

美国石油工程师学会专论丛书

热力采油

〔美〕M. 帕拉茨

石油工业出版社

序 言

热力采油是一个内容很广泛的题目，它涉及到地面和地下设备、油藏特性、固体和流体的热力特性、驱替过程、油藏机理以及油藏工程和设计工程。本书的重点放在描述各过程的油藏方面的问题。其它方面只作比较扼要的讨论。

热力采油是一个活跃的领域。由于它属能量密集型的技术范畴，所以为了降低燃料和其它生产费用，以及提高采收率和总的经济性，是有许多工作可做的。技术发展正在急剧地变化，因此在某些方面本书可能显得有点过时。

在本书编纂过程期间，对下面两点意见曾引起注意。其一是把历史特色奉献给读者。有一些人认为，对壳牌石油公司的贡献没给予足够的评价，特别是热采工艺早期开发期间；而另一些人看法却相反。我只不过利用我最熟悉的和足以说明论点的参考资料。根据材料，我的观点是，壳牌石油公司在热采工艺方面过去是（恐怕现在仍是）第一流的。其二是关于火烧油层在本书中篇幅长短问题，有些人认为按重要性来说该部分内容不相称。实际上，几种燃烧过程的反应及其结果不同于其它热力采油过程，因此整个题目值得详尽地予以介绍。

M.帕拉茨 (Michael Prats)

加拉加斯 1982年4月

目 录

第一章 引 言	1
第 1 节 本专著的范围.....	1
第 2 节 本专著的对象.....	1
第 3 节 热采的早期历史.....	2
第 4 节 潜在的重要性.....	6
第 5 节 本专著的结构.....	7
第 6 节 符号和单位.....	8
参考文献.....	10
第二章 各种热力采油方法	13
第 1 节 热力采油的必要性.....	13
第 2 节 注热流体.....	19
第 3 节 火烧油层.....	24
第 4 节 热力增产.....	28
第 5 节 各种热采方法的比较.....	31
参考文献.....	33
第三章 多孔介质中传热传质的物理和数学描述	37
第 1 节 概念和定义.....	38
第 2 节 传热机理.....	41
第 3 节 能量平衡方程的一般形式.....	45
第 4 节 传质机理.....	47
第 5 节 连续性方程.....	52
参考文献.....	65
第四章 油藏工程的若干概念	67
第 1 节 油藏模拟.....	67
第 2 节 前缘推进(FA)模型与旁通(Bypass)模型的区别.....	71
第 3 节 动态预测基础.....	78
第 4 节 井间的流动阻力.....	81

第5节 理想化的过程设计.....	37
第6节 热油	88
参考文献.....	89
第五章 油层的加热	91
第1节 油层的有效容积热容.....	92
第2节 等热流输入条件下当量受热容积的增长	95
第3节 变热流输入条件下当量受热容积的增长	105
第4节 产液带走的热损失.....	109
第5节 讨论	115
参考文献.....	120
第六章 热水驱	123
第1节 驱替机理.....	124
第2节 性能预测.....	131
第3节 设计	156
第4节 现场应用实例.....	157
参考文献.....	159
第七章 蒸气驱	162
第1节 驱替机理.....	162
第2节 蒸气前缘的稳定性.....	166
第3节 性能预测.....	170
第4节 蒸气驱的设计.....	186
第5节 现场应用实例.....	193
参考文献.....	197
第八章 火烧油层(就地燃烧)	200
第1节 燃料	200
第2节 氧气和燃料的反应.....	206
第3节 动力学.....	213
第4节 干式向前燃烧法.....	219
第5节 湿式燃烧.....	233
第6节 反向燃烧.....	250
参考文献.....	252
第九章 循环注蒸气和其它热力增产方法	259
第1节 循环注蒸气.....	259

