنها تقترن كذلك بعيب يتمثل في فقدان متزايد ملموس في الضغط بالمقارنة مع أنبوب أملس smooth tube، بسبب الاحتكاك friction عند السطح الداخلي للأنبوب الموسع. ويتطلب الفقدان المتزايد في الضغط ضغط أعلى للنظام، حيث يقوم بصورة حتمية بتغيير زمن البقاء وله تأثير عكسي على معدل الإنتاج. ويتمثل عامل إضافي في أنه لا يمكن تفريز مواد الأنبوب المعروفة التي تحتوي على نسب عالية من الكربون carbon والكروم chromium بواسطة التشكيل على البارد cold-working، على سبيل المثال، السحب على البارد cold-drawing. ولها عيب يتمثل في أن تشوهها يقل بشكل كبير عندما تزيد مقاومتها للسخونة. وأدى هذا إلى درجات الحرارة العالية للفلز المتشكل منه الأنبوب، على سبيل المثال، درجة حرارة لا تزيد عن 1050°م، حيث تكون مرغوبة بالنسبة لمعدل إنتاج الإثيلين ethylene، مما يتطلب استخدام أنابيب مصبوبة بالطرد المركزي centrifugally cast tubes. غير أنه، نظراً لأنه لا يمكن صنع الأنابيب المصبوبة بالطرد المركزي إلا بحيث تحتوي على جدار أسطواني، فإنه يلزم عمليات تشكيل خاصة، على سبيل المثال إزالة المادة بواسطة التسوية الإلكتروليتية electrolytic machining أو عملية تشكيل باللحام shaping welding process إذا رُغبَ في إنتاج أنابيب مضلعة داخلياً.

وبالنظر إلى هذه الخلفية، يقوم الاختراع على مشكلة تحسين النواحي الاقتصادية لشق الهيدروكربونات حرارياً في أفران أنبوبية ذات أنابيب مسخنة بشكل خارجي تحتوي على أضلاع داخلية لولبية.

الكشف عن الاختراع

ويتم تحقيق هذا الهدف بواسطة عملية حيث يتم توليد تدفق دوّامي swirling flow في المنطقة المجاورة القريبة لأضلاع أنبوب مصبوب بالطرد المركزي مفضل ويتم تحويل التدفق

الدوّامي هذا إلى منطقة قلبية core zone ذات تدفق محوري في الغالب مع زيادة المسافة نصف القطرية من الأضلاع. ويكون الانتقال بين المنطقة الخارجية ذات التدفق الدوّامي والمنطقة القلبية ذات التدفق المحوري في الغالب تدريجي، على سبيل المثال مكافئي parabolic.

وفي العلمية وفقاً للاختراع، يَسحب التدفق الدوّامي اضطراب الفصل عند جوانب الأضلاع rib flanks، بحيث لا يعاد تدوير الاضطراب موضعياً في صورة تدفق دائر متواصل إلى تجاويف الأضلاع rib valleys. وبالرغم من المسافات الطويلة الواضحة المغطاه بالجسيمات particles خلال المسارات الحلزونية، يكون متوسط زمن البقاء أقل منه في أنبوب أملس، وعلاوة على ذلك، أكثر تجانساً خلال المقطع العرضي (انظر الشكل 7). ويُعزز هذا بواسطة السرعة الكلية العالية في الأنبوب المفرّز بواسطة الدوامة (الجانبية 3) بالمقارنة مع الأنبوب الذي يحتوي على أضلاع مستقيمة (الجانبية 2). ويتم ضمان هذا بصفة خاصة إذا كان التدفق الدوّامي في منطقة الأضلاع يدور أو إذا كانت الأضلاع تدور بزاوية تتراوح من 20 إلى 40°، على سبيل المثال 30°، يفضل زاوية تتراوح من 25° إلى 32.5°، بالنسبة لمحور الأنبوب.

وفي العملية وفقاً للاختراع، يتم تعويض الإمداد الحراري heat supply، الذي يختلف بصورة حتمية خلال محيط الأنبوب tube circumference بين الجانب الفاتح والجانب الغامق، في جدار الأنبوب وداخل الأنبوب، وتتشتت الحرارة بسرعة داخل المنطقة القلبية. ويُصاحب هذا انخفاض خطر فرط التسخين overheating الموضعي لغاز العملية عند جدار الأنبوب، وينتج عن ذلك تشكل فحم الكوك coke الناتج من التحلل الحراري. وعلاوة على ذلك، يكون الحمل الحراري على مادة الأنبوب أقل بسبب تعويض درجة الحرارة بين الجانب الفاتح والجانب الغامق، مما يؤدي إلى زيادة مدة صلاحية الاستخدام. وأخيراً، في العملية وفقاً للاختراع، تجعل كذلك درجة الحرارة متجانسة بدرجة أكبر خلال المقطع العرضي للأنبوب، ومما يؤدي إلى معدل إنتاج محسن للأولفين olefin. ويكمن سبب ذلك في أنه بدون التعويض نصف القطري في درجة الحرارة وفقاً للاختراع داخل الأنبوب، قد يحدث فرط في الشق

over-cleaving عند جـدار الأنبـوب السـاخن وقد يحدث إعـادة اتحاد recombination لنواتج الشق في مركز الأنبوب.

وعلاوة على ذلك، تتشكل طبقة تدفق صفحي laminar flow layer، تتميز بتدفقات مضطربة، مع انتقال أقل بشكل كبير للحرارة في حالة أنبوب أملس وبمدى كبير في حالة جانبيات الأضلاع التي لها محيط داخلي يزيد بنسبة أكبر من 5٪، على سبيل المثال 10٪، بواسطة الأضلاع. وتؤدي هذه التدفقات الصفحية إلى التشكل المتزايد لفحم الكوك coke الناتج من التحلل الحراري، وأيضاً موصلية حرارية thermal conductivity ضعيفة. ويتطلب كل من الطبقتين تزويد أكبر للحرارة أو سعة أكبر للحارقة burner. ويؤدي هذا إلى زيادة درجة حرارة الفلز المتشكل منه الأنبوب (TMT) وبالتالي يقلل من مدة صلاحية استخدامه.

ويتجنب الاختراع هذا بفضل حقيقة أن المحيط الداخلي للجانبية يمثل نسبة تبلغ على الأغلب 5٪ تقريباً، على سبيل المثال 4٪ أو حتى 3.5٪، بالنسبة لمحيط حلقة الغلاف envelope circle التي تلامس تجاويف الأضلاع. غير أنه، قد يكون المحيط الداخلي كذلك أقل بنسبة لا تزيد عن 2٪ بالمقارنة مع حلقة الغلاف. وبعبارة أخرى، يمثل محيط الجانبية النسبي نسبة تتراوح على الأغلب من 1.05 إلى 98٪ من محيط حلقة الغلاف. وفقاً لذلك، تتراوح نسبة الاختلاف في مساحة أنبوب الجانبية وفقاً للاختراع، أي مساحة سطحه الداخلي الممتدة، بالنسبة لأنبوب أملس له قطـر حلقة الغلاف، علـى الأغلـب من +5٪ إلى -2٪ أو من 1.05 إلى 0.98٪ ضرب مساحة الأنبوب الأملس.

وتسمح جانبية الأنبوب وفقاً للاختراع بكثافة density أقل للأنبوب (كغم/م kg/m) بالمقارنة مع أنبوب مضلع حيث يزيد المحيط الداخلي للجانبية عن 10٪ على الأقل بالمقارنة مع محيط حلقة الغلاف. ويوضح هذا بإجراء مقارنة بين أنبوبين لهما نفس القطر الهيدرولي hydraulic diameter وبالتالي نفس الفقدان في الضغط ونفس النتيجة الحرارية.

وتتمثل ميزة إضافيـة لمحيط الجانبية وفقاً للاختراع (محيط الجانبية النسـبي) بالنسـبة لمحيط حلقة الغلاف في التسخين الأسرع لغاز التلقيم عند درجة حرارة أقل للفلز المتشكل منه الأنبوب.

