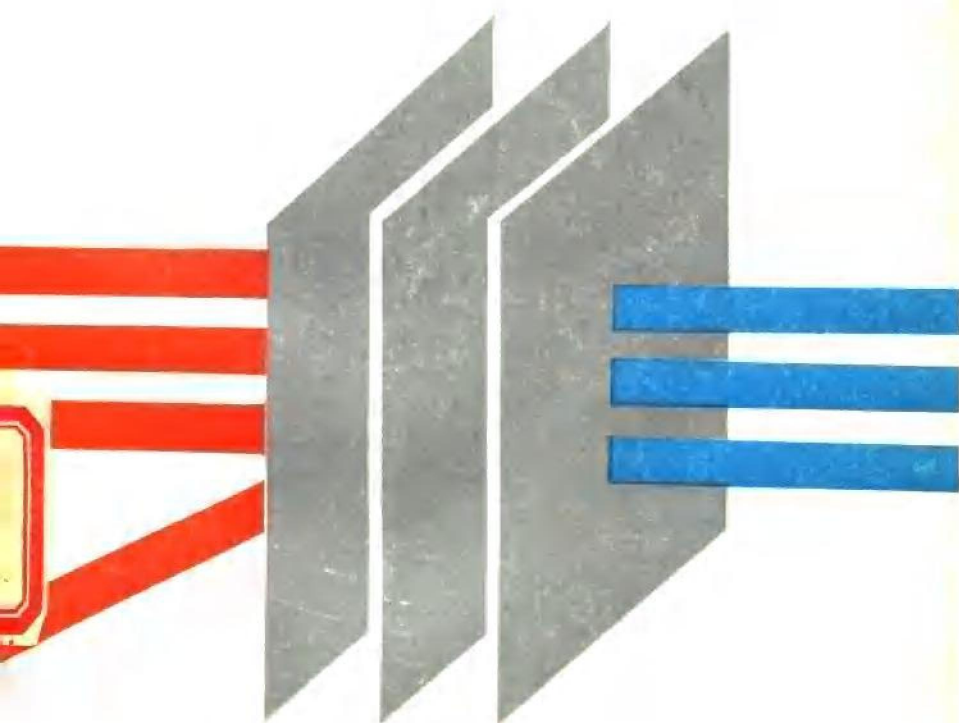


高粘度液体传热设备

〔苏联〕 A. M. 马斯洛夫

化学工业出版社



79.514

11-5

高粘度液体传热设备

〔苏〕A. M. 马斯洛夫

谢丰毅 译

化学工业出版社

译 者 的 话

随着化学、食品等工业的发展，处理高粘度的场合日益增多。几乎所有处理高粘度液体的工厂都离不开对该液体的加热或冷却，尤其食品工业需要灭菌消毒更是如此。为加热与冷却液体就需要相应的装置——换热器。为了节省能源、节省制造装置所用的材料以及使被加热或冷却的高粘度液体在过程中不被破坏，对换热器提出了较高的要求。

本书对高粘度液体所用换热器的设计计算及各种类型的结构均作了详细地介绍，颇为实用。国内这类书尚属少见。为此译出介绍给读者。林肇信对本书译稿作了部分审阅。

因限于译者水平，译文中可能有疏漏及错误之处，热诚希望广大读者批评指正。

译者

1989年

41638

主 要 符 号

- A ——比例系数
- a_T ——无因次粘度
- a ——比例系数；流道宽度，m；导温系数， $\text{m}^2/\text{℃}$ ；
- b ——指数；
- C ——比例系数， kJ/mol ；
- d_1, d_2 ——直径，m；流道当量直径，m；
- D ——容器直径，m；
- d ——搅拌器直径，m；
- E ——粘性流体的活化能， kJ/kmol ；恢复系数；
- F ——传热面积， m^2 ；
- h ——液体厚度，m；
- K_1, K_2 ——流变学方程式中的克松常数；
- K ——流变学方程式中稠度指数， $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ；传热系数 $W/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ；
- $K_D = Re(d/R)^{1/2}$ ——蛇管曲率对液体流动特性的影响因子；
- l ——流道长度，m；
- M ——分子量；
- M_w ——平均分子重量
- M_n ——分子量的平均数
- n ——非牛顿型流体指数（流变特性指数）
- n_M ——搅拌器的转速， s^{-1} ；