第2节 其它的循环注入过程	275
第3节 井筒加热	276
参考文献	284
第十章 地面和地下管线的热损失	287
第1节 地面管线的热损失	288
第2节 井筒热损失	295
第3节 井筒中的温度分布	305
第4节 蒸气干度随深度的变化	310
参考文献	314
第十一章 设备、运行问题及监测	316
第1节 地面注入系统	318
第2节 油井	326
第3节 地面生产设备	340
第4节 监测措施	342
第5节 运行问题	351
第6节 卫生与安全	359
参考文献	360
第十二章 热采油藏的评价	368
第1节 经济性	369
第2节 岩石、油层和流体性质	379
参考文献	387
第十三章 中间(规模的)试验	390
第1节 中间试验的目的	390
第2节 设计依据	391
第3节 中间试验设计	398
第4节 中间试验的动态评价	408
第5节 扩展区动态的预测	416
参考文献	417
第十四章 其它方面的应用	419
第1节 煤的地下气化	419
第2节 油页岩的地下采收	425
第3节 加热油藏的其它方法	431
参考文献	437

第十五章 热采的现状和潜力	442
第1节 目前发展水平	442
第2节 主要问题和研究方向	445
第3节 社会影响	447
第4节 潜在的重要性	448
第5节 新领域	451
参考文献	452
附录A 精选的换算系数	456
附录B 物质的数据和特性	460
第1节 密度和PVT性质	461
第2节 压缩系数(压缩率)	473
第3节 热膨胀系数	487
第4节 粘度	493
第5节 焓和比热	508
第6节 导热系数	527
第7节 热扩散系数	539
第8节 传热系数	540
第9节 油管和套管特性	555
第10节 其它	555
参考文献	556
术语表	561

第一章 引言

第1节 本专著的范围

本专著的主要目的是介绍热力采油的目前发展水平。它作为热采的基础材料，通过讨论和解释，就可能提出适用各种情况的看法。热采的定义是：将热量有计划地注入到有机化合物的地下聚集区，从井里采出原油。据我所知，这个定义包括了用热力方法从地下开采原油和可燃性气体的已实施的和建议的所有方法。

自1865年以来，已发表了成千上万篇关于向油层注入热量来提高采收率或加速采油速率方面的论文。本专著阐述的是一系列业已采用或正在采用的用热能解决或改进与采油有关的各类问题。比起其它采油方法，人们有时优先采用热采有许多原因。对于目前大家最关心的稠油来说，常用热量能提高它的驱替效率和采收率。随着温度上升，原油的粘度下降，这不仅可使原油畅流，而且可获得较好的流度比。本书着重阐述油层常规热采方式，诸如燃烧、注蒸汽、注热水和注热气，并全面详尽地研究这些方法在油藏的运用。有一章论述非常规热采方法的运用，以及用于煤和油页岩的已经认真研究过的革新方法。还有几章或其中若干部分简要地讨论运用问题、完井、地面设施、污染、卫生、安全、以及经济性等经挑选过的若干专题。

第2节 本专著的对象

本书唯一的任务是对热采的基本知识、工程预测和实际作一简明而有效的介绍。虽然热采有些方面难以用简单的术语解释清楚，但作者将尽力使读者理解。特别是数学表达式常常难以被不

熟悉其物理意义的人所理解，但数学表达式却是本书不可缺少的内容。本书将对工程师，尤其是负责油田工程各方面设计和管理的油藏工程师有所裨益。同时，也希望本书的某些部分对常年负责项目管理和维修的人员有所帮助。

了解在热力驱替过程中的各种机理以及了解油层和流体的特性，对热采工程的选择、设计、管理、维护和解释是很重要的。这一点是前提。因此，对关键的概念要进行详尽的讨论，有时要借助于数学，但更多的是用系统的物理和化学概念来描述。总结和分析热采现场经验，并与特性预测结果进行对比。有计算的实例。其中有求定温度对流体和油层特性影响的计算步骤。

本专著旨在为工程师们作热采初步设计时提供必要的资料，但并不提供解决特殊问题的特殊方法。读者可从本书找到一些关于处理特殊问题的较为详细的讨论；已公开的参考文献，或有益于规划、补充、解释现场运行等方面的资料。本书并不是为专门研究人员或真正的专家而写的，但他们像其他一些人一样，可把本书看作为热采方面资料的来源，也可以用它来查阅狭窄专业领域以外的资料。