ويقلل التدفق الدوّامي وفقاً للاختراع بشـــكل ملموس جداً حجم الطبقة الصفحية laminar layer؛ وعلاوة على ذلك، يقترن بمتجه سرعة velocity vector يوجـــه نحو مركز الأنبوب، حيث يقلل من زمن بقاء شقات الشق cleaving radicals و/أو منتجات الشق في جدار الأنبوب الساخن وتحللها الكيميائي والحفزي chemical and catalytic decomposition لتشكيل فحم الكوك الناتج من التحلل الحراري.

وبالإضافة إلى ذلك، يتم تعويض الاختلاف في درجة الحرارة بين تجاويف الأضلاع والأضلاع، حيث تؤخذ بعين الاعتبار في حالة الأنابيب المفرّزة داخلياً التي تحتوي على أضلاع عالية، بواسطة التدفق الدوّامي وفقاً للاختراع. وهذا يؤدي إلى زيادة الزمن بين عمليتي إزالة فحم الكوك coke اللازمتين. وفي حالة عدم وجود التدفق الدوّامي وفقاً للاختراع، ينتج اختلاف في درجة الحرارة يؤخذ بعين الاعتبار بين ذروات الأضلاع rib peaks وقاعدة تجاويف الأضلاع. ويكون زمن بقاء منتجات الشق التي تميل للتحول إلى فحم الكوك coke أقصر في حالة أنابيب الشق المزودة بأضلاع داخلية لولبية. ويعتمد هذا على طبيعة الأضلاع في المحيطات المنفردة.

الوصف التفصيلي

وفي المخطط:

يبين المنحنى العلـــوي: الجانبية 6: خطوة مقدارها 16°

يبين المنحنى الوسطي: الجانبية 3: خطوة مقدارها 30°

يبين المنحنى الســـفلي: الجانبية 4: 3 أضلاع بخطوة مقدارها 30°.

وتبين المنحنيات بشكل واضح أن السرعة المحيطية العالية للجانبية 6 ذات الأضلاع التي يبلغ ارتفاعها 4.8 ملم تـــُستهلك ضمن تجاويف الأضلاع، بينما تخترق السرعة المحيطية للجانبية وفقاً للاختراع التي تحتوي على ضلع يبلغ ارتفاعه 2 ملم فقط قلب التدفق. وبالرغم من أن السرعة المحيطية للجانبية 4 التي تحتوي فقط على 3 أضلاع تكون مساوية تقريباً، إلا أنها لا تسبب أي تسريع حلزوني في التدفق القلبي.

ووفقاً للمنحنيات المبينة في المخطط المعروض في الشكل 2، تسبب الجانبية وفقاً للاختراع تسريع حلزوني في تجاويف الأضلاع (الجزء العلوي من المنحنى) يغطي مساحات

واسعة من المقطع العرضي للأنبوب وبذلك يكون مسؤول عن مجانسة درجة الحرارة في الأنبوب. وتضمن السرعة المحيطية المنخفضة عند ذروات الأضلاع (الجزء السفلي من المنحنى)، أيضاً، عدم حدوث اضطراب وتدفقات خلفية back-flows.

ويبين الشكل 3 ثلاثة من أنابيب الاختبار، بما في ذلك بياناتها، في المقطع العرضي؛ وتشمل هذه الأنابيب الجانبية 3 وفقاً للاختراع. ويشير كل من المخططات إلى جانبية درجة الحرارة خلال نصف قطر الأنبوب على الجانب الغامق والجانب الفاتح. وتظهر مقارنة المخططات الاختلاف الأقل في درجة الحرارة بين جدار الأنبوب ومركز الأنبوب ودرجة الحرارة المنخفضة للغاز عند جدار الأنبوب في حالة الجانبية 3 وفقاً للاختراع.

ويضمن التدفق الدوّامي وفقاً للاختراع أن يقل التراوح في درجة حرارة الجدار الداخلي خلال محيط الأنبوب، أي بين الجانب الفاتح والجانب الغامق، عن 12°م، حتى لو تم تسخين الملفات الأنبوبية tube coils، التي ترتب عادة في صفوف متوازية، لفرن أنبوبي أو التأثير عليها بواسطة غازات الاحتراق بمساعدة حارقات ذات جدران جانبية فقط على الجانبين المتقابلين وبذلك يكون لكل من الأنبوبين جانب فاتح، يواجه الحارقات، وجانب غامق، يحيد بـ 90° بالنسبة له. ويؤدي متوسط درجة حرارة الفلز المتشكل منه الأنبوب، أي الفرق في درجة حرارة الفلز المتشكل منه الأنبوب على الجانب الفاتح والجانب الغامق، إلى إجهادات stresses داخلية وبالتالي يحدد مدة صلاحية استخدام الأنابيب. ولذلك، ينتج الانخفاض في متوسط درجة حرارة الفلز المتشكل منه الأنبوب لأنبوب وفقاً للاختراع يحتوي على 8 أضلاع بخطوة قياسها 30°، قطر داخلي للأنبوب يبلغ 38.8 ملم وقطر خارجي للأنبوب يبلغ 50.8 ملم، أي اختلاف في الارتفاع بين تجاويف الأضلاع وذروات الأضلاع يبلغ 2 ملم عند خطوة قياسها 11° بالمقارنة مع أنبوب أملس له نفس القطر، على أساس متوسط مدة صلاحية استخدام تبلغ 5 سنوات، يمكن ملاحظته من المخطط المعروض في الشكل 4، عند درجة حرارة تشغيل تبلغ 1050°م، بزيادة محسوبة في مدة صلاحية الاستخدام تبلغ 8 سنوات تقريباً.

ولقد وجد أن توزيع درجة الحرارة بين الجانب الفاتح والجانب الغامق للجانبيات الثلاث المبينة في الشكل 3 يوجد في المخطط المبين في الشكل 5. ويمكن ملاحظة المستوى

المنخفض لمنحنى درجة الحرارة للجانبية 3 بالمقارنة مع الأنبوب الأملس (الجانبية صفر) ومدى التراوح الأضيق الملموس لمنحنى الجانبية 3 بالمقارنة مع منحنى الجانبية 1.

ويتم تحقيق توزيع ملائم بصفة خاصة لدرجة الحرارة إذا امتدت خطوط تساوي درجة الحرارة isotherms على شكل حلزوني من الجدار الداخلي للأنبوب إلى قلب التدفق.

وينتج توزيع أكثر تجانس لدرجة الحرارة خلال المقطع العرضي بصفة خاصة إذا زادت السرعة المحيطية خلال مترين إلى 3 أمتار ثم بقيت ثابتة خلال الطول الكلي للأنبوب.

وبالنظر لتحقيق معدل إنتاج مرتفع للأولفين olefin باستخدام طول قليل نسبياً للأنبوب، ينبغي إجراء العملية وفقاً للاختراع بكيفية حيث يزيد عامل تجانس درجة الحرارة temperature homogeneity factor خلال المقطع العرضي وعامل تجانس درجة الحرارة المستخدم على القطر الهيدرولي عن 1 بالمقارنة مع عامل التجانس لأنبوب أملس ($H_{G\varnothing}$). وفي هذا السياق، يتم تعريف عوامل التجانس كما يلي:

$$H_{G\varnothing}[-]H_{p\varnothing} = \Delta T_0.d_x/\Delta T_x.d_0$$

ويمكن تحقيق شكل التدفق وفقاً للاختراع الذي يشمل تدفق قلبي وتدفق دوّامي باستخدام أنبوب مضلع حيث تتراوح زاوية الجنب flank angle للأضلاع، التي تكون في كل حالة متواصلة خلال طول مقطع أنبوب، أي الزاوية الخارجية بين جوانب الأضلاع ونصف قطر الأنبوب، من 16° إلى 25°، يفضل من 19° إلى 21°. وتضمن زاوية جنب من هذا النوع، بصفة خاصة في توليفة مع خطوة ضلع يتراوح مقدارها من 20° إلى 40°، على سبيل المثال من 22.5° إلى 32.5°، أن ما ينتج في تجاويف الأضلاع لا يكون تدفق دوّامي متواصل بشكل أكبر أو بشكل أقل حيث يعود إلى تجاويف الأضلاع التي تقع خلف جوانب الأضلاع ويؤدي إلى تشكيل "تيارات دائرية twisters" غير مرغوبة في تجاويف الأضلاع. وفي الواقع، ينفصل الاضطراب المتشكل في تجاويف الأضلاع عن جوانب الأضلاع ويسحب بواسطة التدفق الدوّامي. وتسرِّع طاقة التدويم swirl energy المستحثة بواسطة الأضلاع جسيمات الغاز gas particles وتؤدي إلى سرعة كلية أعلى. وهذا يؤدي إلى انخفاض في درجة حرارة الفلز المتشكل منه الأنبوب، وكذلك يجعل الأخير أكثر تجانساً، بالإضافة إلى جعل درجة الحرارة وزمن البقاء خلال المقطع العرضي للأنبوب أكثر تجانساً.

