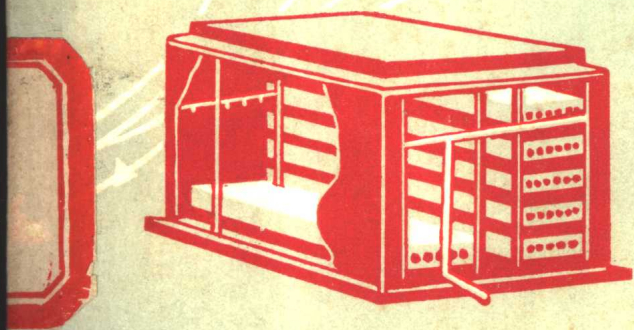


[苏]A.A.利亚赫 3.M.多尔基 著 林方辉 曹建华 译

热介质 定向循环 养护室

——
钢筋混凝土
蒸养工艺的
改进



中国建筑工程工业出版社

热介质定向循环养护室

——钢筋混凝土蒸养工艺的改进

[苏] A.A. 利亚赫 Э.М. 多尔基 著
林方辉 曹建华 译

中国建筑工业出版社

本书叙述了在热介质有组织循环的条件下，装配式钢筋混凝土制品湿热养护的原理。书中介绍了 ПДК-КИСИ 坑式养护室的构造特点、计算方法、自动控制方案以及在各种制品的生产中采用这种养护室的技术经济指标，阐明了这种养护室与普通坑式养护室相比，具有一系列的优点，显著改进了钢筋混凝土蒸养工艺。

本书读者对象为从事装配式钢筋混凝土生产的工程技术人员，也可供大专院校有关专业师生参考。

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОПАРИВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА**

А.А.ЛЯХ, Э.М.ДОЛГИЙ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «БУДІВЕЛЬНИК»

КИЕВ—1976

* * *

热介质定向循环养护室
——钢筋混凝土蒸养工艺的改进
林方辉 曹建华 译

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京市顺义县印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：4 字数：90 千字
1982年3月第一版 1982年3月第一次印刷
印数：1—3,000册 定价：0.55元
统一书号：15040·4142

译者序

热养护是钢筋混凝土制品生产中的重要工序之一。深入研究混凝土热养护的理论，改进热养护工艺和设备对于发展钢筋混凝土制品的生产，实现建筑工业化有着很大的意义。

目前，虽然一些新的热养护方法（如红外线热养护、电热养护、太阳能热养护等）有了较快的发展，但是以蒸汽或蒸汽空气混合物作为热介质的湿热养护方法，仍然应用得很广泛。在蒸养设备中，由于普通坑式养护室构造简单，投资少，对产品品种的适应性强，所以在我国和其它许多国家的混凝土制品厂中，这种设备所占的比重仍然较大。但是，在这种养护室中，热蒸汽空气介质是处于基本静止的状态，这就给普通坑式养护室带来一些严重的缺陷：热介质沿养护室高度分层，制品的加热不均匀，热养护时间长（约12小时以上），蒸汽用量大（每立方米混凝土约500公斤以上）和难以实现自动控制等等。为了改进养护坑的热工性能，曾提出过不少改进措施，例如采用无压纯蒸汽养护室。但是根据不稳定热交换理论，利用具有高的放热强度的纯蒸汽来强化热质交换既无必要，又使配汽系统和自控系统复杂化，所以无压纯蒸汽养护室在国内外都未能普遍推广。

为了从根本上克服普通坑式养护室的基本缺陷，苏联、法国等一些国家对热介质定向循环养护室进行了试验研究，并已用于生产。在这种养护室中，热介质以强烈的多次定向

循环流经制品的所有表面，从而显著地提高了制品与介质间的热质交换强度，同时还能根据需要，方便地控制热质交换强度。生产实践表明，热介质定向循环养护室具有下述优点：完全克服了热介质的分层现象，制品加热均匀，热养护时间短（一般约缩短 $1/3 \sim 1/2$ ），蒸汽用量低（约 $150 \sim 200$ 公斤/米³混凝土），能简单而较可靠地实现湿热养护的自动控制等。