P ——常规应力, Pa;
 P ——列伊涅尔变量常数;
 Δp ——流道的压力降, Pa;
 Q ——液体流量, m^3/s ;
 Q ——传递的热量, W;
 R ——气体常数, $R=8.32\text{kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})$;
 R ——蛇管半径, m;
 R_g ——热阻, $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$;
 T ——温度, K;
 T_r ——换算温度, K;
 t ——温度, $^{\circ}\text{C}$;
 T ——奶的酸度, $T(\text{тернер})$ 度;
 u ——液体流速, m/s ;
 V ——列伊涅尔稠性变数, s^{-1} ;
 W ——水当量, $\text{W}/^{\circ}\text{C}$;
 x ——组分的摩尔分率;
 X ——在封闭流道壁上最大剪应力和切向应力之比,

$$X = \frac{\tau_0}{\tau_c};$$

X ——流道无因次长度, $X = \frac{1}{Re} \frac{x}{d}$,

X ——从流道入口到测量点的长度;

Y ——在非封闭流道壁上最大剪应力和切向应力之比,

$$Y = \frac{\tau_0}{\tau_c};$$

y^* ——中心流动区流动范围, m;

α ——对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;

γ ——速度梯度, s^{-1} ;

- δ_s ——污垢层厚度, m;
 ϵ_ϕ ——流道弯曲对传热影响的系数;
 ζ ——流体阻力系数;
 η ——动力粘度, Pa·s;
 θ ——时间, s; 不均衡温度;
 $\lambda, \langle \lambda \rangle$ ——弛张时间, s; 与平均分子量有关的弛张时间;
 μ ——流量系数;
 ν ——运动粘度, m²/s;
 τ_k ——屈服限, Pa;
 τ_{k1}, τ_{k2} ——弹性变形区末端应力和自弹性变形至塑性变形范围的应力, Pa;
 τ_0 ——什维多夫和宾汉流变学方程式中的极限剪应力, Pa;
 τ_c ——流道壁上剪应力, Pa;
 φ ——单位固体颗粒或单位溶质的体积浓度。

目 录

主要符号

第一章 换热器的结构	1
1. 列管式换热器	1
2. 螺旋板式换热器	10
3. 板式换热器	13
4. 转子式换热器	28
5. 蒸汽直接接触式加热器和真空冷却器	39
6. 摩擦灭菌器	43
7. 换热器型式的选择	43
第二章 专用换热器	47
8. 粘性食品板式灭菌和消毒冷却装置	47
9. “什托尔克”型管式消毒装置(荷兰)	55
10. 蒸汽直接接触式液体加热装置和真空冷却装置	57
11. 离心除菌和消毒的“阿利法-拉瓦利”型装置	61
第三章 高粘性非常规粘度的非牛顿液体流变学基本特性	63
12. 牛顿液体的粘度	63
13. 非牛顿液体	66
第四章 粘性介质和非牛顿非常规粘性介质在换热器管程和壳程中的流动	86
14. 作用在液体上的应力	86
15. 沿斜面和缝隙平面直线流道形成的层流	88
16. 列伊涅尔稠性变数	97
17. 滑动效应对管路流体力学特性的影响	98
18. 广义雷诺数	101

19. 开始区段流体力学状态对管道和流道流体阻力的影响	105
20. 非牛顿液体在管道或流道中的湍流流动	108
21. 热流方向对换热器流道的流体阻力影响	110
22. 粘性牛顿液体在弯曲流道中的流动	112
23. 非牛顿液体在搅拌中的功率消耗	133
24. 高粘度液体在真空条件下的流动	142
第五章 粘性牛顿液体和非牛顿液体在换热器中流动时的传热 ...	145
25. 列管式换热器中的传热	145
26. 螺旋式换热器中的传热	158
27. 板式换热器的传热	160
28. 机械搅拌器和刮板设备中的传热	169
29. 水蒸汽直接接触的粘性液体加热	177
30. 在真空中粘性液体的冷却	181
第六章 换热设备计算的基本原理	183
31. 换热器的设计计算	183
32. 设备结构尺寸的计算	190
33. 多段换热器中的热回收	192
34. 多段设备的计算	198
第七章 高粘度液体和非常规粘度的非牛顿液体换热器的	
运转特性	224
35. 换热表面污垢的形成及防止	224
36. 板式换热器内的水力冲击	228
37. 换热器的清洗	232
38. 换热器运行中可能出现的故障	234
参考文献	236