ويمكن ملاحظة طبيعة الأنبوب المضلع وفقاً للاختراع من توضيح جزء من أنبوب في الشكل 6 والوسائط المميزة المرافقة

- القطر الهيدرولي Dh بوحدة ملم، $Ri \leq Dh/2$
- زاوية الجنب β
- ارتفاع الضلع H
- نصف قطر حلقة الغلاف $Ra = Ri + H$ و $Da = 2 \times Ra$
- زاوية المركز α
- نصف قطر الانحناء $R = Ra (\sin \alpha /2 \sin \beta + \sin \alpha)$
- محيط حلقة الغلاف $2\pi Ra$
- الزاوية في المثلث مائل الزوايا $\gamma = 180-(\alpha + \beta)$
- نصف القطر الداخلي $Ri = 2R (\sin \gamma/\sin \alpha) - R$
- ارتفاع الضلع $H = Ra - Ri$
- محيط الجانبية $Up = 2 \times$ عدد الأضلاع $\times \pi R/180 (2\beta + \alpha)$
- المساحة السطحية للضلع F_R
- مساحة حلقة الغلاف $Fa = \pi Da^2/4$
- مساحة الحلقة الداخلية $F_i = \pi . Di$
- مساحة الجانبية ضمن حلقة الغلاف $F_R = F_p$. عدد الأضلاع
- محيط الجانبية $Up = (1.05 \text{ to } 0.98) . 2\pi Ra$

ويمكن أن يكون للأضلاع وتجاويف الأضلاع التي تقع بين الأضلاع تصميم متناظر مرآوياً mirror-symmetrical design في المقطع العرضي وتجاور بعضها البعض أو قد تشكل خط موجي wave line له في كل حالة نفس أنصاف أقطار الانحناء. ثم تنتج زاوية الجنب بين مماسات tangents نصفي قطر الانحناء عند نقطة التماس ونصف قطر الأنبوب. وفي هذه الحالة، تكون الأضلاع قليلة العمق نسبياً؛ ويتم مطابقة ارتفاع الضلع وزاوية الجنب مع بعضهما البعض بحيث يزيد القطر الهيدرولي للجانبية من النسبة 4 × المقطع العرضي الواضح/محيط الجانبية عن أو يساوي الحلقة الداخلية للجانبية.

وبذلك يقع القطر الهيدرولي في الجزء الداخلي الثالث لارتفاع الجانبية. وبناء على ذلك، يزيد ارتفاع الضلع وعدد الأضلاع كلما زاد القطر، بحيث يُحافظ على التدفق الدوّامي في الاتجاه والشدة المطلوبين لأداء الجانبية.

وتنتج سرعة تدفق كبيرة (الشكل 2) بين الأضلاع أو في تجاويف الأضلاع، مما يؤدي إلى تأثير ذاتي التنظيف self-cleaning effect، أي انخفاض في مقادير فحم الكوك coke المترسب الناتج من التحلل الحراري.

وإذا تم إنتاج الأضلاع بواسطة اللحام المتزايد أو اللحام المستخدم للتكسية بواسطة أنبوب مصبوب بالطرد المركزي، يبقى جدار الأنبوب بين الأضلاع المنفردة كما هو بصفة جوهرية، بحيث تقع تجاويف الأضلاع على حلقة مشتركة تقابل المحيط الداخلي للأنبوب المصبوب بالطرد المركزي.

ولقد أظهرت التجارب-بغض النظر عن القطر الداخلي للأنابيب- أن مجموع أضلاع يتراوح عددها من 8 إلى 12 يكون كافياً لتحقيق شكل التدفق وفقاً للاختراع.

وفي حالة الأنبوب المضلع وفقاً للاختراع، تتراوح نسبة قيم خارج قسمة quotients معاملات انتقال الحرارة heat transfer coefficients Q_R/Q_0 إلى خارج قسمة قيم الفقدان في الضغوط $\Delta P_R/\Delta P_0$ في الاختبار المائي water test، بتطبيق وملاحظة قوانين التماثل واستخدام أرقام رينولدز Reynolds numbers المحددة لخليط من النفثا/بخار الماء naphtha/steam mixture، بشكل مفضل من 1.4 إلى 1.5، حيث يشير R إلى أنبوب مضلع و 0 يشير إلى أنبوب أملس.

وتوضح أفضلية الأنبوب المضلع وفقاً للاختراع (الجانبية 3) بالمقارنة مع أنبوب أملس (الجانبية صفر) وأنبوب مضلع يحتوي على 8 أضلاع متوازية (الجانبية 1)، حيث يبلغ البعد نصف القطري بين تجاويف الأضلاع وذروات الأضلاع 4.8 ملم، من خلال البيانات المعروضة في الجدول أدناه. وتحتوي جميع الأنابيب المضلعة على 8 أضلاع وعلى نفس حلقة الغلاف.

الجانبيـــة	صفر	1	3
درجة حرارة المائع عند 9950 ملم في المركز T_m [°م]	843.6	848.1	843.0
درجة حرارة المائع عند 9950 ملم عند الحافة T_r [°م]	888.9	894	874.8
مدى درجة الحرارة عند 9950 ملم $\Delta T = T_r - T_m$ [°م]	45.3	45.9	31.8
عامل التجانس للأنبوب الأملس H عند $H_t = \Delta T_g/\Delta T_k$	1	0.9869281	1.4245283
القطر الهيدرولي d_h [م]	0.0380	0.0256	0.0344
عامل التجانس المستخدم على القطر الهيدرولي على أساس الأنبوب الأملس $H_{t\varnothing}$: $H_{t\varnothing} = \Delta T_0 \cdot d_x/\Delta T_x \cdot d_0$	1	0.8477193	1.3420556
تصنيف H:	2	2	1

وفي هذا السياق، يُـعرَّف القطر الهيدرولي كما يلي:

$D_{hydr} = 4 \times$ (المقطع العرضي الواضح)/المحيط الداخلي؛

ويقابل بشكل مفضل القطر الداخلي لأنبوب أملس مشابه ثم ينتج عنه عامل تجانس يبلغ 1.425.

وفي الاختبار المائي، نتج عن الأنبوب المضلع وفقاً للاختراع انتقال للحرارة (Q_R) أعلى بعامـــل بلغ 2.56 عن الأنبوب الأملـــس، مع فقدان في الضغط (ΔP_R) أعلـــى بعامل بلغ 1.76 فقط.

ويقارن الشكل 7 ثلاثة أنابيب مختلفة للجانبية، حيث يشتمل على أنبوب وفقاً للاختراع يحتوي على 8 أضلاع بخطوة لكل حالة بلغ مقدارها 30°، أنبوب يحتوي على جدار داخلي أملس (أنبوب أملس). وتم تحديد القطر الهيدرولي، السرعة المحورية، زمن البقاء والفقدان في الضغط لكل مقطع عرضي.