第3节 热采的早期历史

把热量注入油层最早的方法是用井下加热器。最早的参考资料之一是1865年珀赖（Perry）和瓦纳（Warner）发表的专利^[1]。用井下加热器的主要目的是降低原油粘度，提高稠油产量，但有时也用来使原油在高于倾点温度下流向地面，清除或防止象石蜡、沥青这样的有机固体的形成和沉积。由于使用井下加热器和相当的热流体循环系统只对生产井井身及附近的地层有作用，因此实际上与增产、修井和预防性处理措施有关。目前在世界上有的地方仍然使用着燃烧器、井下电加热器、热流体间歇注入生产井以及热流体循环等井下加热的方法。奈尔森（Nelson）和姆克尼尔（McNiel）^[2]关于热采发展的叙述中和在美国石油工

程师协会的《石油工程史》的文章中^[3]强调的早期井下加热器的应用，近年来已日趋减少。

二十世纪初叶，使用了注空气火烧油层方法来提高采收率。1917年刘易斯 (Lewis)^[4]曾报道了在注气项目的气体分析中，与氮的浓度相比，氧的浓度是不足的 (表1—1)。二氧化碳浓度也很低，这可能表示原油的氧化，而不是很好的燃烧，这种氧化方法确实要放热。刘易斯指出：

空气—气体中过量的氮，可能是由于注入空气穿过油层，氧气被抽提的结果，而不是得到氮气……空气中成分的变化大部分是由于氧和油之间，或与其它地下物质化学反应造成的。当空气穿过油层时，由于较大部分的氧被原油吸收，也可能部分地造成这种变化。

然而，那些情况下 (假如事实上存在的话) 产生的热量不是这里所定义的热采过程，因为人们没有明显的意图在油层产生和使用这种热量

表 1—1 注空气工程中排出气体的成分 (体积百分数) ①

气体成分	油 砂 层 名 称			
	First Cow Run	Mitchell	Macksburg500	Pecker
二氧化碳	1.07	1.20	0.70	4.60
氧 气	19.40	4.30	16.80	12.90
氮 气	76.69	73.70	78.00	75.60
烃 类	2.84	20.80	4.50	6.90

①该工程在阿伯拉契亚 (Appalachia) 的浅层油田 (350至700英尺)。

早在1920年瓦尔科特 (Wolcott)^[5]和霍华德 (Howard)^[6]就意识到，油层地下燃烧过程的关键 (包括将空气注入到油层) 是燃烧一部分原油以产生热量和降低粘度，同时产生驱替原油的驱动力。这种认识在1923年最终成了专利。第一批大规模地下的火烧试验是1933年在苏联进行的^[7]。但这批试验是在薄煤层中进行

的，就是现在所说的煤的地下气化过程。有些人不把它看成热采，但它完全符合本章开头关于热采的定义。最先在油层采用这种方法的也是在苏联，那是在1934年^[9]。但第一次试验后，这样的试验经过了十年后才又进行。

美国第一次火烧油层是1942年在哈特曼 (Hartman)^[9]大力倡导下才开始的。虽然当时的目的是将井下换热器900°F的热量辐射至伯特勒斯维尔 (Bartlesville) 油田北部的出水层 (在美国俄克拉荷马州)，而不是向油层注入加热后的空气。但是头十天在距离660英尺井处的反应情况清楚表明，热空气已进入油层，在注入空气量增大，原油 API 比重增大以及温度提高的同时，附近几口井的产量有了提高，所有这一切均是火烧油层过程的特征。这以后的两年内在阿德莫 (Ardmore) 地区第二次试验时，哈特曼才懂得了他是将热空气注入油层。

今天我们知道，在美国火烧油层发展十分迅速。昆 (Kuhn) 和科赫 (Koch)^[10]的实验室研究，其研究论文发表于1953年。格兰特 (Grant) 和沙兹 (Szasz) 接着在1954年也发表了研究成果^[11]。他们观察到一个移动的热波，也就是留在燃烧区后的热量被注入的冷空气带向下游。这些早期的报告发表后，接着又有了一系列的技术论文。在后来发表的论文中，有一篇是威尔森 (Wilson) 等人^[12]写的，论文引入了有次序连续的油和蒸汽区的概念。代兹 (Dietz) 和怀代马 (Weijdemans) 的论文^[13]阐述了注水和注空气是如何大大提高格兰特和沙兹发现的火烧油层的热量利用率的。

