

内燃机

活塞式和复合式
内燃机各系统

〔俄〕 А.С.奥尔林 主编
М.Г.克鲁格洛夫



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书主要介绍活塞式和复合式内燃机——汽油机和柴油机各系统的理论计算、结构设计、发动机排放系统、操纵自动化、微处理机控制、监督预报系统和技术诊断等内容,并且对内燃机的发展远景作了预测,对我国内燃机行业的教学、科研和使用有很好的参考价值。

本书由前苏联著名内燃机学者、苏联科学院院士A.C.奥尔林教授主编。对我国内燃机行业的技术人员和院校师生提供了一个了解国外内燃机发展动向的窗口。本书可作为从事内燃机研究、设计、制造及使用的科技人员深入学习的补充教材和参考书。

ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Системы поршневых и Комбинированных двигателей

Третье издание, переработанное и дополненное

Под общей редакцией А.С.Орлина, М.Г.Круглова

Издательства «Машиностроение», 1985г

* * *

内 燃 机

——活塞式和复合式内燃机各系统

[俄] A.C.奥 尔 林 主编
M.Г.克鲁格洛夫

于连臣 主译

*

责任编辑:孙慧波 沈红 版式设计:霍永明

封面设计:姚 毅 责任校对:杨兴祥

责任印制:卢子祥

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京交通印务实业公司印刷

(原人民交通出版社印刷厂)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 23³/₄·字数 571 千字

1994年1月北京第1版·1994年1月北京第1次印刷

印数 001--850·定价:30.00 元

*

ISBN 7-111-03567-4/TK·138

译 者 的 话

本书由前苏联著名内燃机学者、苏联科学院院士 A.C.奥尔林教授等主编，由前苏联高等教育部审定为内燃机专业教科书以及有关专业教学参考书。

本书主要介绍活塞式和复合式内燃机——汽油机和柴油机各系统的理论计算及结构设计；并对发动机排放系统、操纵自动化、微处理机控制、监督预报系统和技术诊断等作了详尽介绍；另外对内燃机的发展远景作了科学的预测。这对我国“内燃机”行业的教学、科研和使用有很好的参考价值。

参加本书翻译工作的还有赖彭年、解焕民、傅丽艳同志，参加部分校对工作的有程宏教授和姚向军同志，吴关昌同志对全书进行了技术校核。戴莫安教授对本书的翻译给予大力支持，在此，向他们表示衷心感谢。

由于译者水平有限，译文中难免有不当之处，请读者批评指正。

译 者

1988年8月

中 文 版 序

前苏联著名内燃机学者奥尔林院士、教授在50年代主编的“内燃机”学教材已由我本人和天津大学内燃机教研室的同事们组织翻译成中文，介绍到中国作为高等学校教材出版，当时对我国的内燃机专业教育事业的发展起了积极作用，对内燃机专家和大专院校的师生有过广泛的影响。

50年代末期出版了第2版三卷本，70年代初期改为第3版四卷本，并于1974年荣获前苏联国家奖。80年代开始发行第4版。

现在奥尔林和克鲁格洛夫教授主编的第4版四卷本“内燃机”教材在前苏联享有崇高声誉并拥有广大读者（每卷一次印数均在37000~42000册之间）。第4版的四卷本书名如下：

第一卷，活塞式和复合式内燃机的构造和工作

第二卷，内燃机（活塞式和复合式）原理

第三卷，内燃机设计

第四卷，内燃机——活塞式和复合式内燃机各系统

这四卷本在内燃机理论和实践方面都有系统、完整的论述，尤其第四卷，内容极为丰富。对发动机各系统的结构、选型、计算方法叙述全面；对汽油机、柴油机的供给和进排气系统的设计有许多特点；对冷却系统和冷却器的设计充分考虑了余热的利用；对内燃机工作的稳定性论述精辟；对新技术的发展，如微机控制和氢燃料发动机设计填补了国内内燃机教材的空白；对发动机的废气净化和高指标内燃机的发展作了大量的工作；在内燃机的监测、操纵自动化和技术诊断方面都有较详细的论述，这对提高机器的可靠性和使用寿命极为重要。

该书是近年来国外出版的较好的一本内燃机教科书。毫无疑问，中译本的早日出版对国内内燃机专业的教学、科研和内燃机生产的发展都有很好的促进和推动作用。

史绍熙

1991.6

前 言

本书是由莫斯科鲍曼高等技术学校教师集体编著的内燃机专业教科书。

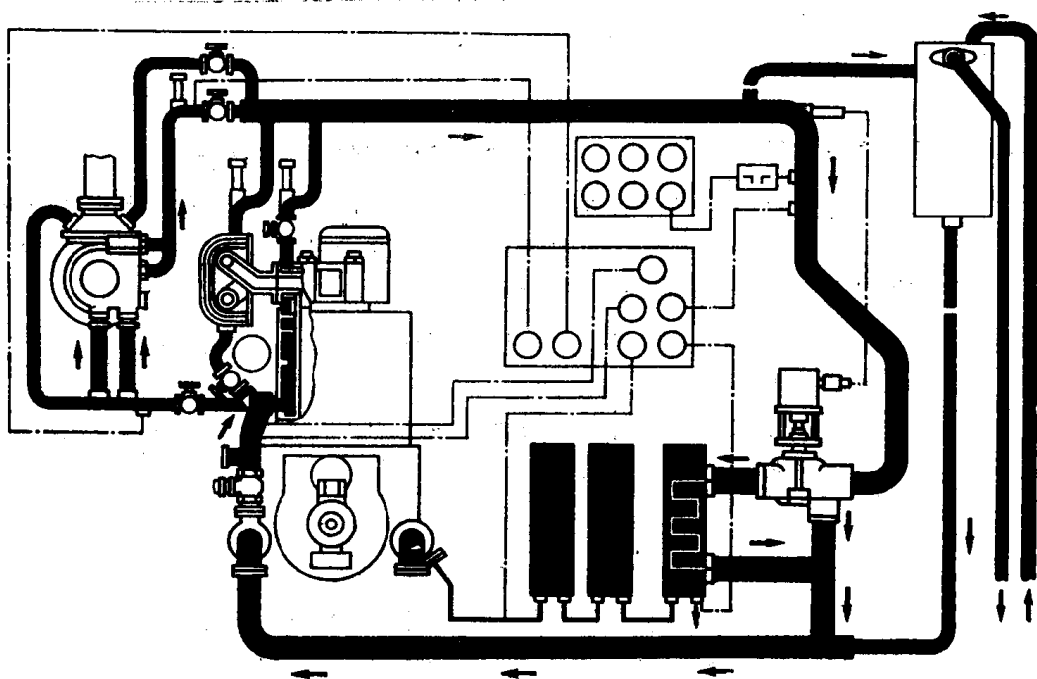
为了有效地保护周围环境，减少发动机有害物质的排放，改善发动机的废气净化和降低发动机的噪声，以及大量生产经济、可靠的内燃机，必须开发具有高经济技术指标的内燃机，否则就无法解决摆在苏联内燃机制造业面前的任务。