这种养护室构造简单，投资少，耗钢量少。在现有工厂中将普通养护坑稍加改造即可，而改建费用仅相当于一次小修费。根据以现有企业为基地，挖潜革新，逐步实现现代化的原则，结合我国制品厂的具体情况，因地制宜地采用这种新型养护室将获得良好的技术经济效益。此外，热介质定向循环养护的原理不仅适用于养护坑，而且在蒸压釜、立模、隧道养护窑等设备中均可予以应用。本书对于改进坑式养护室和在其它热养护设备中采用介质定向循环养护工艺有一定参考价值。

原书热工计算和热平衡计算两节中印刷错误较多，译文已作了更正，不再一一加注。

限于译者的业务水平和翻译能力，不妥之处自属难免，尚希读者指正。

序 言

装配式钢筋混凝土已被广泛地用于建筑工程的各个部门。用装配式钢筋混凝土取代整体式钢筋混凝土，在很多情况下可以大大减少材料消耗，降低劳动强度并加速施工进度。为了加速装配式钢筋混凝土的生产，首先要求加速混凝土的硬化，从而在降低成本的同时，使材料具有所需的建筑性能。为此，必要的条件是：保证硬化中的混凝土的热养护制度在热动力作用上适应混凝土结构形成的某些特点。

在研究和完善混凝土的湿热养护工作中，苏联学者С.А.米罗诺夫，И.Б.扎谢塔捷列夫，Л.А.马林尼娜，К.Б.马里扬诺夫，Л.А.谢勉诺夫，А.Б.维特库普等作出了巨大贡献。同时，本书的作者也研究了高温下混凝土硬化的基本热物理规律，指出了现有热工设备的构造缺陷，同时还阐明了装配式钢筋混凝土生产的全面技术经济指标与湿热养护过程组织得好坏之间的关系。

为了继续提高坑式蒸汽养护室的湿热养护效果，首先必须改进养护设备工作空间内热质交换过程的组织，即建立一定的湿热制度，并且能够在整个湿热养护期间控制热质交换的强度。有效地控制湿热养护过程，使我们能更客观地拟定工艺方案和估计产品质量，预先拟定热养护设备的简易热工计算方法，并在实践中加以应用。

本书叙述了在热介质定向循环条件下，混凝土湿热养护

效果的试验研究成果。这些研究成果证实了，在装配式钢筋混凝土工厂中采用新的方法来组织湿热养护是合理的。考虑到专业人员的需要，书中阐明了湿热养护和热工设备计算方法的基本原则，同时还提出了设计 ПДК-КИСИ* 坑式养护室的建议。

* ПДК-КИСИ——基辅建筑工程学院的周期作用式养护室。

目 录

译者序

序 言

一、热介质定向循环条件下混凝土湿热养护的组织	1
(一) 蒸汽空气介质中新成型钢筋混凝土制品的加热	1
(二) 蒸汽从蒸汽空气混合物中凝结时的热质传递	4
(三) 坑式蒸汽养护室的基本特点	7
(四) 热介质定向循环条件下组织湿热养护的基本原理	13
二、ПДК-КИСИ坑式蒸汽养护室的构造和计算	23
(一) 构造特点和设备	23
(二) 湿热养护的自动控制	30
(三) 硬化中的混凝土的热工计算方法	37
(四) 设计原则、热工计算、制品湿热养护时混凝土热制 度和ПДК-КИСИ养护室热平衡的计算	40
三、在热介质有组织循环的条件下, 装配式钢筋混凝土 土制品湿热养护的技术经济指标	98
(一) ПДК-КИСИ养护室的可调性	98
(二) 混凝土湿热养护制度的最佳技术经济效果	108
参考文献	119

一、热介质定向循环条件下

混凝土湿热养护的组织

(一) 蒸汽空气介质中新成型钢筋 混凝土制品的加热

在湿热养护过程中,正在硬化的新成型的混凝土经历着一系列物理-化学变化。这些变化的结果,使混凝土具有其基本性能,可于建筑工程中广泛采用。符合质量要求的钢筋混凝土制品的工业生产,在很大程度上取决于热工设备是否能对硬化中的混凝土严格实行最佳的热养护制度^[21,31,33]。而加热温度*、加热速度和加热制度以及热作用的均匀性等在这里都起着一定的作用。