现在我们已经知道燃烧的三种主要方式：向前干式燃烧，反向燃烧和湿式向前燃烧。当燃烧前缘与空气流运动方向相同或相反，分别称为向前或反向燃烧。除极个别的例外，大部分早期现场应用火烧油层是在美国。

最早采用蒸气驱是1931年至1932年在得克萨斯州伍德森 (Woodson) 附近的威尔森和斯旺 (Swain) 两个油矿中18英尺厚的油层，深度为380英尺，注蒸气235天。根据斯特弗

尔(Stovall)的文章^[14], 在最后的70天注气期间, 虽然每天只注4小时, 注入压力范围从150—200磅/英寸², 注入量是35,000~52,500磅/天(100~150桶水/天)。图1—1标出了井位。在姚巴·林达(Yorba Linda)^[15]地区进行蒸气驱中间试验的后二十年情况, 没有明确的可用的记载。(第一批大规模蒸气驱是在荷兰的朔恩比克(Schoonebeek)^[16]和委内瑞拉的蒂亚胡安娜(Tia Juana)^[17]。

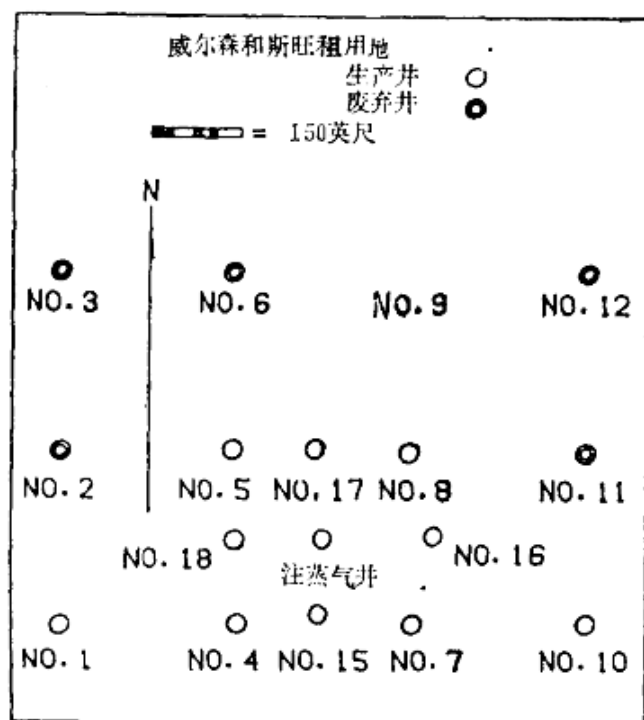


图 1—1 取自蒸气驱最早一篇论文(1934年)中的井位图^[14]

明格兰德(Mene Grande)^[18]一个早期蒸汽驱中间试验在循环注蒸汽发展中起到很重要的作用。

1959年10月委内瑞拉壳牌石油公司暂停在明格兰德焦油砂(含沥青砂)层的蒸气驱中间试验……当蒸气注入550英尺深的油层时, 上覆岩层压力过大。在注气井周围发生水和油随蒸气的喷出。当时就停止试验, 决定降低注入井的压力。令人惊奇的是,

虽然这些注入井以前从来没有出过任何油，而这时却产生了少量的蒸气和相当数量的油（100~200桶/天）。

今天，循环注蒸气（也称为蒸气浸泡、蒸气吞吐）是注几天或几个星期的蒸气，等上几天（焖井），再将该井投产。正常情况下这样的操作步骤几乎立即变注气井为生产井，这种增产措施能采出可观数量的原油。注蒸气循环可反复进行，但成功率逐步降低。为数众多的老的蒸气吞吐井现都正在改成用蒸气驱的方法开采剩余的原油。