第一章 换热器的结构

1. 列管式换热器

在石油加工工业、石油化学工业、化学工业以及与其类似的工业部门中，多用固定管板式列管换热器或各种具有热补偿结构的列管换热器，在较宽的温度范围内（从 -30°C 到 $+450^{\circ}\text{C}$ ）和压力小于 6.4MPa 的情况下，加热和冷却粘性液体。这些换热器的型式有浮头式、固定管板式、壳体上装有温度膨胀节式以及U型管式。

图1所示为浮头式列管换热器。管程可为双程或四程，为提高流体流速及改善载热体和冷却剂的流动情况，管间装有折流挡板。

壳体直径 $D_H=325\sim 1400\text{mm}$ ；总长为 $3690\sim 10960\text{mm}$ ；传热面积 $F=11.7\sim 1030\text{m}^2$ ；管径为20和25mm的ГОСТ 14246-69浮头式换热器，规定工作压力为1.6，4.0和 6.4MPa 。

对ГОСТ 14245-69U型管式换热器（图2），规定的操作条件与浮头式换热器相同。标准U型管式换热器的传热面积规定为 $11\sim 1108\text{m}^2$ 。

根据ГОСТ 15122-69，对壳体上装有膨胀节的固定管板式列管换热器（图3）可用于工作压力为0.6、1.0、1.6、2.5和 4MPa ；温度从 -30°C 到 350°C 的条件下，对应的壳体直径为 $159\sim 1200\text{mm}$ ；传热面积为 $1\sim 964\text{m}^2$ 。固定管板式换热器