本书专门分析研究内燃机的工作特点、结构和各系统的计算。同时，在解决业已存在的问题时，作者吸取了内燃机制造业中的先进经验。

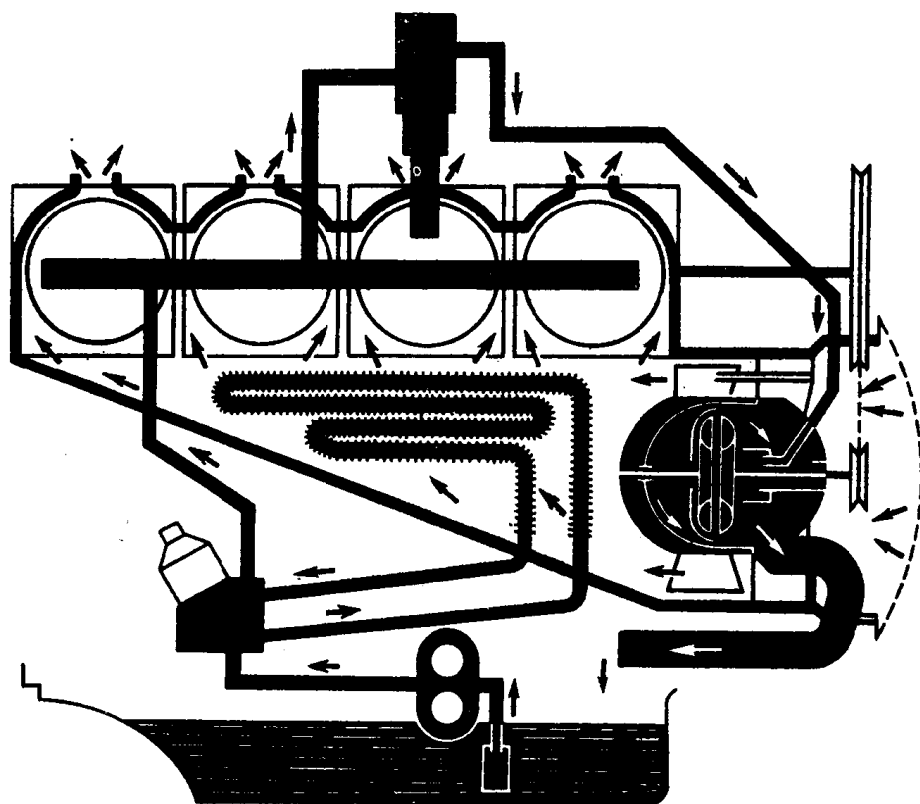
本书分析研究了在不稳定工况下发动机各主要系统的工作特点和新系统的工作原理，例如，用氢气作燃料的发动机供给系统，有些是更详细地叙述废气的中和作用(净化作用)方法和消除进、排气噪声的方法。由于发动机散热有特殊的重要性，在书中单独列出一章专门讲述使用各种介质的冷却器的设计和计算。考虑到测量技术和电子计算机将得到广泛的应用，本书详细分析了监督检查系统，操纵自动化和发动机的技术诊断等问题。