使用比例规则^[19]和按比例缩小的物理模型^[20]对蒸气驱和循环注蒸气两者的研究都起了十分重要的作用。

有据可查最早建议将热气体注入油层的是兰特斯莱（Lindsley）^[21]于1928年提出的。实际上他已认识到原油高温裂解，即原油中的轻质部分首先脱除，而后冷凝，从而提高原油的API重度，降低原油的粘度。苏联第一个有记载的现场试验是1935年在朱沙夫区（Chusov Township）地层。有至少20%的空气和温度为842°F~932°F的热气体混合物注进平均厚度为340英尺的浅层不均质石灰岩。虽然因为油层分布不均匀，经营者并不打算依靠火烧油层的方法，但看来稠油发生了燃烧。

第4节 潜在的重要性

本书中图15—1是一个用热采方法如何能显著地提高原油产量的例子。这幅图上标有从1964年至1978年在加利福尼亚州进行试验的数据。在这个州，热力采油方法采出的原油多数重度是10~20°API。1979年增产量是199000桶/天，占全美总产量的20%^[22]。

历史上热采的对象一直就是稠油。由于稠油无法用其它地下方法采出，所以热采是一个理所当然的方向。然而热采方法常常又是可以用于任何原油；在矿场上热采方法不只在技术上是可行的，而且在经济上也可以与其它方法相竞争，特别是对低粘度原油。

和稠油一样，煤和油页岩很可能是热采方法的对象。全世界蕴藏有丰富的超重油、沥青、煤和油页岩。在美国，加利福尼亚州是重油油藏的集中地，那里已经感受到热采的重要性。加拿大和委内瑞拉都有丰富的重油储量，很大程度上也要用热采。美国西部有大量的油页岩和煤，其中大部分恐怕将不得不用地下热采方法。虽然那里有潜力可挖，但煤和油页岩地下开采方法还需待成熟。表1—2是从最近可能要求采用的地下热采方式的不同类型资源中选择出来的例子。因为这些只是选择出来的例子，所以对世界范围的能量资源来说，还缺乏代表性。但已清楚地看出，热采方法是大有潜力的。

表 1—2 可能使用地下热采的资源一览表

油 藏 资 源 类 型	蕴 藏 量 ^①
	相当的油量 (10 ⁹ 桶)
阿尔伯达 (Alberta) ⁽¹⁾⁽²⁾ 油砂层	700
奥雷纳库 (Orinoco) ⁽²⁾⁽³⁾ 重油带	1,000
波特河 (Powder River) ⁽²⁾⁽³⁾ 盆地	
煤层厚>50英尺，深度>1000英尺	(1.9×10 ¹¹ 吨煤) 900 ^②
皮新恩河溪 (Piceance Creek) ⁽¹⁾⁽²⁾ 盆地	
油页岩分析试验>25加仑/吨	450

①蕴藏量一般远大于可采储量。

②假定燃料热值为14,000英热单位/磅煤。

注：1980年世界能源消耗相当于49×10⁹桶油。

第 5 节 本专著的结构

本节介绍本专著以下各章次的大概内容。第二章讲述热采的种类。第三章阐述油层内热量和流体的物理、化学和数学基础知识。读者掌握第三章的内容对于理解和运用本书其余章节中的大部分材料并不是基本的。但它是重要的一章，对还不太精通数理化的人来说，应该至少通读这一章，可能对影响热采各种因素的基本了解有所帮助。对整个第三章已作了特殊的努力，以描述性

方式而不是以高深的数学方式介绍内容。第四章专门论述经挑选过的几个油藏工程问题,这些都是因热采方法引起的共同性问题。第五章讨论油层中当量加热区大小的计算问题,并提供关于估算油层及其附近地层温度分布的基础知识。第六章至第九章较为详细地叙述了热采工程的特点、性能和设计。第十章介绍求地面和地下管线热损失的方法以及计算井底温度、注汽井中蒸汽干度的方法。第十一章讨论完井技术、设备、管理问题和监测方法。第十二章讨论经济性以及油层和流体的性质对热采的影响。第十三章讨论热采的中间试验。第十四章研究热采的其它用途,如煤的地下气化,油页岩的地下蒸馏。最后一章(第十五章)总述热采方法的现状和对将来热采的设想。第三章、第五章至第十章都有计算例题。书后附有完整的专业术语表。附录 A 和 B 分别为换算系数和物质性质。本书是值得一读的一本书,也是一本实用的工作指南。