وكانـــت البـــيانـــات الأوليـــة المستخدمـــة عـــبارة عـــن الإنتاجات الكمـــية quantitative throughputs في أنبوب أملس تشغيلي له قطر داخلي بلغ 38 ملم، يكون مطابقاً للقطر الهيدرولي. وباستخدام قوانين التماثل (نفس أرقام رينولدز)، تم تحويل هذه البيانات من خلال الحساب لتدفئة الماء وتم استخدامها كأساس للاختبارات (انظر نسبة قيم خارج قسمة

انتقال الحرارة والفقدان في الضغط للاختبارات المجراة باستخدام الماء وعامل التجانس المستخدم للحساب باستخدام الغازات).

وتَنتج الجانبيات مختلفة السرعة من نفس الإنتاجيات الكمية عند أقطار هيدرولية مختلفة (علاقة عكسية).

وتوضح مقارنة سرعات الجانبيتين 2 و 3، حيث تكونا متطابقتين في المقطع العرضي، السرعة المحسنة، التسريع وزمن البقاء في الأنابيب وفقاً للاختراع (الجانبية 3). وبالنسبة لنفس القطر الهيدرولي، يتسبب مكون السرعة velocity component في الاتجاه المحيطي، الناتج من التدويم المستحدث بواسطة الأضلاع، في انفصال التدفق عن جدار الأنبوب ويستحث سرعة متزايدة لولبياً خلال المقطع العرضي الكامل.

ويقوم التدفق الحلزوني الموجه بإدخال الحرارة من جدار الأنبوب إلى التدفق وبذلك يقوم بتوزيع الحرارة بشكل منتظم بدرجة أكبر مقارنة مع تدفق مضطرب غير موجه عادي (أنبوب أملس، الجانبيتان 1 و 2). وينطبق نفسه على زمن بقاء الجسيمات. ويقوم التدفق الموجه الحلزوني بتوزيع الجسيمات بشكل منتظم بدرجة أكبر خلال المقطع العرضي، بينما يقلل التسريع عند جوانب الجانبية من متوسط زمن البقاء. ويَنتج الفقدان الكبير في الضغط في الجانبية 3 من السرعة المحيطية. وفي حالة الجانبية 1، يكمن السبب في التطبيق constriction الملموس للتدفق والفقدان في الاحتكاك عند السطح الداخلي الكبير للجانبية.

وبالاعتماد على المادة، يمكن إنتاج الأنابيب المضلعة وفقاً للاختراع، على سبيل المثال، من أنبوب مصبوب بالطرد المركزي بواسطة طرفي أنبوب يحتوي على أضلاع متوازية محورياً تُدار بالنسبة لبعضها البعض، أو بواسطة الجانبية الداخلية الناتجة بتشويه الأنبوب المصبوب بالطرد المركزي، على سبيل المثال، بواسطة التطريق الساخن hot forging، السحب على الساخن hot drawing أو التشكيل على البارد cold-working بواسطة أداة تفريز profiling tool، على سبيل المثال شِياق متحرك flying mandrel أو قضيب شِياق mandrel rod يحتوي على جانبية خارجية تقابل الجانبية الداخلية للأنبوب.

ويعرف عدد من الآلات المختلفة المستخدمة في القطع للجانبية الداخلية للأنابيب، على سبيل المثال من براءة الاختراع الألمانية رقم 280 23 195. وتكون هذه الآلات مناسبة أيضاً لإنتاج أنبوب مضلع وفقاً للاختراع.

وفي حالة التشكيل على الساخن hot-forming، ينبغي ضبط درجة حرارة التشوه deformation temperature بحيث يتم تحطيم الحبيبة دقيقة البنية microstructural grain جزئياً في منطقة السطح الداخلي، ولذلك يعاد بلورتها عند مرحلة لاحقة تحت تأثير درجة حرارة التشغيل. وينتج عن هذا بنية دقيقة ناعمة الحبيبات fine-grained microstructure تسمح بالانتشار diffusion السريع للكروم chromium، السليكون silicon و/أو الألومنيوم aluminum خلال مادة الأساس الأوستنيتية austenitic matrix للسطح الداخلي للأنبوب، حيث تتراكم طبقة واقية أكسيدية بسرعة فيما بعد.

ويمكن كذلك إنتاج الأضلاع وفقاً للاختراع بواسطة اللحام المتزايد؛ وفي هذه الحالة، يكون من غير الممكن تشكيل قاعدة ضلع منحنية بين الأضلاع المنفردة، ولكن يُحافظ على الجانبية الأصلية للجدار الداخلي للأنبوب بصفة جوهرية هناك.

وينبغي أن يكون للسطح الداخلي للأنبوب وفقاً للاختراع أقل خشونة roughness ممكنة؛ وبذلك يمكن جعله أملساً، على سبيل المثال صقله ميكانيكياً mechanically polished أو تسويته إلكتروليتياً electrolytically levelled.

وتتمثل مواد ملائمة للأنابيب تستخدم في الوحدات الصناعية لإنتاج الإثيلين ethylene في سبائك الحديد iron و/أو النيكل nickel التي تحتوي على كربون carbon بنسبة تتراوح من 0.1٪ إلى 0.5٪، كروم chromium بنسبة تتراوح من 20 إلى 35٪، نيكل nickel بنسبة تتراوح من 20 إلى 70٪، سليكون silicon بنسبة لا تزيد عن 3٪، نيوبيوم niobium بنسبة لا تزيد عن 1٪، تنجستون tungsten بنسبة لا تزيد عن 5٪ وعناصر مضافة من الهفنيوم hafnium، التيتانيوم titanium، الفلزات الترابية النادرة rare earths أو الزركونيوم zirconium، في كل حالة بنسبة لا تزيد عن 0.5٪، وألومنيوم aluminum بنسبة لا تزيد عن 6٪.

عناصر الحماية

1 1- عملية لشق الهيدروكربونات حرارياً thermally cleaving hydrocarbons في وجود بخار
2 الماء steam، حيث يُمرر خليط التلقيم charge mixture خلال أنابيب tubes مسخنة
3 بشكل خارجي تحتوي على أضلاع داخلية لولبية helical internal ribs، تتميز في أنه
4 يتم توليد تدفق دوّامي swirling flow في المنطقة المجاورة القريبة immediate vicinity
5 للأضلاع ويتم تحويله إلى منطقة قلبية core zone بواسطة تدفق محوري axial flow في
6 الغالب مع زيادة المسافة نصف القطرية radial distance من الأضلاع ribs.

1 2- العملية وفقاً لعنصر الحماية 1، تتميز في أن التدفق الدوّامي يسحب اضطراب الفصل
2 detaching turbulence عند جوانب الأضلاع.

1 3- العملية وفقاً لعنصر الحماية 1، تتميز في أن السرعة المحيطية circumferential velocity
2 لتدفق الغاز في تجاويف الأضلاع rib valleys تكون أكبر بالمقارنة مع سرعتها عند
3 ذروات الأضلاع rib peaks.

1 4- العملية وفقاً لأحد عناصر الحماية 1 إلى 3، تتميز في أن التدفق الدوّامي عند الأضلاع
2 يدور عند زاوية angle تتراوح من 20° إلى 40°، يفضل عند زاوية تتراوح من
3 22.5° إلى 32.5°، بالنسبة لمحور الأنبوب.

1 5- العملية وفقاً لأحد عناصر الحماية 1 إلى 4، تتميز في أن التراوح في درجة حرارة
2 الجدار الداخلي خلال محيط الأنبوب يقل عن 120°م.

6- العملية وفقاً لأحد عناصر الحماية 1 إلى 5، تتميز في أن خطوط تساوي درجة الحرارة isotherms في المنطقة القلبية core zone تمتد في صورة حلزونية spiral form.

7- العملية وفقاً لأحد عناصر الحماية 1 إلى 6، تتميز في أن سرعة التدفق الدوّامي تزيد خلال أول مترين إلى 3 أمتار من طول الأنبوب ثم تبقى ثابتة.

8-العملية وفقاً لأحد عناصر الحماية 1 إلى 7، تتميز في أن سرعة التدفق الدوّامي تغطي المقطع العرضي الكامل بعد أول مترين إلى 3 أمتار من طول الأنبوب.