作者衷心希望对本书多提宝贵意见。

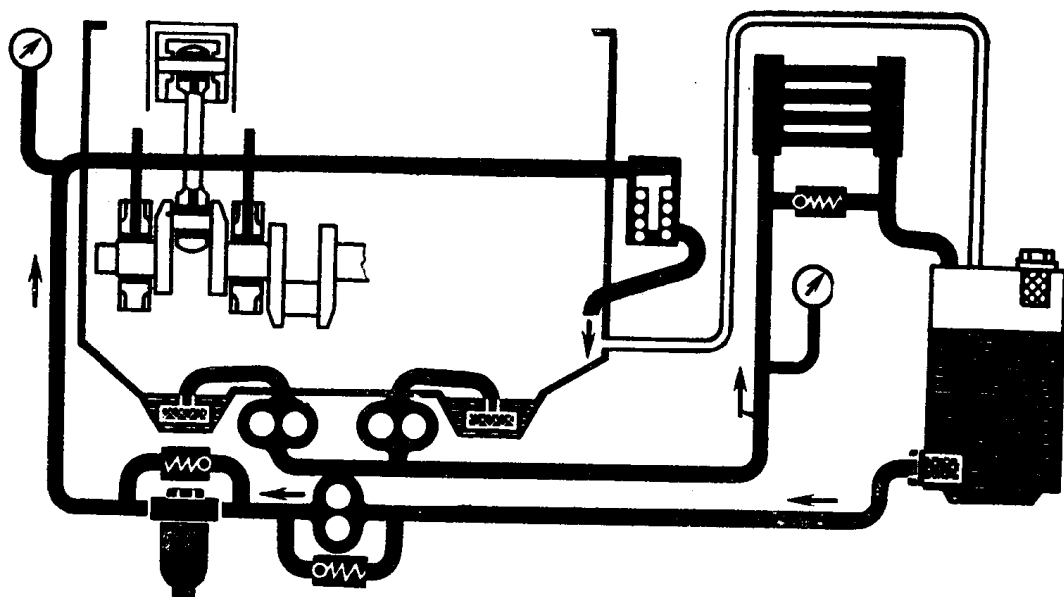
作 者



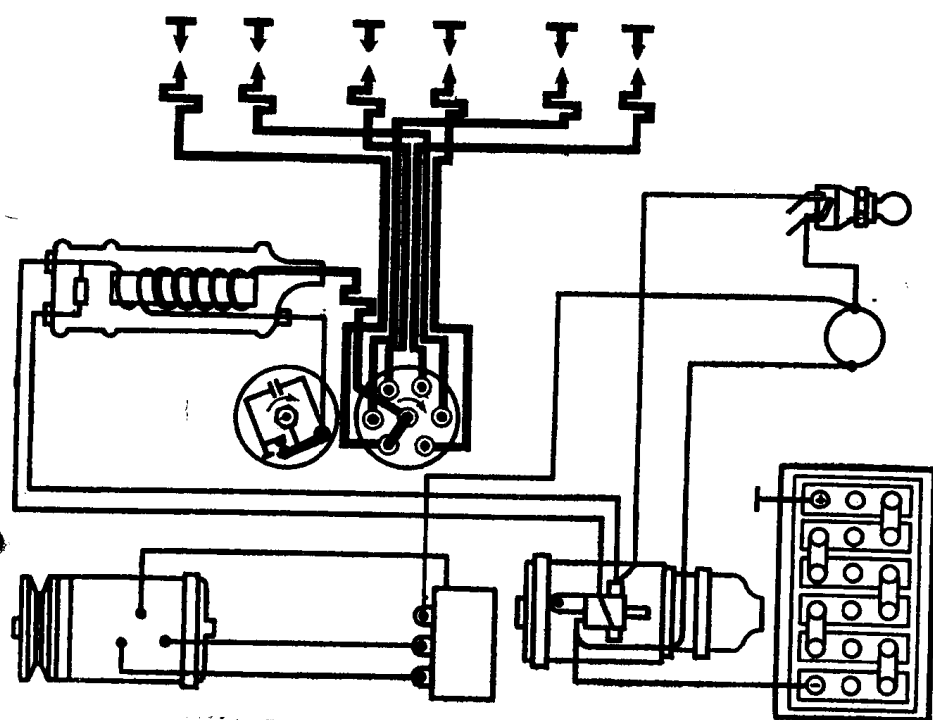
附图1 液体冷却系统示意图



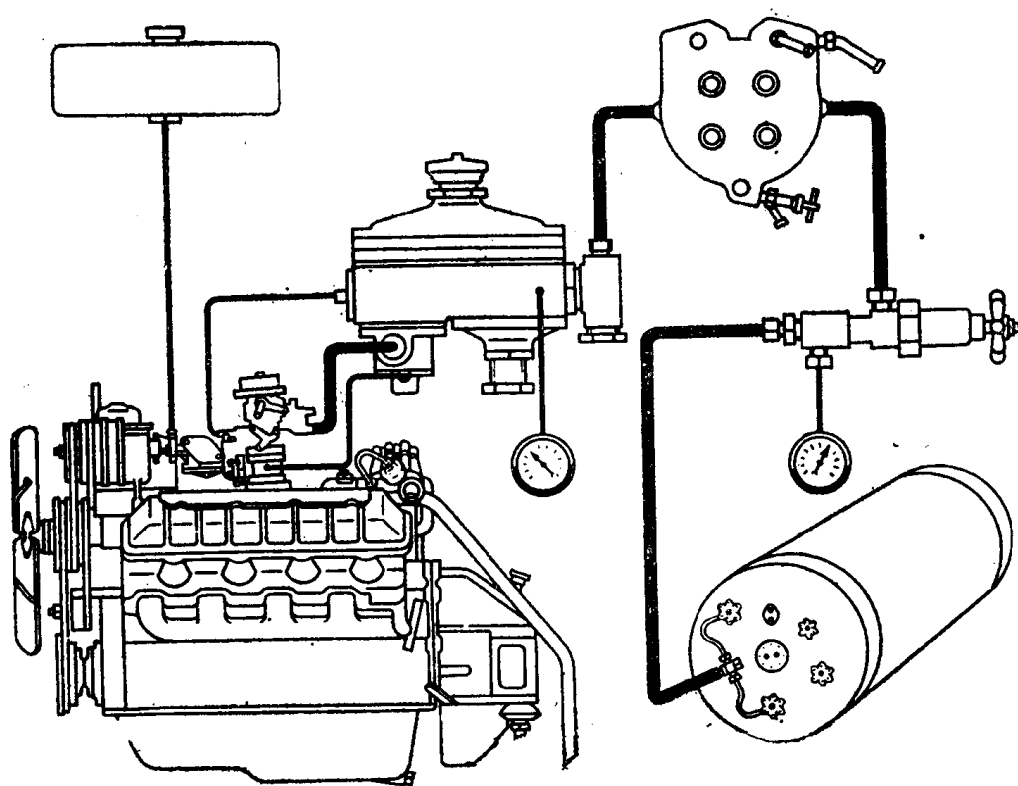
附图2 空气冷却系统示意图



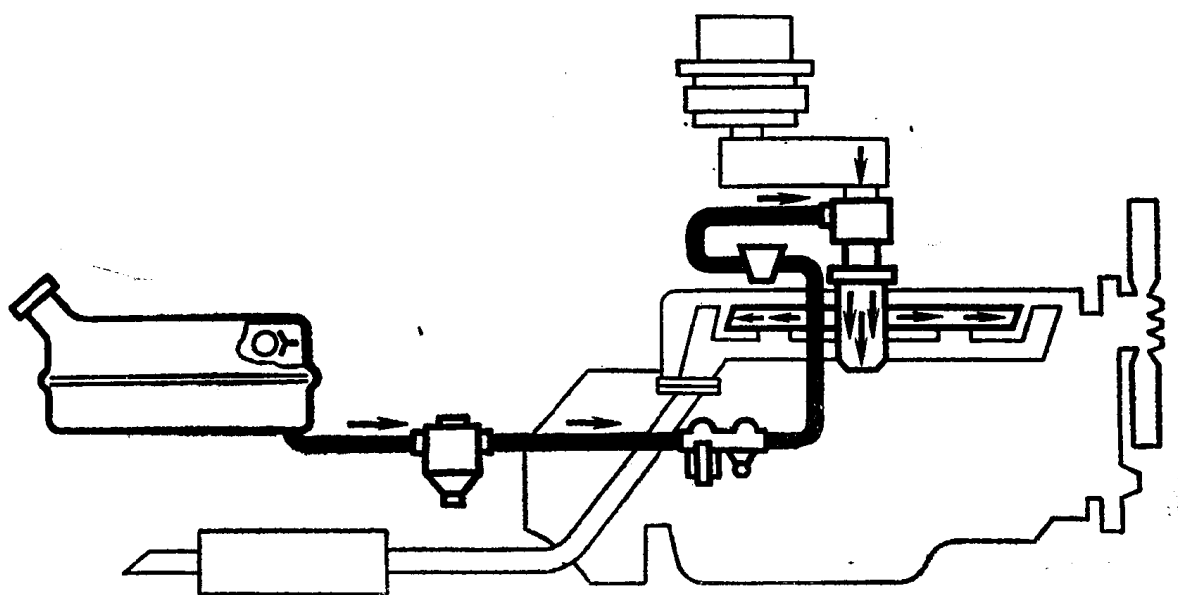
附图3 润滑系统示意图



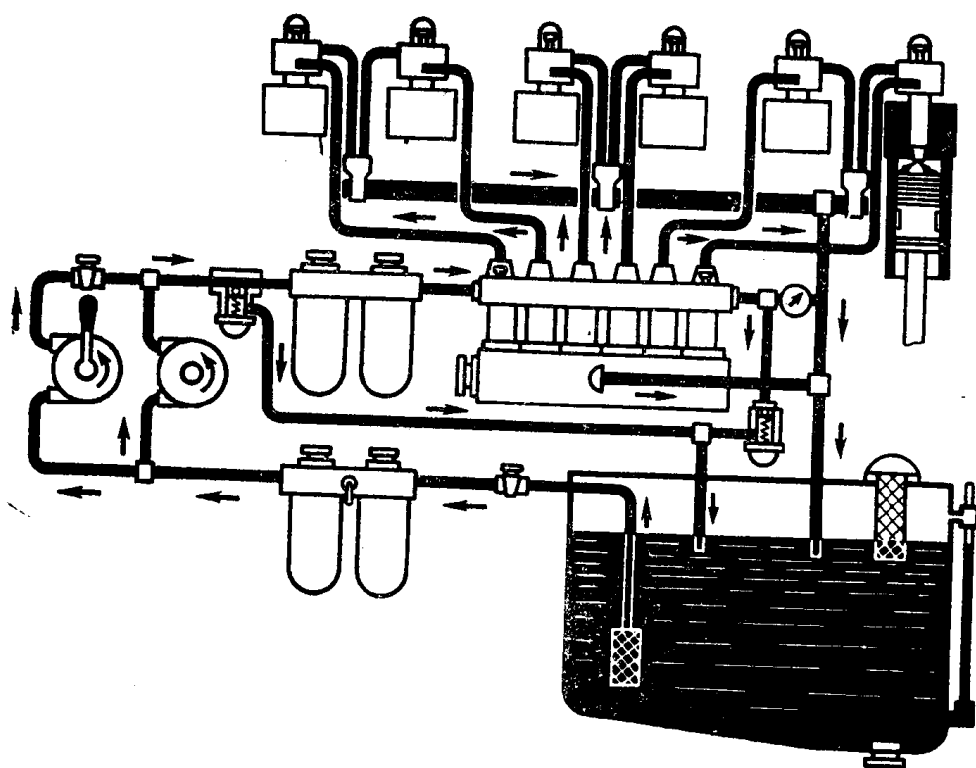
附图4 点火系统示意图



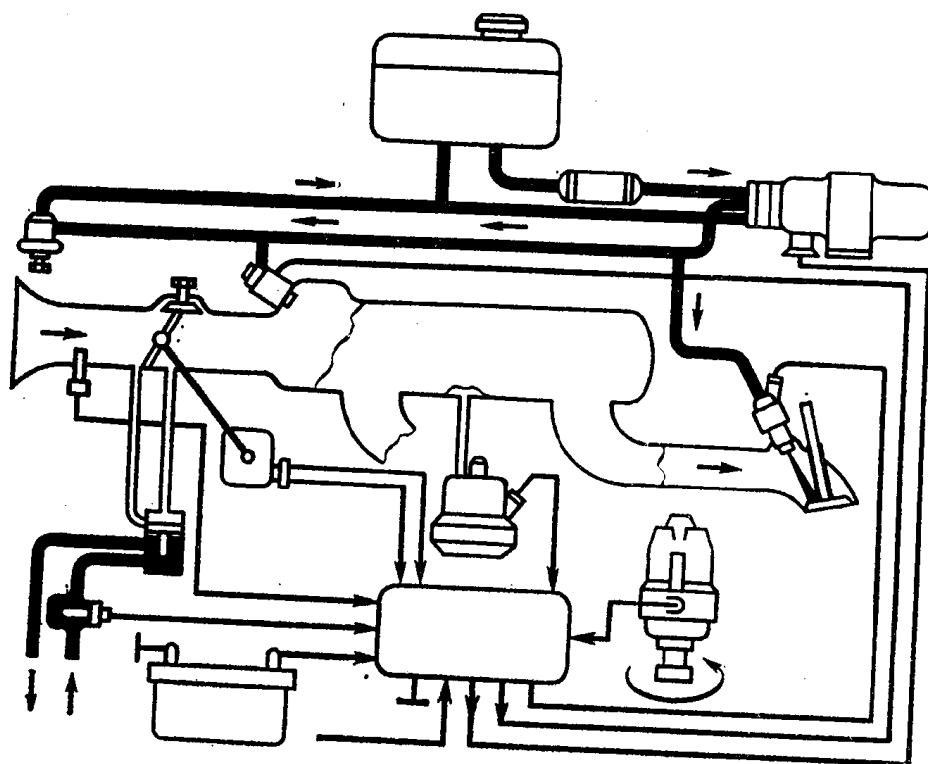
附图5 用气体燃料工作的发动机供给系统示意图



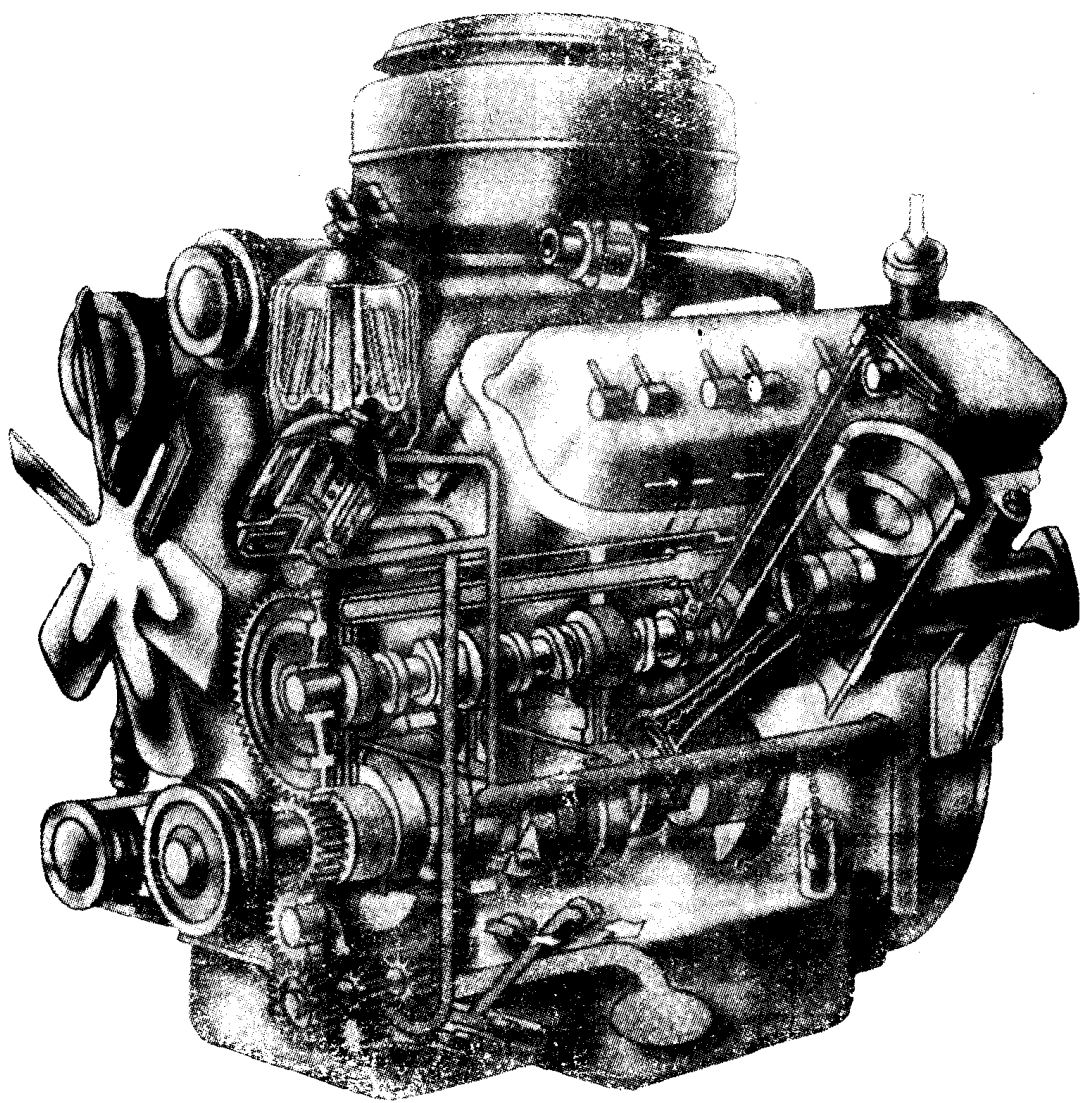
附图6 化油器式发动机供给系统示意图



附图7 柴油机燃油系统示意图



附图8 向进气歧管喷射燃油的燃料供给系统示意图



附图9 发动机外形图

目 录

译者的话
中文版序
前言

第1章 进气和排气系统	1