（TH）和具有膨胀节的换热器（TK）可立式安装，亦可卧式安装。

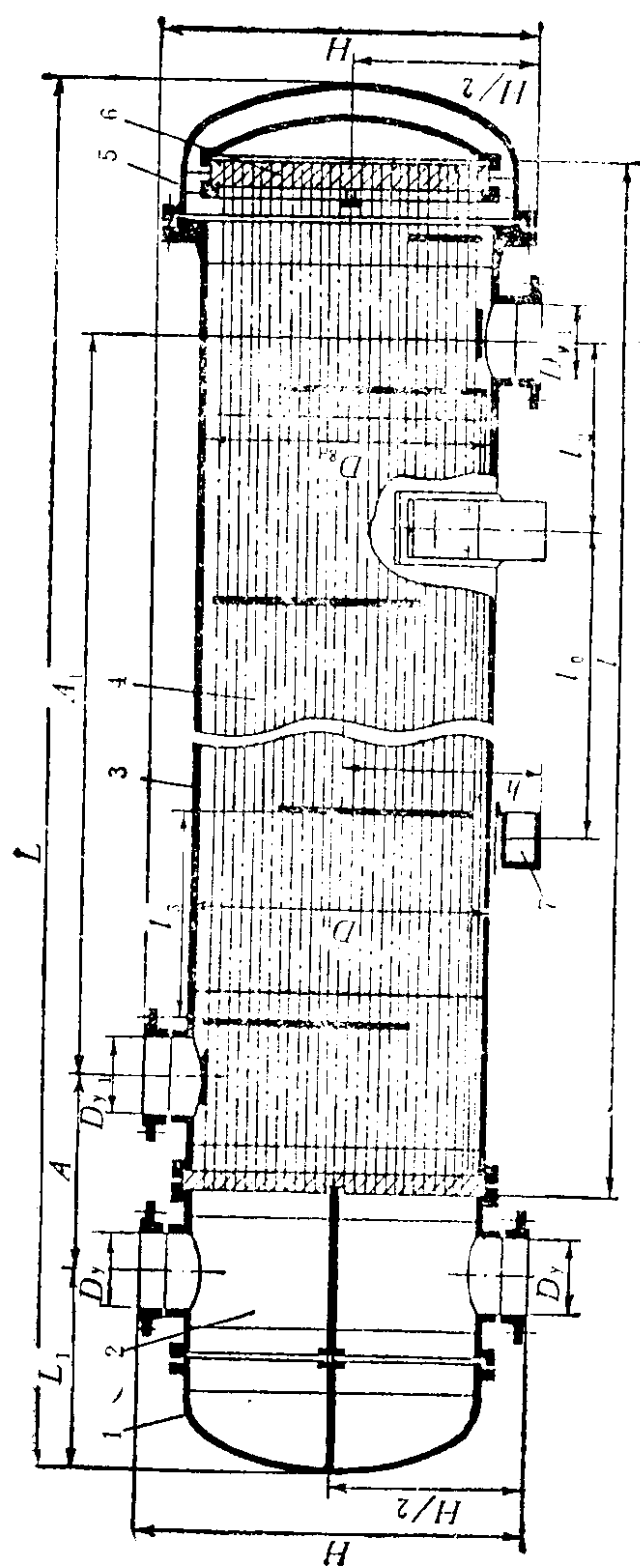


图 1 浮头式换热器

1—管箱封头端盖；2—管箱；3—壳体；4—换热管；5—封头；
6—浮头盖；7—支座； l —管长

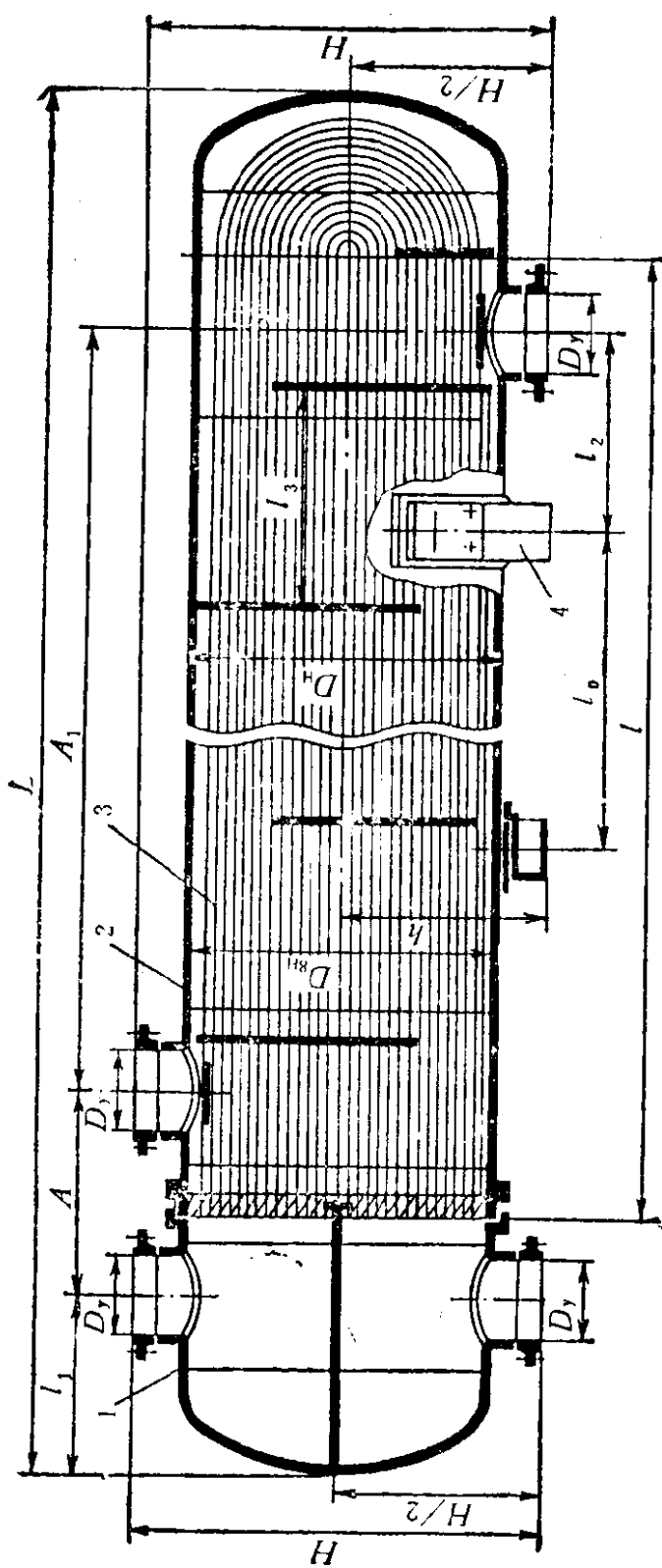


图 2 U型管式换热器
1—管箱; 2—壳体; 3—换热管; 4—支座

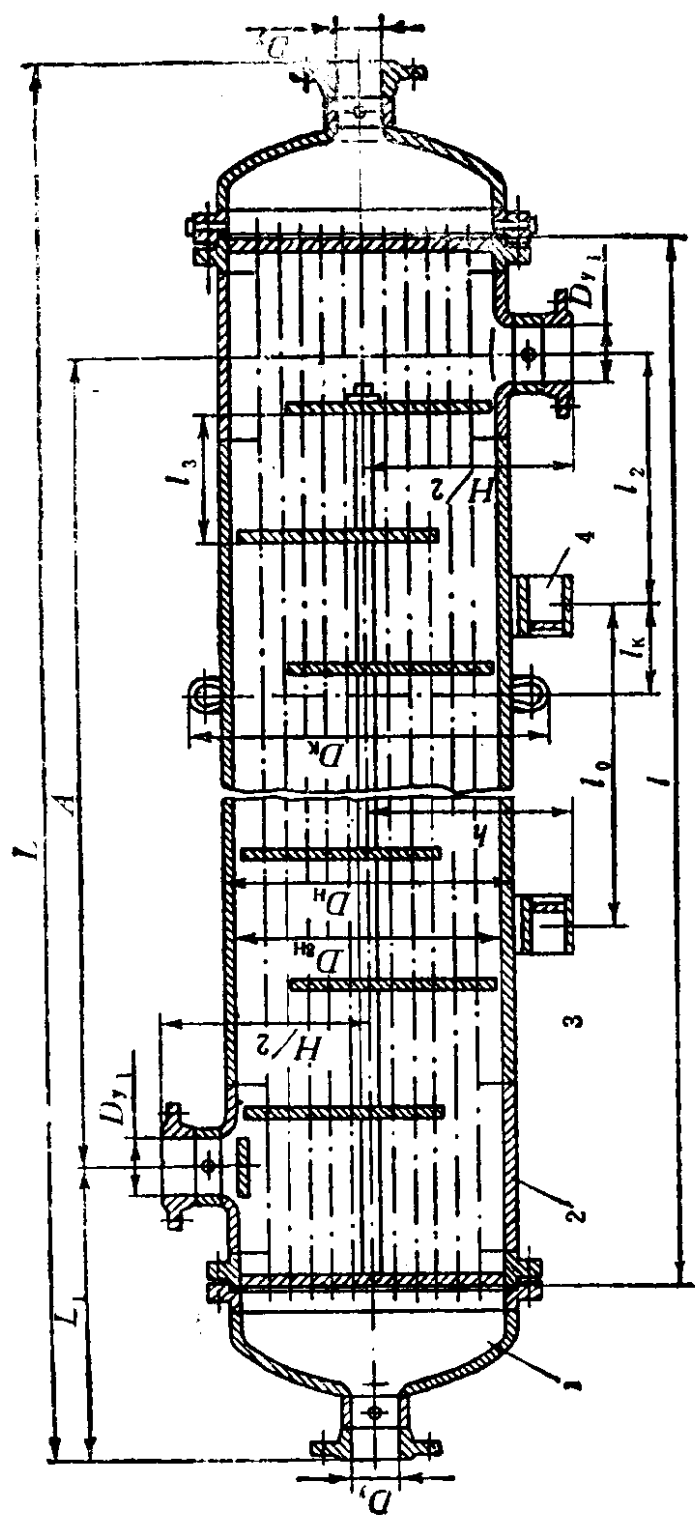


图 3 壳体装有膨胀节的固定管板式换热器
1—管箱; 2—壳体; 3—换热管; 4—支座; D_k —膨胀节直径

换热器内传热管可用光滑管，也可用表面轧有翅片的管子。对加热不产生沉淀的清洁液体，可采用不可拆式端盖，而对其它介质可采用可拆式端盖。

标准型换热器的标记法如下：如光滑管（I型）的TH型换热器，壳体直径1000mm卧式，设计压力1.6MPa、B9型（B型换热器可处理易爆、易燃和有毒的介质），管径20mm，管长6m，四管程，其标记为：