在养护室内加热混凝土时,由于材料和模具的温度滞后于热蒸汽空气介质的温度,因此蒸汽会在制品和模具的外露表面上凝结。蒸汽凝结时的总放热系数^[2,3,19]可用下列两项之和来表示:

$$\alpha_k = \alpha_{k0} + \frac{r_k g_k}{\Delta t_{c, noe}} \quad (1)$$

式中 α_{k0} ——对流放热系数;

r_k ——凝结热;

g_k ——重量凝结速度,即单位时间内在单位热交换表面上凝结的蒸汽数量。

* 加热温度系指混凝土制品表面的温度,根据这一温度就能确定加热的特征。制品任一点的加热温度可按表面温度用计算方法求得。

$\Delta t_{c, nos} = t_c - t_{nos}$ ——温差，其中

t_c ——周围热介质的温度；

t_{nos} ——热交换表面的温度。

在纯水蒸汽介质中，热介质的温度等于饱和温度（ $t_c = t_n$ ），故式（1）可写成：

$$\alpha_k = \alpha_{k0} + \frac{r_k \cdot g_k}{\Delta t_{nn}} \quad (2)$$

式中 $\Delta t_{nn} = t_n - t_{nos}$

传质系数 β_p 随分压差而变，由下式确定：

$$\beta_p = \frac{g_k}{p_n - p_{z,p}} = \frac{q}{r_k(p_n - p_{z,p})} \quad (3)$$

式中 p_n ——蒸汽空气混合物基质中蒸汽的分压；

$p_{z,p}$ ——凝结面上蒸汽的分压。

式（3）表明热质交换的基本特征对其强度的影响。

在蒸汽空气介质中热养护湿混凝土时，若空气含量在较大范围内变化，而制品又直接和介质接触，则向制品表面和向制品内部的热湿迁移是相互关联的。热湿迁移的强度取决于以下因素：材料和周围蒸汽空气介质的热物理性质；温差的大小和温度的高低；热湿迁移过程的方向；制品的形状和几何尺寸；介质与制品之间热接触的程度；制品表面与周围介质相互作用的流体动力学状况；材料的物理化学性质等等

[15, 16]。

考虑这些过程的相互影响，阐明温度场产生不对称性的各种情况（图1）及其对硬化中混凝土结构形成的影响，消除其不利后果，所有这些都对蒸养中的混凝土能否取得必要的建筑性能起着决定性的作用[4, 6]。因此，在养护室的全部空间内和在整個热处理过程中，对硬化中的混凝土保持热作用的均匀性和预期强度具有特别重要的意义，而这些都取

决于湿热养护和外部热质交换过程组织得怎样。

在一般情况下，热质迁移运动状态取决于周围蒸汽空气介质与制品相互作用的流体动力学状况、介质的组成、制品的几何形状和尺寸，还取决于制品相对于蒸汽空气混合物气流的方向以及其它因素。

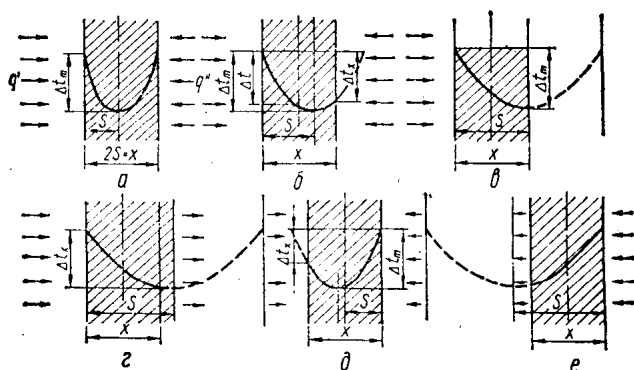


图 1 不同热流情况下混凝土加热层断面的温度分布

μ —加热的不对称系数； S —加热层的计算厚度； x —混凝土的实际厚度($S=\mu x$)

a —对称加热($q'=q''$, $\mu=0.5$)； $б$ —两面受热不同造成的不对称加热($q'>q''$, $\mu=0.5\sim 1.0$)； $в$ —单面受热(另一面为热绝缘, $q''=0$, $\mu=1.0$)； $г$ —置于养护室地坪上的制品所特有的受热情况(一面加热而另一面冷却, $q'>q''$, $q'<0$, $\mu>1.0$)； $д$ —与 $б$ 的情况类似, 但为 $б$ 的镜像($q'<q''$, $0<\mu<0.5$)； $е$ —与 $в$ 的情况类似, 但为 $в$ 的镜像($q'<q''$, $q'<0$, $\mu<0$)($д$ 和 $е$ 产生于制品冷却, 例如养护室敞开时)