第 6 节 符号和单位

在应用性较强的几章(第四章至第十三章)里,所列出的公式可用世界上许多地区(包括美国在内)流行的油田实用单位,也可用读者自己选择的单位制。为了使公式适用任何单位制,我们在公式前用()中写出了适当的换算系数。例如流量为 q 、粘度为 μ 的不可压缩液体,流经渗透率为 k 、厚度为 h 的油层,造成半径分别为 r_w 和 r_e 的两个同心圆,其间的稳定状态压降 Δp 的表达式为:

$$\Delta p = (2\pi(141.2)) \frac{q\mu}{2\pi kh} \ln(r_e/r_w) \quad (1.1)$$

其中 Δp 、 q 、 μ 、 k 和 h 的单位分别采用磅/英寸²、桶/天、厘泊、毫达西和英尺。

若用统一的单位制计算,公式(1.1)中的()系数就可省略,变为

$$\Delta p = \frac{q''}{2\pi kh} \ln(r_e/r_w) \quad (1.2)$$

这是基本公式形式，包括如 2π 等一些自然系数。由于基本公式在任何统一的单位制中都成立，所以用任何目前通用的或可能采用的统一单位时，均保持式(1.2)形式不变。特别是在美国可能会采用公制单位，该公式仍适用。

若要使用油田常用单位，公式应为：

$$\Delta p = 141.2 \frac{q''}{kh} \ln(r_e/r_w) \quad (1.3)$$

当然，当()中的系数为1，说明公式也可用习惯的油田单位(如第十章中大部分公式)，在这样情况下就不用()，如果有怀疑，用所指明的单位，就省去()中的系数。

本书中所用的油田单位如下：

渗透率	毫达西(md)；	压力	磅/英寸 ² (psi)
粘度	厘泊(cp)；	流量	
时间	天(D)；	液体	桶/天
距离	英尺(ft)；	气体(除蒸10 ³ 标准英尺 ³ /气外)	天(Mscf/D)
体积		蒸气	当量水,桶/天(BWPD)
油层	英亩—英尺；(acre-feet)	容积流速	
液体	桶(bbl 或B)	液体	英尺 ³ /英尺 ² /天(ft ³ /ft ² /D)
气体	10 ³ 标准英尺 ³ (Mscf)	气体	标准英尺 ³ /英尺 ² /天(scft/ft ² -D)
面积		速度	英尺/天(ft/D)
油层	英亩(acres)	温度	华氏度(°F)
截面	英尺 ² (ft ²)	质量	磅(lbm)

热量,能量 英热单位 (Btu);

本书的出版者——石油工程师学会有一整套用于石油工程和有关学科的符号^[28~30]。

书后的专业术语表规定了这些符号各自所代表的量,并给出了油田单位和符号的因次,这些因次是用下面五个基本单位组成的:长度(L),时间(t),质量(m),温度(T)和电量(q)。附录A列出了常数和换算系数。