$$\text{换热器} \frac{1000\text{TH}\Gamma\text{-I-16-69}}{20\Gamma} \Gamma\text{OCT}15122\text{-69}$$

翅片管（II型）的TK型立式换热器：

$$\text{换热器} \frac{1000\text{TKBII-16-69}}{20\text{H6-4}} \Gamma\text{OCT}15122\text{-69}$$

其中一种液体在300℃以上的TH型换热器：

$$\text{换热器} \frac{1000\text{TH}\Gamma\text{-I-16-B9-B}}{20\Gamma6\text{-4}} \Gamma\text{OCT}15122\text{-69}$$

正方形排列管径为25mm U型管式列管换热器：

$$\text{换热器} \frac{1000\text{TY-16-M1}}{25\Gamma6\text{K}} \Gamma\text{OCT}14245\text{-69}$$

三角型排列有翅片的U型管列管换热器：

$$\text{换热器} \frac{1000\text{TY-16-M1}}{25\text{H6T}} \Gamma\text{OCT}14245\text{-69}$$

与上规格相同的浮头换热器：

$$\text{换热器} \frac{1000\text{TII-16-M1}}{25\text{H6T}} \Gamma\text{OCT}14246\text{-69}$$

粘性食品用列管式换热器 用于对食品进行热加工的换热

设备,要提出在石油加工业和其它工业中未曾提出的新要求。首

先应满足卫生检查部门有关在设备上检查微生物播散的要求。众所周知,若微生物在设备的卫生处理条件下(如蒸煮)未被完全杀死,那么,在以后同样操作条件下,它不仅继续存在,而且还会繁殖,这对食品的热加工来讲是不能允许的。因此,食品工业中用的管式换热器在构造上与用于其它工业中的不尽相同。

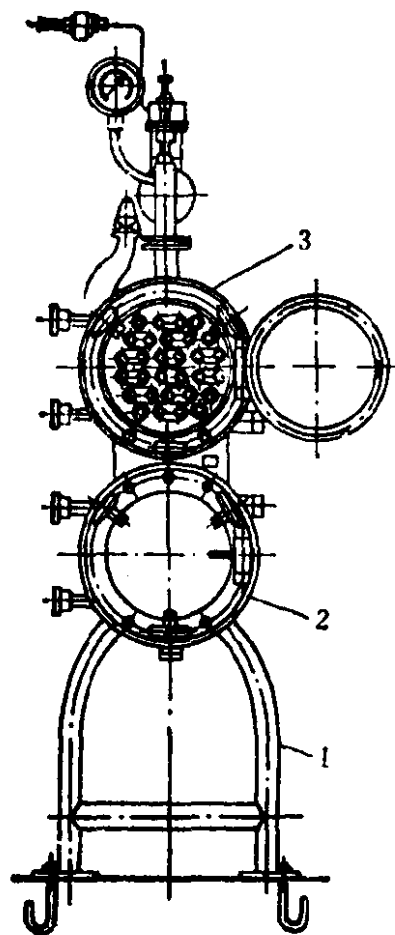


图 4 ПТВ-5M列管式换热器

1—管式结构支承; 2—用水加热物料的下段;
3—用水蒸汽加热最后物料的上段

第一是设备的管束长度,通常限定为1~1.2m,这样便于

检查管子内部和进行手工清理;第二是封头螺栓要易于拆卸,且在任何时间均可对设备进行检查和清理。

图 4 所示为用于乳制品工业中加热液体乳制品的ПТВ-5M列管式换热器。设备分为两段。段之间物料呈连续流动。每一段有30根管,管径为25mm。总传热面积为4.5m²。设备入口压力为0.2MPa时,物料流速折合成乳制品为2.9m/s。在此条件下,将乳制品从10℃加热至95℃,设备的生产能力为