§1 一般要求	1
§2 空气滤清器	1
§3 进气歧管和排气歧管	7
§4 消声器	15
§5 废气有害成分中和器	19
§6 发动机在不稳定工况工作时进 排气系统过程的特点	23
第2章 液体燃料强制点火发动机 的供给系统	25
§1 化油器式发动机的供给系统简 图	25
§2 化油器式发动机混合气的形成	26
§3 简单化油器的特性	29
§4 理想化油器的特性	35
§5 化油器的主配剂系统	36
§6 化油器的辅助装置	43
§7 多腔化油器	55
§8 化油器的总示意图	57
§9 化油器的结构	60
§10 燃油箱、燃油管和燃油滤清器	70
§11 输油泵	72
§12 化油器式发动机最高转速限 速器	77
§13 轻质燃料喷射和强制点火发动 机的供给系统	81
§14 轻质燃料喷射发动机供给系统 装置	88
§15 发动机混合气强制点火的特殊 系统	91
§16 不稳定工况强制点火发动机 混合气形成的特点	93
第3章 柴油机燃油供给系统	95
§1 燃油供给装置对柴油机动力	

指标和经济指标的影响	95
§2 燃油系统的功能及其要求	96
§3 燃油供给的参数	97
§4 燃油供给过程及其伴生的物理 现象	100
§5 喷油泵的结构和计算	108
§6 喷油器的结构和计算	128
§7 特殊设计和结构的燃油系统	148
§8 供油过程的计算	155
§9 用轻质、重质和含硫燃料工作 的燃油供给装置的特点	165
§10 燃油供给系统主要元件的结构 布置	170
§11 滑阀计量燃油供给装置在不 稳定工况下工作的特点	173
第4章 煤气发动机的燃料系统 和可燃混合气的点燃系统	177
§1 煤气发动机的燃料系统	177
§2 发动机气缸供气装置的结构和 计算	180
§3 煤气空气混合气点燃系统	183
§4 氢气发动机燃料供给系统的 特点	188
第5章 润滑系统	195
§1 对润滑系统的要求及其主要 参数	195
§2 润滑系统机件的结构和计算	201
§3 润滑系统的元件	215
§4 发动机在不稳定工况工作时摩擦 部件润滑的特点	217
第6章 冷却系统	219
§1 冷却系统及其要求	219
§2 冷却系统构件的结构和计算	225
§3 冷却系统的监督仪表和其它装置	235
第7章 冷却器	238
§1 活塞式和复合式发动机的冷却器	238
§2 冷却器的计算和设计	240