9- العملية وفقاً لأحد عناصر الحماية 1 إلى 8، تتميز في أن عامل تجانس درجة الحرارة temperature homogeneity factor خلال المقطع العرضي وعامل تجانس درجة الحرارة المستخدم على القطر الهيدرولي hydraulic diameter يزيد عن 1 بالمقارنة مع عوامل التجانس لأنبوب أملس.

10- العملية وفقاً لأحد عناصر الحماية 1 إلى 9، تتميز في أن سرعة التدفق في الطبقة المتاخمة boundary layer عند جدار الأنبوب تكون أقل بنسبة تتراوح من 8 إلى 12 ٪ وتزيد سرعة التدفق في المنطقة القلبية بنسبة تتراوح من 8 إلى 12٪ عن سرعة التدفق في حالة أنبوب مقارنة يحتوي على أضلاع مستقيمة من نفس النوع.

11- العملية وفقاً لأحد عناصر الحماية 1 إلى 10، تتميز في أنه يتم تسريع الغاز، خلال مسافة تتراوح من 100 إلى 200 سم cm، محسوبة من مدخل الغاز، إلى سرعة محيطية تتراوح من 15 إلى 20٪ من السرعة المحورية في المنطقة القلبية، وبأن السرعة المحيطية ثابتة لاحقاً.

12-العملية وفقاً لأحد عناصر الحماية 1 إلى 11، تتميز في أن مجموع السرعة المحورية والسرعة المحيطية يزيد عن السرعة المحورية لأنبوب مقارنة يحتوي على أضلاع مستقيمة من نفس النوع.

13- العملية وفقاً لأحد عناصر الحماية 1 إلى 12، تتميز في أنه يتم تسريع جسيمات الغاز gas particles عند جوانب الأضلاع.

14- أنبوب مضلع ribbed tube يحتوي على عدد من الأضلاع الداخلية التي تدار بشكل لولبي، يتميز في أن محيط الجانبية circumference profile (U_p) يمثل نسبة تتراوح من +5 إلى -2٪ من حلقة الغلاف envelope circle التي تلامس تجاويف الأضلاع.

15- الأنبوب المضلع وفقاً لعنصر الحماية 14، يتميز في أن زاوية الجنب flank angle للأضلاع تتراوح من 16° إلى 25°.

16- الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عنصري الحماية 14 أو 15، يتميز في أن زاوية الخطوة pitch angle للأضلاع تتراوح من 20° إلى 40°.

17- الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 14 إلى 16، يتميز في أنه يتم تصميم الأضلاع والتجاويف التي تقع بين الأضلاع بحيث تكون متناظرة مرآوياً mirror-symmetrical في المقطع العرضي.

18- الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 14 إلى 17، يتميز في أن ذروات الأضلاع وتجاويف الأضلاع في كل حالة تدمج مع بعضها البعض.

19- الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 14 إلى 18، يتميز في أنه يكون للأضلاع وتجاويف الأضلاع نفس نصف قطر الانحناء radius of curvature.

20- الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عنصري الحماية 14 أو 15، يتميز في أنه يتم لحام weld الأضلاع عليه وتقع تجاويف الأضلاع على حلقة مشتركة.

21- الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 14 إلى 20، يتميز في أنه يحتوي على أضلاع يتراوح مجموعها من 6 إلى 12.

22- الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 14 إلى 21، يتميز في أن القطر الهيدرولي للأنبوب المضلع يساوي على الأقل قطر الحلقة الداخلية inner ring (Ri).

23- الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 14 إلى 22، يتميز في أن نسبة قيم خارج قسمة quotient معاملات انتقال الحرارة heat transfer coefficient Q_R/Q_0 إلى خارج قسمة الفقدان في الضغط $\Delta P_R/\Delta P_0$ في الاختبار المائي water test تتراوح من 1.4 إلى 1.5، حيث يشير R إلى أنبوب مضلع ويشير 0 إلى أنبوب أملس.

24- الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 14 إلى 23، يتميز في أن نصف قطر الانحناء (R) للمقطع العرضي للضلع يتراوح من 3.5 إلى 20 ملم mm.

25- الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 14 إلى 24، يتميز في أنه يكون للضلع ارتفاع height (H) يتراوح من 1.25 إلى 3 ملم.

26- الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 14 إلى 25، يتميز في أن المقطع العرضي الواضح ضمن محيط الجانبية (Up) يمثل نسبة تتراوح من 85 إلى 95 ٪ من مساحة حلقة الغلاف (Fa).

27- الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 14 إلى 26، يتميز في أن مساحة الجانبية profile area (Fp) تمثل نسبة تتراوح من 40 إلى 50 ٪ من المساحة الحلقية annular area بين حلقة الغلاف والحلقة الداخلية.

28- عملية لإنتاج الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 14 إلى 27، تتميز في أنه يتم تدوير طرفي الأنبوب الذي يحتوي على أضلاع متوازية محورياً بالنسبة لعضهما البعض.

29- عملية لإنتاج الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 14 إلى 27، تتميز في أنه يتم إنتاج الجانبية الداخلية بواسطة التشويه deformation باستخدام أداة تفريز profiling tool.

30- العملية وفقاً لعنصر الحماية 29، تتميز في أنه أثناء التشوه يتم تكسير الحبيبة دقيقة البنية micro structural grain جزئياً في منطقة السطح الداخلي.

31- عملية لإنتاج الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 14 إلى 27، تتميز في أنه يتم إنتاج الجانبية الداخلية بواسطة التشوه باستخدام أداة تفريز أو بواسطة اللحام المتزايد.

32- عملية لإنتاج أنبوب مصبوب بالطرد المركزي centrifugally cast tube كما وصف في عناصر الحماية 14 إلى 27، تتميز في أنه يتم إنتاج الجانبية الداخلية بإزالة المادة

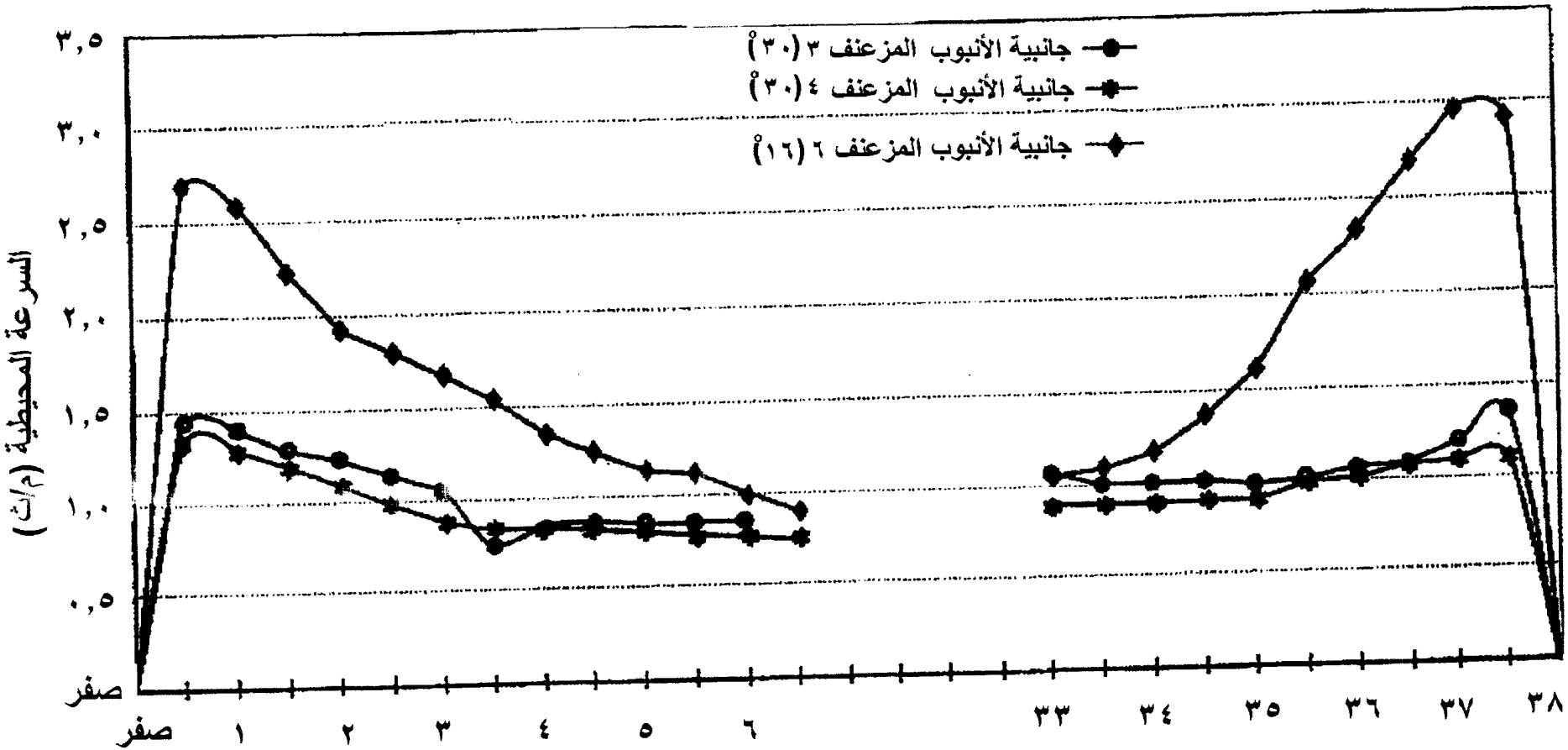
إلكتروليتياً electrolyte removal of material.