在高温下硬化的混凝土，其温度场和湿度场变化的数学描述是复杂的；外部传热和伴随胶凝材料水化而产生的内部热源的增长情况，其数学描述也是复杂的，这就给湿热养护制度的计算工作造成相当大的困难^[1,20]。因此，在分析硬化中的混凝土的热制度时，就必须研究热质交换过程的简

化模型。

(二) 蒸汽从蒸汽空气混合物中凝结时的热质传递

外部热交换强度取决于水蒸汽的凝结强度。纯水蒸汽的凝结强度由放热速度来表征，而不必考虑蒸汽质点向凝结表面的流动速度。但当蒸汽中含有少量的不凝气体（空气）杂质时，蒸汽质点由其基质向热交换表面移动的速度则对凝结

强度产生巨大的影响。在这种情况下，就出现了与质迁移过程有关的相当大的“外热阻”。

因此，当蒸汽在表面上凝结成水膜时，凝结强度由两个伴生过程（蒸汽质点由其基质向凝结表面移动及其放热）的进行速度来确定。这样，冷却

表面外侧的热阻 $R_c = \frac{1}{\alpha_c} (\alpha_c - \text{热介质对壁面的放热系数})$ 一般也可用下列两项热阻之和来表示（图 2）：

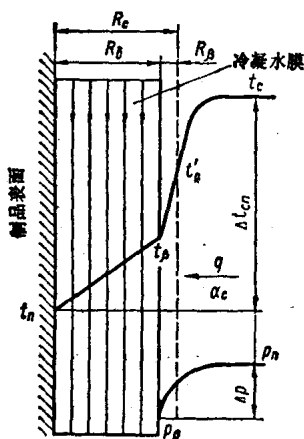


图 2 蒸汽空气混合物中蒸汽凝结成膜时的温度分布

$$R_c = \frac{t_c - t_{nos}}{q} = R_B + R_B \quad (4)$$

式中 t_c, t_{nos} ——热介质和表面的温度，以 $^{\circ}\text{C}$ 计；

q ——比热流，以千焦耳/米 2 ·小时计*。

R_B ——被加热物体表面形成的凝结水膜的热阻值。

* 本书中基本上采用国际单位制，但在某些引用资料中仍用工程单位制。两种单位制的换算请参考有关资料——译者注。

R_δ 表示外热阻，它是考虑了蒸汽质点向凝结水膜表面迁移的速度而确定的。应当指出，这一“热阻”并非通常所理解的假定有热迁移的热阻。所以，把 R_c 也称为热阻是假定的，因为它的确定方法和被冷却介质无集态变化时的确定方法，只是纯粹外表相似而已。只是在个别情况下，即 $R_\delta \ll R_c$ 时，这一假定实际上才失去意义。此时 $t_o \approx t_c$ ，并且

$$R_c = R_\delta = \frac{t_c - t_{nos}}{q} \quad (5)$$

式中 t_c ——凝结水膜自由表面的温度，以 $^{\circ}\text{C}$ 计。

$R_\delta \ll R_c$ ，即蒸汽质点的流动速度不影响凝结强度的假设，通常被用作纯蒸汽膜状凝结的理论基础。

当蒸汽中甚至只含少量空气（或其它不凝气体）杂质时，不凝气体的存在也会对蒸汽流向凝结表面的速度（即放热强度）产生很大的影响。图3, a 为 C. C. 库塔捷拉泽^[2]整理的以曲线图形表示的某些研究者的试验结果：

$$\frac{\alpha_c}{\alpha_{n,o}} = f(\chi)$$

式中 $\alpha_{n,o}$ ——纯蒸汽放热系数；

α_c ——混有空气的蒸汽放热系数；

$$\chi = \frac{\varepsilon_s}{1 - \varepsilon_s} = \frac{\rho_e}{\rho_n} \quad \text{混合物中空气与蒸汽的比例。}$$