表 1 管式冷却灭菌装置的技术特性

指 标	换热器的型号				
	ИТ-1	ИТ-2	ИТ-5М	ИТУ-10	ТИО-2.5
生产能力, L/h	1200	3000	5000	10000	2500
筒体:					
数量	1	2	2	4	4
内径, mm	—	315	315	315	—
长度, mm	—	1000	1000	1000	—
内径为25mm的轧制管数	—	30	30	30	—
温度: °C					
乳制品开始温度	10	10	10	10	10
灭菌温度	85~90	85~90	85~90	85~90	85
乳制品从水区段排出	—	55	45~50	45~50	—
热水	85~95	85~95	85~95	85~95	—
传热系数, W/(m ² ·K)	—	—	—	—	0.6
蒸汽用量, kg/h	120	300	360	720	250
水用量, m ³ /h	—	—	5.0	10	—
传热面积, m ²	2.25	4.5	4.5	9	7.9
蒸汽压力, kgf/cm ²	0.3~0.5	0.3~0.5	0.3~0.5	0.3~0.5	0.3~0.5
乳制品在管内流速, m/s	2.9	2.9	2.9	2.9	—
每段乳制品(乳脂)必要的压力, kgf/cm ²	—	2.0	2.0	2.0	2.0~2.5
乳制品从灭菌段排出的压力, kgf/cm ²	1.2~1.4	1.2~1.4	1.2~1.4	1.2~1.4	1.2~1.4
电动机功率, kw	2.8	2.8	6.9	15.7	—
外型尺寸(长×宽×高), mm	1190×800×1100	1300×880×2000	3100×1300×2000	3520×1850×2250	2000×1050×2040
重量, kg	308	552	750	1370	700

5m³/h。

表 1 示出近年来苏联工业中采用的管式冷却灭菌装置的技术特性。

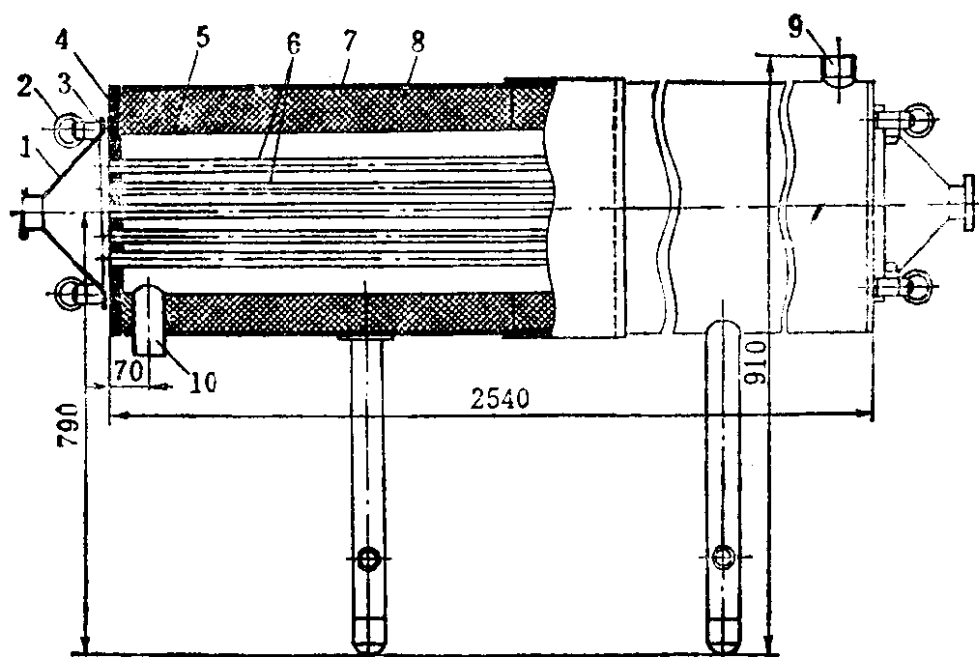


图 5 蛋白质（酸奶）管式冷却器（OTT）

粘稠性蛋白质管式冷却器（OTT）在乳制品工业中被广泛应用。如用于酸奶连续生产流水线中。冷却器由筒体 5（图 5）、管板 4、有螺纹连接管的锥型密封盖 1、传热管 6 等组成。管子胀接于管板上。密封盖 1 用密封条、螺栓和吊环 2 与管板紧密相连。端盖是靠橡胶垫片 3 达到密封。端盖用销钉定位。筒体 5 用保温层 7 及不锈钢板 8 包复。冷却水（冰水）由接管 10 进入，从接管 9 排出。