参 考 文 献

1. Perry, G. T. and Warner, W. S.: "Heating Oil Wells by Electricity." U. S. Patent No. 45,584 (July 4, 1885).
2. Nelson, T. W. and McNiel, J. S. Jr.: "Past, Present, and Future Development in Oil Recovery by Thermal Methods," *Pet. Eng.*, Part I, (Feb. 1959) B27 Part II (March 1959) B75.
3. *History of Petroleum Engineering*, API Div. of Production, Dallas (1961).
4. Lewis, J. O.: "Methods of Increasing the Recovery from Oil Sands," *Bull.* 148, *Petroleum Technology*, USBM (1971) 37.
5. Wolcott, E. R.: "Method of Increasing the Yield of Oil Wells," U. S. Patent No. 1,457,479 (filed Jan. 12, 1920; issued June 5, 1923).
6. Howard, F. A.: "Method of Operating Oil Wells," U. S. Patent No. 1,473,348 (filed Aug. 9, 1920; issued Nov. 6, 1923).
7. Elder, J. L.: "The Underground Gasification of Coal," *Chemistry of Coal Utilization*, Supplementary Volume, H. H. Lowry (ed.), John Wiley and Sons Inc., New York City (1963) 1023-1040.
8. Sheinman, A. B., Malofeev, G. E., and Sergeev, A. I.: "The Effect of Heat on Underground Formations for the Recovery of Crude Oil-Thermal Recovery Methods of Oil Production," Nedra, Moscow (1969); Marathon Oil Co. translation (1973) 166.
9. Gibbon, A.: "Thermal Principle Applied to Secondary Oil Recovery," *Oil Weekly*, (Nov. 6, 1944) 170-172.
10. Khun, C. S. and Koch, R. L.: "In-Situ Combustion-Newest Method of Increasing Oil Recovery," *Oil and Gas J.*, (Aug. 10, 1953) 52, 92-96, 113, 114.

11. Grant, B. R. and Szasz, S. E.: "Development of Underground Heat Wave for Oil Recovery." *Trans.*, AIME(1954)201,108-118.
12. Wilson, L. A., Wygal, R. J., Reed, D. W., Gergins, R. L., and Henderson, J. H.: "Fluid Dynamics During an Underground Combustion Process," *Trans.*, AIME(1958)213, 146-154.
13. Dietz, D. N. and Weijde, J.: "Wet and Partially Quenched Combustion," *J. Pet. Tech.* (April 1968) 411-413; *Trans.*, AIME, 243.
14. Stovall, S. L.: "Recovery of Oil from Depleted Sands by Means of Dry Steam," *Oil Weekly*(Aug. 13, 1934)17-24.
15. Stokes, D. D. and Doscher, T. M.: "Shell Makes a Success of Steam Flood at Yorba Linda," *Oil and Gas J.* (Sept. 2, 1974)71-76
16. van Dijk, C.: "Steam-Drive Project in the Schoonebeek Field, The Netherlands," *J. Pet. Tech.* (March 1968)295-302; *Trans.*, AIME, 243.
17. de Haan, H. J. and Schenk, L.: "Performance and Analysis of a Major Steam Drive Project in the Tia Juana Field, Western Venezuela," *J. Pet. Tech.* (Jan. 1969) 111-119; *Trans.*, AIME, 246.
18. Giusti, L. E.: "CSV Makes Steam Soak Work in Venezuela Field," *Oil and Gas J.* (Nov. 4, 1974)88-93.
19. Geertsma, J., Croes, G. A., and Schwartz, N.: "Theory of Dimensionally Scaled Models of Petroleum Reservoirs," *Trans.*, AIME(1956)207, 118-123.
20. Stegemeier, G. L., Laumbach, D. D., and Volek, C. W.: "Representing Steam Processes With Vacuum Models," *Soc. Pet. Eng. J.* (June 1980)151-174.
21. Lindsly, B. E.: "Recovery by Use of Heated Gas," *Oil and Gas J.* (Dec. 20, 1928)27.
22. Dubrovai, K. K., Sheinman, A. B., Sorokin, N. A., Sacks, C. L., Pronin, V. I., and Charuigin, M. M.: "Experiments on Thermal Recovery in the Chusovsk Town," *Pet. Economy* (Nov. 5, 1936).
23. "Annual Review of California Oil and Gas Production," Conservation Committee of California Oil Producers, Los Angeles(1979).
24. Nicholls, J. H. and Lunning, R. W.: "Heavy Oil Sand In-Situ Pilot Plans in Alberta(Past and Present)," *J. Can. Pet. Tech.* (July-Sept. 1977) 50-61.
25. Florillo, G.: "Exploration of the Orinoco Oil Belt-Review and General Strategy," paper UNITAR/CE10/V/3 presented at the 11th Intl. Conference on Heavy Crude and Tar Sands, Caracas, Feb. 7-17, 1982.
26. Roupert, R. C., Choate, R., Cohen, S., Lee, A. A., Lent, J., and Spraul, J.