§3	增压空气的冷却器(中冷器)	252	§2	作为调节对象的发动机微分 方程	299
§4	冷却液体的冷却器	253	§3	直接作用式自动调节器的微分 方程	308
§5	机油冷却器	254	§4	非直接作用式自动调节器的微 分方程	310
§6	冷却器的计算实例	256	§5	元件的过渡过程	312
第8章	起动和换向系统	261	§6	元件的频率特性	314
§1	起动系统及其要求	261	第11章	发动机自动调节系统	317
§2	曲轴最小起动转速	262	§1	发动机的调速特性	317
§3	起动的动力学	262	§2	自动调节系统的微分方程	317
§4	电起动机功率的选择	264	§3	自动调节系统的稳定性	319
§5	气瓶的起动	265	§4	劳茨-库尔维茨稳定性准则	320
§6	供便于起动用的装置	270	§5	维什涅格拉茨基图	321
§7	发动机的换向	272	§6	米哈依洛夫稳定性准则	323
第9章	发动机自动调节系统的 元件	278	§7	稳定性频率准则	324
§1	自动调节系统和元件的功能原 理图	278	§8	自动调节系统工作质量	326
§2	发动机工作工况的稳定性	279	第12章	发动机的自动化	329
§3	在发动机上安装自动调速器的 必要性	281	§1	概述	329
§4	直接作用式自动调速器	282	§2	自动化机构的元件	329
§5	直接作用式自动调速器的静特 性	288	§3	自动化信号	338
§6	调速器工作工况的稳定性	289	§4	自动应急保护	339
§7	直接作用式自动调速器的静力 计算	289	§5	发动机起动自动化	340
§8	非直接作用式自动调速器	295	§6	自动遥控	343
第10章	自动调节系统元件的动 力性质	299	第13章	技术诊断	352
§1	关于元件动力性质的概念	299	§1	发动机的技术诊断和质量管理	352
			§2	发动机是诊断的对象	353
			§3	发动机诊断的手段和方法	355
			第14章	内燃机的发展远景	364

第1章 进气和排气系统

§1 一般要求

进气和排气系统的功用是向发动机气缸供给新鲜充量（空气或可燃混合气）和从气缸排出废气。在外部形成混合气的发动机中，在进气系统中继续进行混合气的形成，因为液体燃料的蒸发及其蒸气与空气的混合或可燃混合气与空气的混合过程在化油器中或在气体混合器中来不及完成。

对进气和排气系统提出的总要求是使这些系统具有尽可能小的阻力，所以必须减少泵气损失和增加气缸的充量，以及更充分地利用废气涡轮中排气的能量。满足这一要求只通过降低系统中的气体速度，也即通过增加通过截面是不可能的，这样会增加外形尺寸和发动机的重量。除此之外，随着空气速度的降低，空气的紊流变弱，从而导致外部形成混合气的发动机混合气的形成变坏。最后，在增压发动机中管道排气运动速度比气体从气门中流出速度小，从而将导致气体动能的减小和热量利用的变坏。

在高速气流时，要达到减小流体阻力，则必须使气道具有平滑均匀的轮廓，以防止气流方向和通过截面面积的突然改变。为了将新鲜冲量均匀地分配到各个气缸，进气管道要作成对称的，而且在现代多缸化油器式发动机上要采用多腔化油器，其每一个腔供应一组固定的气缸组。为了改善燃料的蒸发，采用由发动机冷却系统排出的水来加热进气系统。在某些类型的化油器式发动机中，进、排气系统都布置在发动机同一侧，可以用废气来预热进气管。

在设计进气和排气系统时，要考虑到混合气的形成方法，尽可能利用排出气体的热量。

对内部形成混合气的发动机以及气体发动机，新鲜充量不需要预热，因为预热将导致进气充量的减小。在柴油机中，进气的预热是为了使柴油机在低温的情况下容易起动。从这一目的出发，在进气系统中装有专门的预热加热器，在发动机准备起动时，打开预热加热器。在增压发动机中，压缩机和增压空气冷却器（中冷器）属于进气系统，而废气涡轮属于排气系统。为了净化空气中的灰尘，装有空气滤清器，并与进气消声器相连接。排气系统可以安装废气中和器、消声器和滤去燃气中固体颗粒烟黑的滤清器。

由于进气和排气系统的复杂性，对这两个系统的尺寸选择应给予特别的注意，这是为了充分利用气体动力，提高新鲜充量对气缸的充入量和降低排气功的损失。

§2 空气滤清器

对空气滤清器结构完善性的评价可采用各种不同的特征值：空气净化系数 K_a 或灰尘通过系数 K_n ，空气滤清器的流体阻力 Δp ，到技术保养前滤清器的工作时间 t 或者灰尘的容量。

空气净化系数 (%)

$$K_a = (G_2/G_1)100$$

式中 G_1 和 G_2 ——分别为进入到空气滤清器中的灰尘量和被空气滤清器挡住的灰尘量。

也可采用灰尘通过系数(%)来表征空气净化度的有效性

$$K_{\pi} = (G_3/G_1) \times 100 = [(G_1 - G_2)/G_1] \times 100 - K_0$$

式中 G_3 ——通过空气滤清器的灰尘量。

在现代的复合式空气滤清器中, K_{π} 可达0.01%。单级干惯性空气滤清器的 K_{π} 值较大, 这种滤清器挡不住细小颗粒的灰尘。

空气滤清器(又称空气净化器)在发动机的进气管道中产生一定的空气运动阻力。空气滤清器前(大气压力)、后的压差 Δp 表征了空气滤清器流体阻力特性。

Δp 的值取决于空气滤清器的类型和空气净化度的大小。

汽车发动机空气滤清器允许的流体阻力(kPa)为

汽油机	5.0
柴油机	3.5~4
增压柴油机	4.5~5
拖拉机柴油机	< 7

进气管道流体阻力的提高将导致发动机气缸充量系数的降低, 因而, 也导致发动机功率下降和燃油消耗量的提高。试验研究表明, 在空气滤清器的流体阻力增加到某一值 Δp_{np} (该值被称为允许流体阻力值) 之前, 发动机的工作指标变坏得比较缓慢(几乎是线性的), 超过该值, 指标显著下降。根据发动机的类型及其强化的程度来选择 Δp_{np} 值。在部门标准或规范中对初始流体阻力 Δp_{nv} 及允许阻力 Δp_{np} 值都有规定和限制。

允许流体阻力值确定空气滤清器在技术保养前工作的时间及其灰尘量。滤清器的工作时间以小时来表示, 而灰尘量以达到允许流体阻力以前所挡住的灰尘量以kg来表示。对汽车发动机而言, 以汽车行驶公里数来确定空气滤清器技术保养的周期。滤清器的灰尘量取决于空气滤清器的类型、结构参数和空气的含尘量。