33- العملية وفقاً لأحد عناصر الحماية 29 إلى 32، تتميز في أنه يتم جعل السطح الداخلي للأنبوب المفرّز أملس.

34- استخدام أنبوب مصبوب بالطرد المركزي لإنتاج الأنبوب المضلع وفقاً لأحد عناصر الحماية 15 إلى 27.

35- الاستخدام وفقاً لعنصر الحماية 34، حيث يتكون الأنبوب المصبوب بالطرد المركزي من سبيكة نيكل nickel alloy تحتوي على كربون carbon بنسبة تتراوح من 0.1 إلى 0.5٪، كروم chromium بنسبة تتراوح من 20 إلى 35 ٪، نيكل nickel بنسبة تتراوح من 20 إلى 70 ٪، سليكون silicon بنسبة لا تزيد عن 3 ٪، نيوبيوم niobium بنسبة لا تزيد عن 1 ٪، تنجستون tungsten بنسبة لا تزيد عن 5٪، وفي كل حالة هفنيوم hafnium، تيتانيوم titanium، فلزات ترابية نادرة rare earths، زركونيوم zirconium، بنسبة لا تزيد عن 0.5 ٪، وألومنيوم aluminum بنسبة لا تزيد عن 6 ٪.

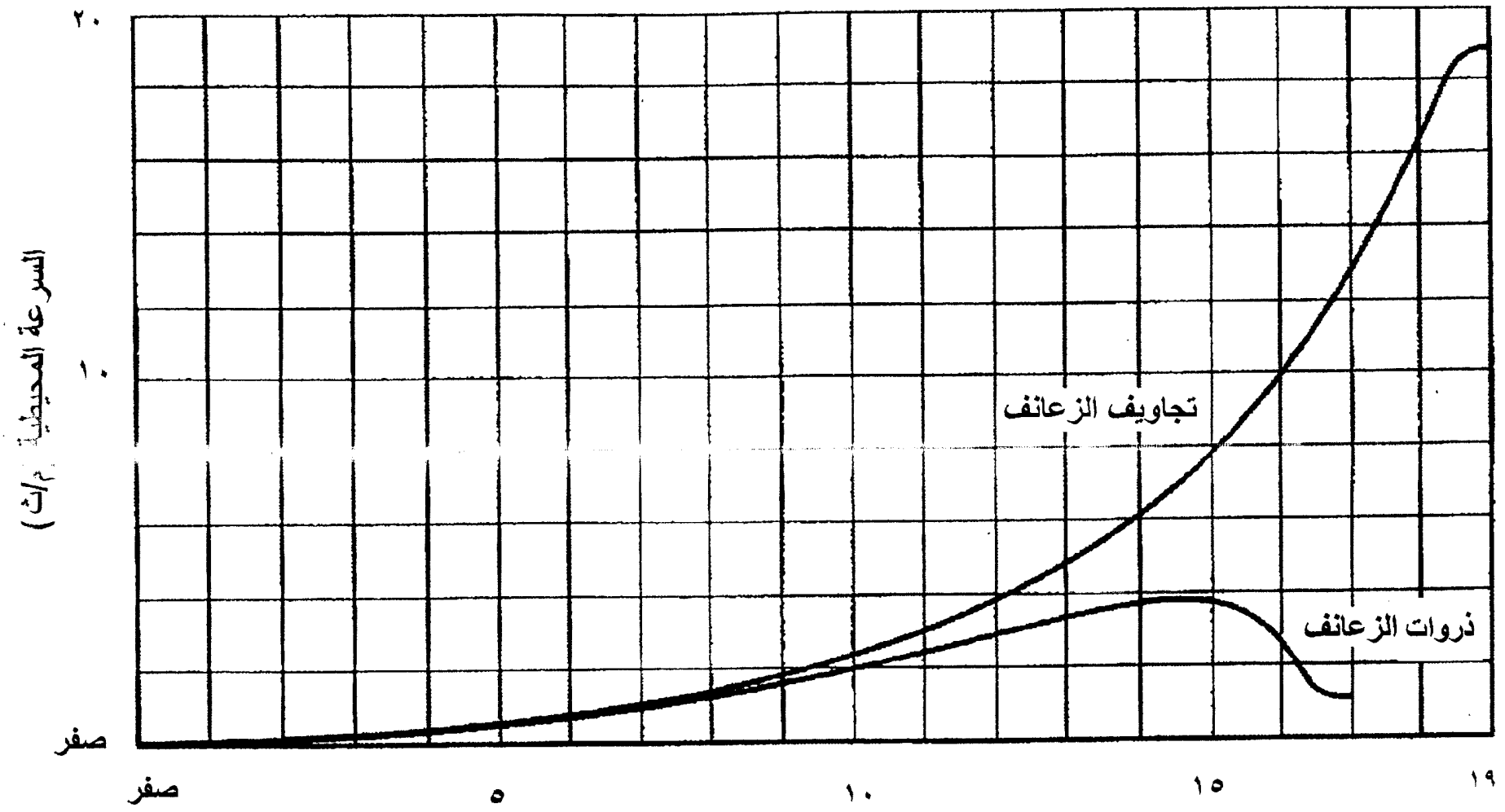
36- الاستخدام وفقاً لعنصر الحماية 35، حيث تحتوي السبيكة، بشكل منفرد أو في توليفة مع بعضها البعض، على سليكون silicon بنسبة تبلغ 0.02 ٪، نيوبيوم niobium بنسبة تبلغ 0.1 ٪، تنجستون tungsten بنسبة تبلغ 0.3 وألومنيوم aluminum بنسبة تبلغ 1.5 ٪ على الأقل.