当蒸汽空气混合物与温度较低的表面接触时，蒸汽开始在它上面凝结，在临近表面的混合物层中，空气的相对含量增加，在产生凝结膜的地方，蒸汽的温度和分压降低，而空气的分压则变得高于混合物基质中空气的分压。在这种情况下，蒸汽质点向表面流动是由于分子扩散或紊流扩散的结果。这时，蒸汽的质迁移机理以及蒸汽和空气分压在垂直于凝结表面方向上的分布，取决于流体动力学状况。

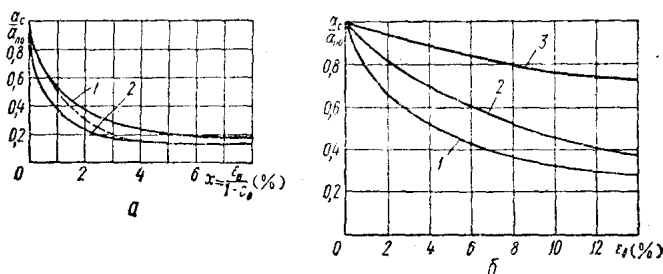


图 3 蒸汽凝结时相对放热系数值与蒸汽中空气含量* (图 a) 和混合物中空气含量 (图 b) 的关系

图 a 曲线 1—按 Л. 奥特勉尔的资料; 曲线 2—按 B. A 古捷姆丘克和 E. 兰耿的资料; 图 b— $\Delta t_{c,n}=10^\circ\text{C}$; 曲线 1— $p_n=0.81$ 公斤力/厘米²; $\omega_p=0.3$ 公斤/米²·秒; 曲线 2— $p_n=0.89$ 公斤力/厘米²; $\omega_p=0.3$ 公斤/米²·秒; 曲线 3— $p_n=0.81$ 公斤力/厘米²; $\omega_p=6.5$ 公斤/米²·秒。

蒸汽空气混合物的运动速度明显地影响 $\frac{\alpha_c}{\alpha_{c0}} = f(x)$ 这一关系式的特征, 也即明显地影响由于混合物中空气含量增加而引起的放热系数的相对变化关系 (图 3, b)。实际上, 在 $R_c = \frac{1}{\alpha_c}$ 的两项分量中, 外热阻 R_b 主要是由传质系数 β_p 决定的, 而热阻 R_0 则是由凝结水膜的厚度及其流动特性决定的。所以, R_b 取决于流体动力学状况, 其中包括混合物的运动速度; 而如果不考虑 R_b 对 R_0 的间接影响, 则“外部”流体动力学状况对 R_0 的影响, 仅表现在流动的混合物对凝结水膜 (当其流动性质不变时) 厚度起作用的大小这一点上。因为随着混合物中空气含量的增加, 包括 R_b 的总热阻也显著增大, 故当过程的其它参数不变时, 提高混合物的运动速度将导致如下结果: 混合物中空气含量越高, 则 α_c 值相对地增

* 原文为空气中蒸汽的含量, 应为蒸汽中空气的含量。图 3, a 的横座标应在 $x = \frac{s_0}{1-s_0}$ 之后加 % ——译者注。

加得越多。

所以，在其它条件相同时，混合物中空气含量愈大以及它沿热交换表面运动的速度愈高，则蒸汽凝结时的热交换也愈强烈^[8]（表1）。

蒸汽空气混合物放热系数与纯蒸汽放热系数之比 表 1

混合物中空气 含量的百分率	混合物的质量流速 $(\omega_p)_c$ (公斤/米 ² ·秒)			
	0	0.3	2.0	6.5
1	0.42	0.7	0.88	0.96
2	0.3	0.62	0.83	0.94
3	0.2	0.55	0.78	0.91
4	0.18	0.5	0.74	0.88
8	0.12	0.38	0.63	0.8
12	0.1	0.32	0.56	0.74

通常，曲线 $\frac{\alpha_c}{\alpha_{n,0}}=f(\lambda)$ 的特征不但取决于混合物的流速，也取决于养护过程的其它参数。随着混合物重量流速 $(\omega_p)_c$ 和温度 t_c 的提高即蒸汽分压 p_n 的提高，以及温差 $\Delta t_{c,nos}=t_c-t_{nos}$ 的缩小，曲线分布更为平缓，而且随着 $(\omega_p)_c$ 的提高，这些曲线越加明显地向上偏斜。