对各种用途的柴油机来说, 空气的平均含尘量(mg/m^3)为

船用	
海上主机	0.5~2
海上辅机	1.5~4
内河船机	2~20
固定式	
室内放置	1~5
露天场地放置	4~10
机车用	2~80
石油钻探装置用	5~30
道路建筑机械用	10~1000
移动装置用	50~1000或更大

滤清器的技术保养包括更换机油和清洗湿式机油惯性空气滤清器的滤芯, 清除旋风器的集尘器的灰尘及滤清器壳体的尘土, 用压缩空气来吹干式滤芯(其办法是工作时沿着空气运动相反的方向进行, 如果干式滤芯是耐湿的, 也可用水来清洗)。单级空气滤清器的厚纸板滤芯一般用新的去更换。在重复使用干式滤芯时, 滤清器的流体阻力大于开始时, 所以到下

一个技术保养的周期缩短。

空气滤清器的主要相关特性是灰尘量和空气净化程度，空气滤清器的正确选择决定发动机的可靠性和耐久性，以及降低发动机在使用维护方面的消耗。在空气净化程度不足的情况下，发动机将产生早期磨损，而净化程度增大虽可降低灰尘量，但定期保养周期缩短，从而提高了使用成本。

目前，滤清材料广泛地采用厚纸板。厚纸板的采用是以尽量提高发动机的寿命和力图缩短空气滤清器技术保养的时间及减少劳动量为前提的，因为发动机的强化，实际上只有在完全防止灰尘落入发动机的情况下才有可能达到。

过滤的厚纸板应该具有最小的空气运动阻力、均匀的多孔性、抗水性、对断裂和挤压有足够的强度及刚度等。为了满足后者的要求，厚纸板要做成波纹皱褶和横向贴紧。具有沿着外径和内径布置的带孔的圆筒环形波纹皱褶部分，从两端用环氧树脂混合物、专门的树脂或塑料浸泡封好。最后在不带附加垫片下能保证良好密封。波纹皱褶之间的节距根据试验确定应能保证最大的灰尘容量。

根据苏联国家标准 ГОСТ 12627—80，对新设计的拖拉机和联合收割机用的柴油机，不允许采用带有机油盆的空气滤清器。

ΠKB 型厚纸板被更广泛地采用，这种厚纸板是以棉花和聚乙烯醇树脂为主要原料制造而成。厚纸板有带曲线沟槽（空隙）的纤维构造，空气沿着该沟槽运动。灰尘颗粒在其与厚纸板的纤维挂住的情况下发生沉淀。大颗粒沉淀在厚纸板的表面上，而小颗粒在缝隙内改变运动方向时，由于惯性力的作用沉淀在内部纤维上。因为大颗粒的惯性力比小颗粒大，所以，在外纤维上沉淀大颗粒，而在内纤维上沉淀小颗粒。

在滤芯的表面上还会形成一层灰尘的结合层，结合层也具有滤清的性质。而且在这种结合层上，随着时间增长，缝隙的尺寸会逐渐小于厚纸板的缝隙尺寸，所以清除灰尘的有效性有所改善（通过系数减小），但同时增加了滤清器的阻力。由于灰尘颗粒在其表面上的沉淀，在缩小缝隙的情况下也增加了空气滤清器的阻力。同时，象烟、不完全燃烧产物、烟黑等污染大气的排放物不会附着在多孔滤芯元件的表面上，也不降低滤芯的灰尘容量。在空气中出现极小的水珠就可使厚纸板的滤清性能变坏。

具有厚纸板滤芯的空气滤清器，除了初始阻力低和具有比较大的灰尘容量外，还有高而稳定的净化有效性。

目前，滤芯所用的滤清材料都是非编织品，是以聚酯合成纤维为基础的滤清材料。这些材料在干燥的和潮湿的空气中是等强度的，而且耐热，疏水，以及耐侵蚀性介质、微生物和细菌的腐蚀。但是，非编织品滤清材料的灰尘容量，比厚纸板低。

在发动机使用的情况下，在空气含尘量较低和中等的条件下，可采用具有厚纸板滤芯的单级空气滤清器，而在含尘量较高和高的条件下，要附加安装惯性离心式预净化器。预净化器可以是单级除尘器或者是多级除尘器。后者有较大的灰尘容量，但是其结构比较复杂，保养的劳动量大。

图 1 为卡特皮勒公司拖拉机的干复合式空气滤清器。它由单级旋风除尘器 1（第一级滤清）和可更换的厚纸板滤芯 5（第二级滤清）组成。在单级旋风除尘器中，空气的旋转运动是由导向片 3 建立起来的，使灰尘的颗粒沉积在沉淀斗 2 中。单级旋风除尘器能更有效地滤清空气中的大颗粒灰尘。单级旋风除尘器的通过系数为 40%~50%。在第二级滤清的壳体中

心安装有小面积保护厚纸板元件 4，该元件不拆下，也不进行保养。保护元件的功用在于防止在主要滤清元件破裂时或者密封处漏气时，灰尘的磨料颗粒落入发动机。滤清器的通过系数等于 0.01%，阻力达 $\Delta p_{np} = 6 \text{ kPa}$ 以前，灰尘容量为 3.38 kg，在标定空气消耗的情况下初始阻力等于 1.8 kPa。

从多级旋风除尘滤清器的沉淀斗中自动排尘要采用喷射器（图 2 所示）。在 CMД-14 发动机的空气滤清器的喷射器中（图 2a），灰尘空气混合气的吸出用排出的废气来进行，通过导向片 1 使排出的废气具有旋转运动，为了改善火花灭火器 2 的工作这是必需的。图 2b 为 K-700 拖拉机发动机上安装的空气滤清器的喷射器。该喷射器的显著特点是用压缩机供给部分空气来实现排除灰尘。