السرعات المحيطية في الجانبيات بدرجات ميل
مختلفة بالنسبة لمحور الأنبوب

الشكل ١

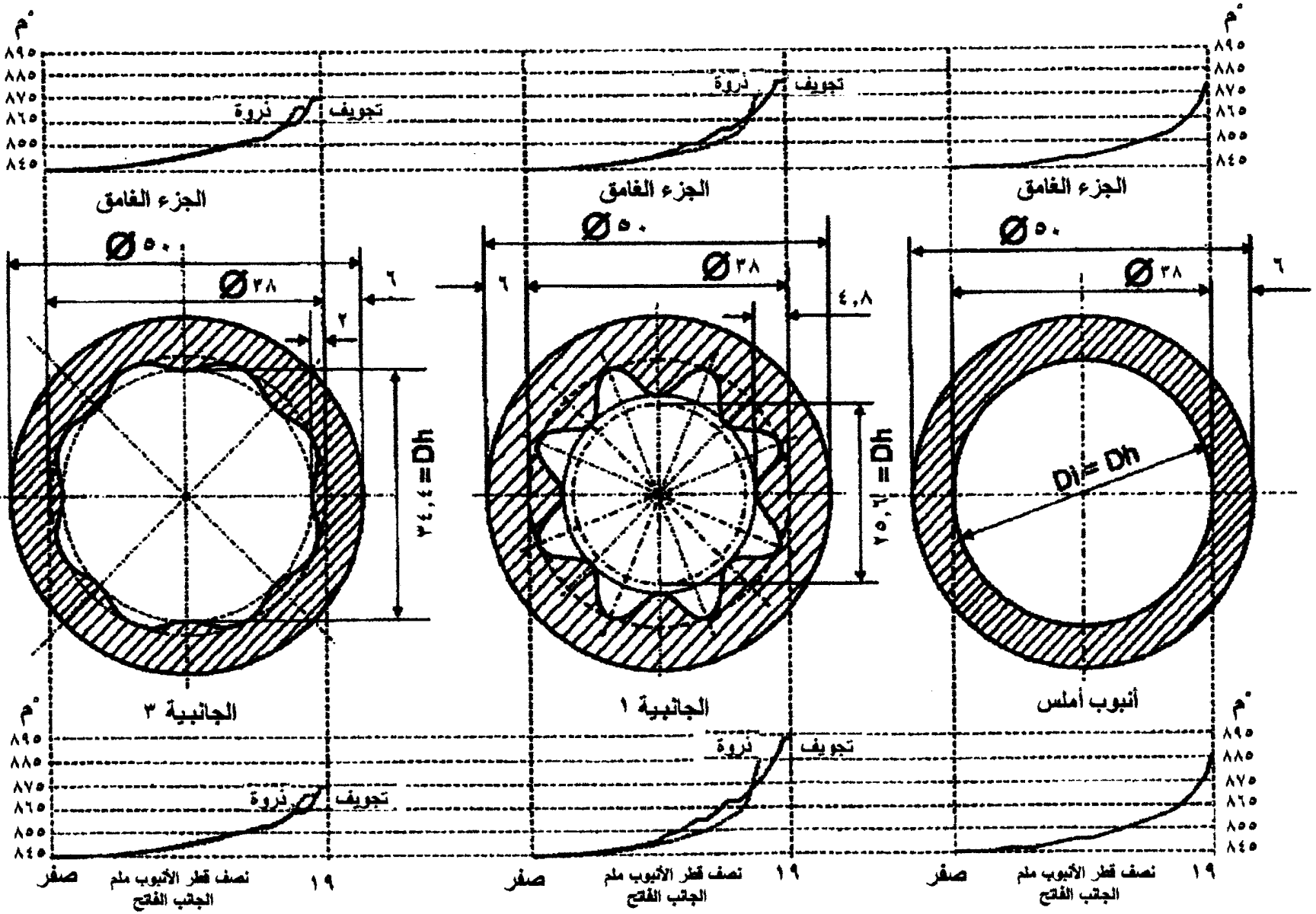
27325DE
MA



توزيع السرعات المحيطية في الجانبية ٣ بخطوة
قياسها ٣٠° خلال نصف قطر الأنبوب المفرَّز

الشكل ٢

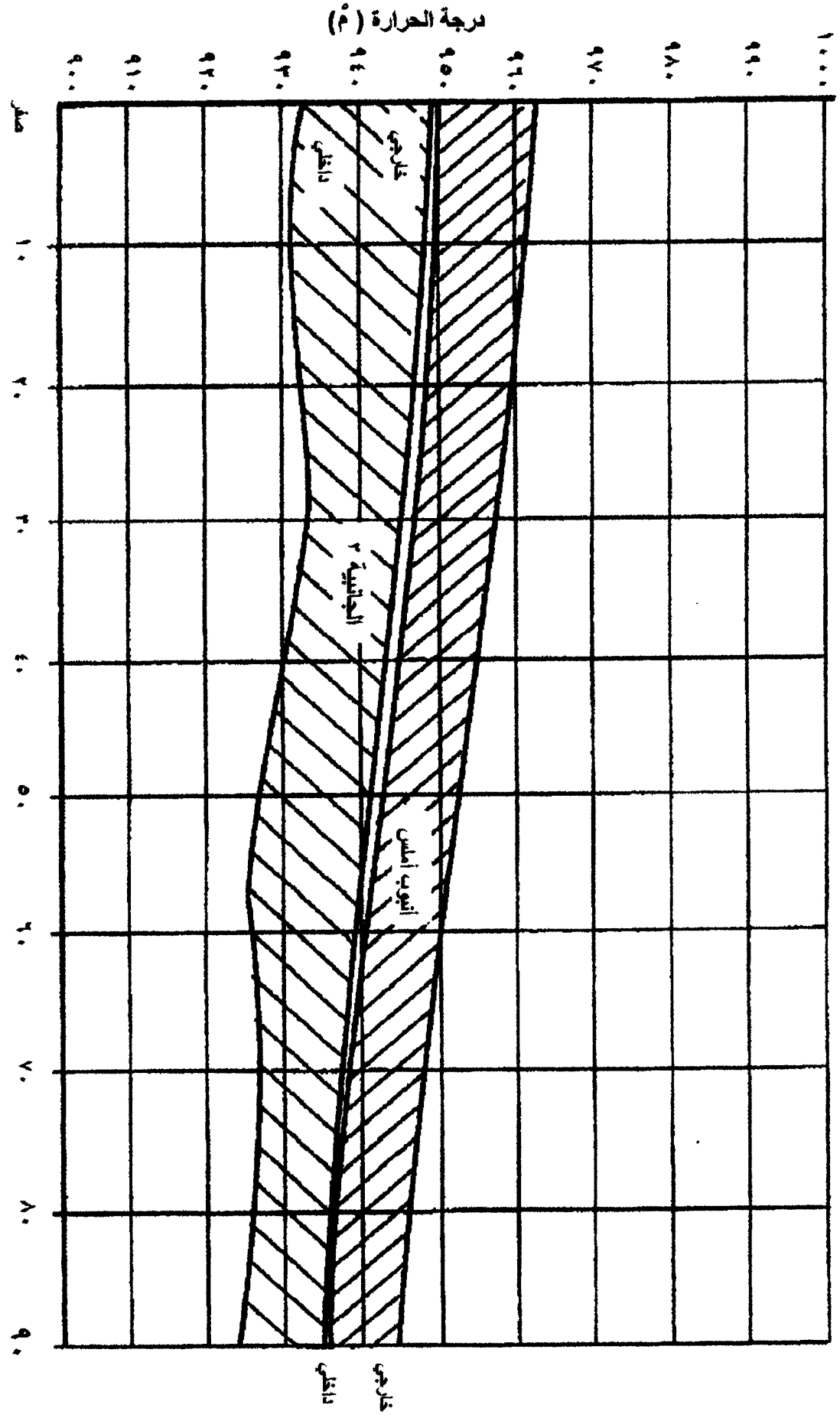
27325DE
EMA



أشكال الجانبيات مع جانبية لدرجة الحرارة في المائع (نفثا)
عند ٩٩٥٠ ملم مرسومة فوق نصف قطر فى الأنبوب
(الذورة = ذروة الجانبية، التجويف = تجويف الجانبية)