OTT 型换热器的技术特性如下：

生产能力, kg/h	600	水压力, MPa	0.2
酸奶温度, °C		酸奶在设备进口处压力, MPa	0.5
冷却前	28~30	酸奶在管内的流速, m/s	0.02
冷却后	8	酸奶在冷却器内的停留时间, s	120
传热面积, m ²	4	酸奶单位时间内在管内存留量, kg	25
管数	25	外型尺寸, mm	
管内径, mm	20	长	2824
冷却剂	水	宽	443
水温度, °C	1	高	910
水用量, m ³ /h	0.8	重量, kg	105

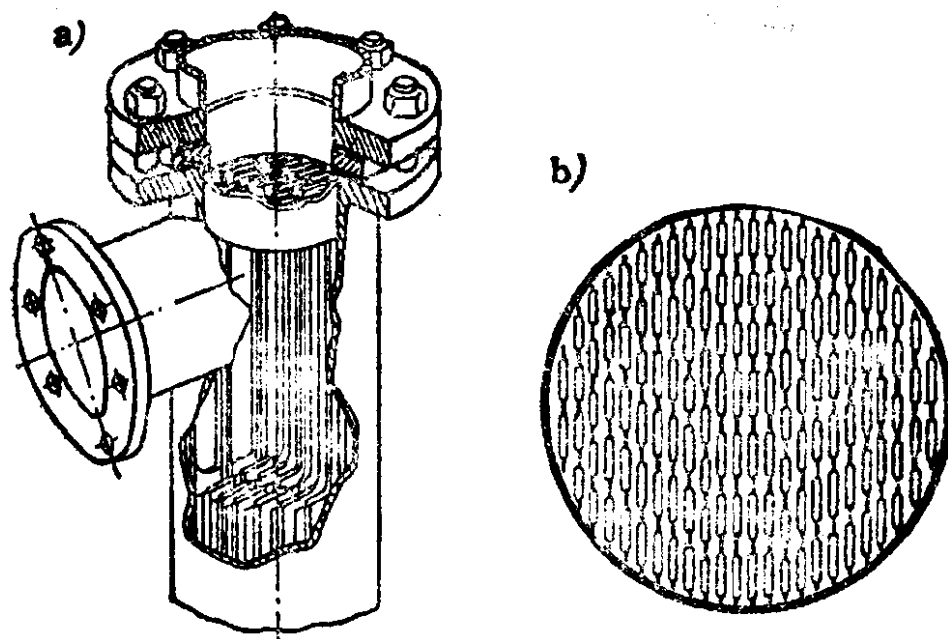


图 6 板壳式换热器

a—设备总体； b—薄板在设备壳体內的分布

在设备制造和检修时，应特别注意尽量使设备内各管中的流体阻力相等，否则，酸奶仅沿着流体阻力小的管内流动，而在其余管内的酸奶实际上不流动。这在酸奶板式冷却器中会出现，由此管子的总流通截面将减少，当酸奶流量恒定时，有酸奶流过的管中流速将增加。酸奶是非牛顿假塑性流体，随着其速度梯度的增加，粘度将降低。因此，管内的酸奶流速不断增加，继而导致其粘度继续下降，从而使酸奶沿这些管内流动更为有利。

传热系数为 $160 \sim 200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ （当设备内所有管子都在正常的工作条件下）。

板壳式换热器 板壳式换热器是管壳式换热器的一种，它是用压扁的管子组成管束，或用金属薄板焊成的狭窄流道以代替圆管。压扁管束一端焊接在管板上。管板和圆柱形的设备壳