因此，由于有可能控制外部热质交换过程并考虑湿热养护各阶段中这些过程的特点（湿热养护的各阶段均以含不凝气体的混合物中蒸汽凝结时热质交换的客观规律为依据），我们就能有目的地去控制蒸汽混凝土中温度场的发展，以获得混凝土所需的建筑性能^[14,21,35]。

（三）坑式蒸汽养护室的基本特点

改进坑式养护室的结构，包括安装带冷凝器的回汽管，

用液压水封改装密封系统，采用通用的养护室墙和顶盖，以及使装配式钢筋混凝土生产企业实现湿热养护的自动控制，所有这些都会大大改善热工设备的工艺指标和技术经济指标。这时，养护室的密封性提高了，并且有可能在养护室的室内保持恒定的静压力。此外，还大大减少了载热体逸出的热损失和坑壁的蓄热损失。工艺过程机械化和采用自动控制可减少非生产性的时间消耗，调整硬化中的混凝土在有效热作用阶段的蒸汽用量，按预定计划保持硬化中的混凝土在升温及恒温养护阶段应有的持续时间和温度，所有这些措施都可全面提高新成型制品湿热养护工艺的效率。

但是，上述措施实际上并未影响到如何组织蒸养设备空间中的热质交换过程。由于蒸养设备有缺陷，就不能对蒸养制品进行快速而均匀的加热，不能给硬化中的混凝土的合理结构形成创造必需的条件，也不能改进养护室的工艺特性。总之，不能调整养护室空间的热质交换过程，就会给湿热养护的技术经济指标带来不良影响。

给设备工作空间供汽的常用方法是采用非强化汽流，这种汽流是通过沿养护室下部周边布置的蒸汽管上 $d=3\sim 5$ 毫米的小孔流出的。这种供汽方法决定了湿热养护实际上是在不流动的蒸汽空气介质中进行，并且引起热介质沿着养护室高度分层——蒸汽在上部，空气在下部。这种现象特别表现在蒸养开始阶段的深养护室中。这时，沿养护室高度的温差可达 $25\sim 30^{\circ}\text{C}$ 。

此外，在运行过程中供汽孔还常常堵塞，破坏湿热养护的正常进行。因此，有时就采取普通供汽管向室内集中供汽。这种供汽管多半布置在养护室的一角，并且方向朝下。在这种情况下，由于蒸汽流的动能所造成的混合作用，同时

还消除了介质的分层现象。但是，局部的任意扰动实际上不但不能减少介质沿养护室高度的分层，还会在水平面上造成温度场的额外不均匀性，以致更加恶化了湿热养护的质量。

图4所示为空心墙板蒸养一小时后介质温度的测量结果。对这一资料作出的比较说明，按不同供汽方法和供汽强度绘制温度曲线时，沿养护室高度的温差变化不大，约为 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 。因为养护室工作空间各部分的静压力实际上没有变化，所以当蒸汽以非强化汽流从蒸汽管的供汽孔流出时，它不流过制品的横向工艺孔洞和制品间的空隙，而集中于养护室的上部。由于制品孔洞中和制品间的空气的绝热作用，大大地阻碍了与空气相接触的表面的加热过程，成为混凝土加热不均匀的原因（图5）。在这种情况下，蒸汽首先是给养护室的围护结构加热。

在制品的工艺孔洞以及在制品间隙中形成停滞的“气囊”，极大地影响到热质交换的进行，但这种影响实际上并未受到注意。

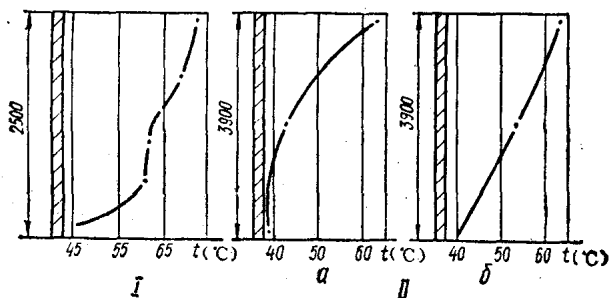


图4 湿热养护一小时后介质的温度沿养护室高度的分布情况

I—集中供汽；II—通过蒸汽花管供汽； $a-\tau_1+\tau_2=5+2$ 小时；

$G_n=285$ 公斤/小时； $b-\tau_1+\tau_2=3.5$ 小时； $G_n=500$ 公斤/小时