الشكل ٣

27325DE
EMA

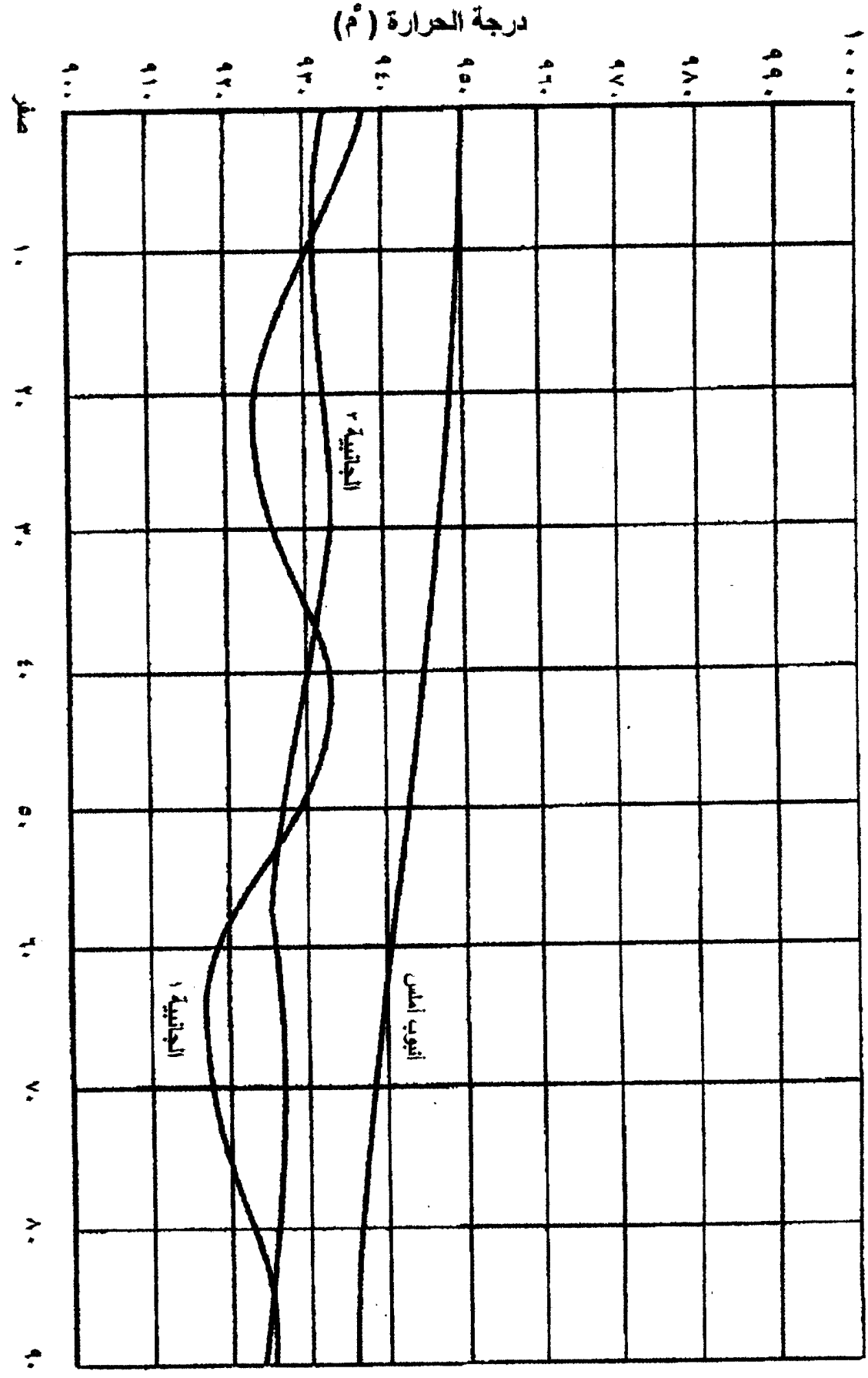


محيط الأنبوب من الجانب الفاتح إلى الجانب الغامق (°)

مقارنة درجات حرارة الفلز المتشكل منه الأنبوب

الشكل ٤

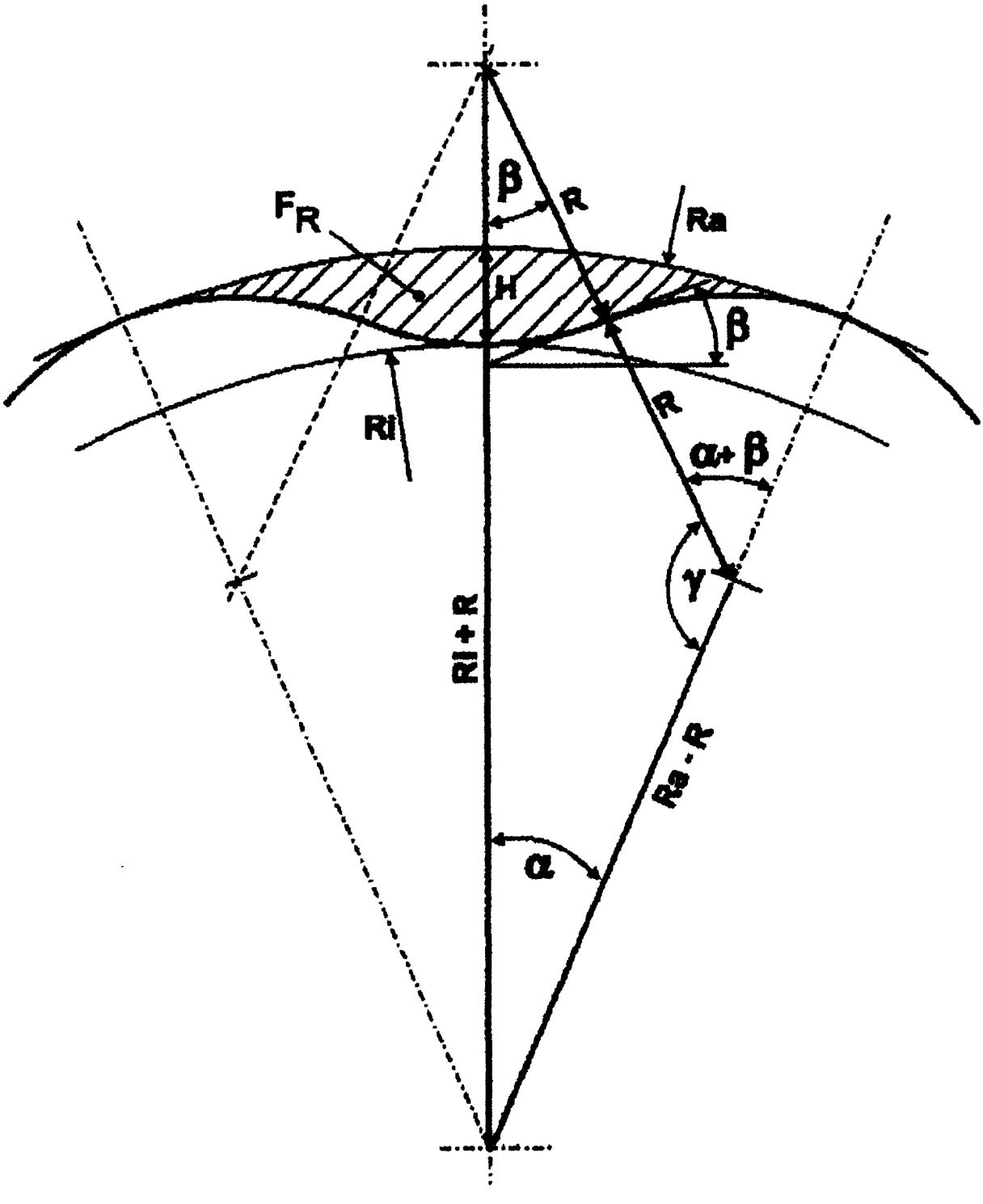
MA 27325DE



محيط الأنبوب من الجانب الفاتح إلى الجانب الغامق (°)

توزيع درجة الحرارة على الجدار الداخلي للأنبوب عند ٩٩٥٠ ملم

الشكل ٥



توضيح لجزء من جانبية للتعريف الرياضى
لزاوية الجنب (β) وأنصاف الأقطار للجانبيات (R)

الشكل ٦

MA 27325DE

الشكل ٧

مقارنة سرعات التدفق، أزمان البقاء والفقدان في الضغوط لنفس الصيب الكتلي بعد طول أنبوب مسخن بلغ ١٩٥٠ ملم

الشكل ٧