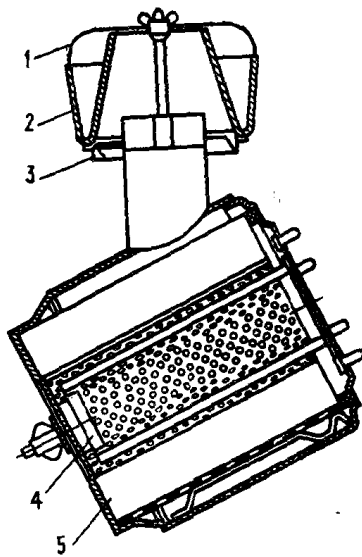


图1 卡特皮勒公司拖拉机的空气滤清器
1—单级除尘器 2—沉淀斗 3—导向片 4—保护厚
纸板元件 5—厚纸板滤芯

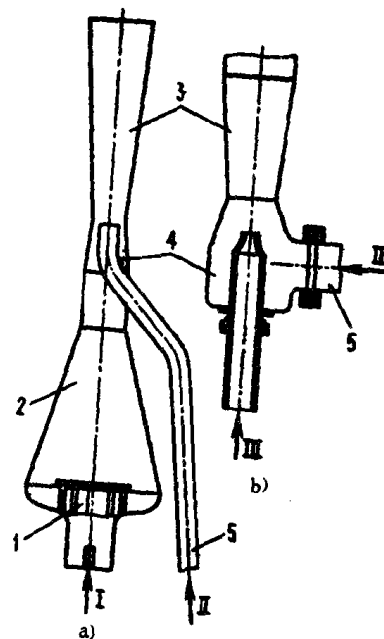


图2 从拖拉机多级除尘空气滤清器
吸出灰尘的喷射器

a) CMД-14 发动机上有火花灭火器的喷射器
b) K-700 拖拉机的喷射器
1—导向片 2—火花灭火器 3—扩散管 4—混合室
5—灰尘吸出管 I—排出的废气 II—吸出灰尘
III—由压缩机来的空气

为了确定空气滤清器的保养时间和检查其技术状态，在国外采用了允许流体阻力指示器。图 3 所示出的巴哈尔公司机械式指示器由与弹性膜片 3 连接的活塞 6 组成。根据空气滤清器阻力增长的程度，真空度传到膜片上部的空间，并使活塞 6 向上升起。着色活塞出现在壳体 4 的检查窗口上，就证明空气滤清器达到允许的流体阻力。在滤清器保养之后，指示器通过杠杆 5 重新返回初始状态。

如果滤清器装有保护滤清元件，那么，允许流体阻力指示器可以发出关于连接件密封破坏和厚纸板滤芯破裂的信号。在这种情况下，由于保护元件表面的面积小，其空气运动的阻力突然上升。指示器可用于含尘量不同的各类地区的空气滤清器上，并能在空气滤清器技术状态不正常的情况下告诉使用者不要使用发动机。

具有厚纸板元件的空气滤清器与其它类型滤清器相比,通常有较大的容积。例如,在用具有单级旋风和厚纸板元件的空气滤清器代替拖拉机发动机湿惯性滤清器时,前者的体积比后者约大50%。而且使大功率柴油机滤清器的组合产生一定的困难,尤其是机车柴油机。所以对大功率的发动机来说,广泛采用机油惯性和湿式旋流滤清级的空气滤清器。图4示出了机车发动机的机油惯性空气滤清器。这种滤清器的通过系数在流体阻力为 $1.5 \sim 1.8 \text{ kPa}$ 时近似等于1.5%。这种滤清器的缺点是空气流会带走机油。

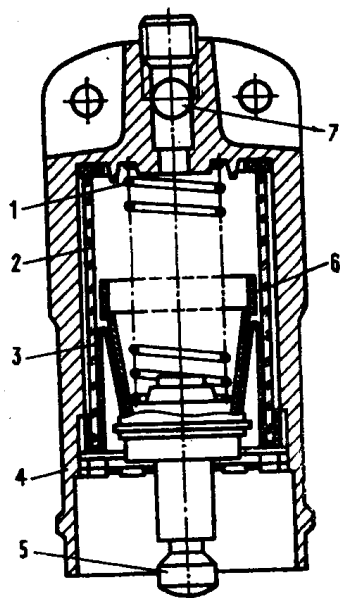


图3 允许流体阻力指示器

1—弹簧 2—检查窗口 3—膜片 4—壳体 5—杠杆
6—活塞 7—供应空气的孔

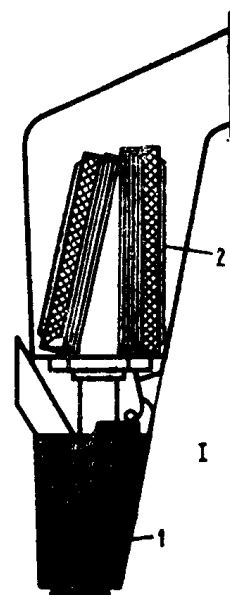


图4 机车发动机的机油惯性空气滤清器
1—机油盆 2—滤芯 I—从车身来的空气

但是,采用多级旋风除尘带厚纸板圆筒滤芯的空气滤清器还是有利的。例如,石油钻探装置采用的6CH21/21发动机的空气滤清器,在污染度大以及在空气中存在机油和烟黑颗粒的情况下,无需保养可以工作1000h。这时, $\Delta p_{np} = 6.8 \text{ kPa}$, 而空气滤清器通过系数为0.1%。

对大功率发动机采用隧道式扁平滤清器更方便(图5),这种扁平滤清器对于布置波纹皱褶滤清厚纸板具有大的表面积。在国外的实践中,隧道式的滤清器供大功率发动机上采用,其中包括用于机车和燃气涡轮发动机上。

目前,还没有确定空气滤清器特性的理论方法,因为灰尘空气混合物空间流动的问题无论是在理论上,还是在计算方面都很复杂。现有的计算方法在很大程度上是建立在试验数据的基础上并把物理过程理想化后给出的结果,这对评价质量是有用的,但是这种结果需要用试验修正。

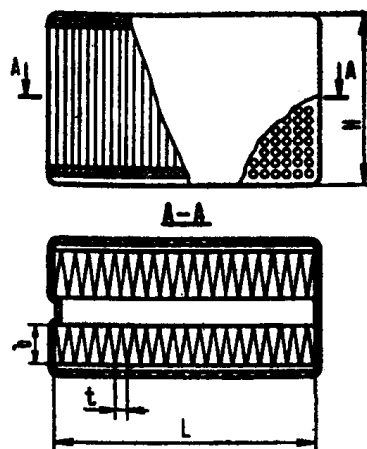


图5 隧道式空气滤清器组