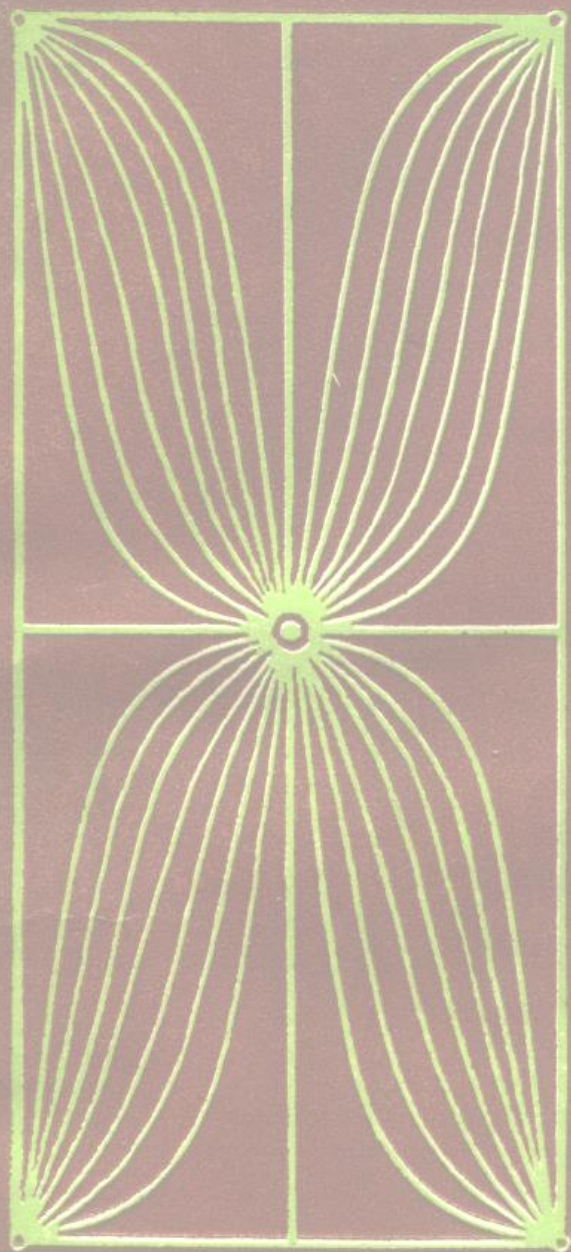


油田面积注水

〔苏〕P·T·法兹雷耶夫 著



石油工业出版社

38896

TE 25.6

油田面积注水

[苏]P.T.法兹雷耶夫 著

杨寿山 译 唐养吾 校



石油工业出版社

内 容 提 要

本书研究了油田分散注水（面积注水，选择性注水，点状注水）的理论和实践问题。书中列举了面积注水系统中水动力学计算的基本公式、油水接触面运动的研究结果、油层注水波及系数的确定方法。探讨了面积注水井网中的液体不稳定渗流和裂缝性地层中的液体渗流问题，以及被长裂缝所切割的地层的渗流模拟。还讨论了不同岩石-地质条件下最佳注水系统的应用范围。

本书可供油田开发工程技术人员和研究人員使用，也可供石油高等院校的大学生和研究生使用。

DP58/06

Р.Т.Фаздыев

ПЛОЩАДНОЕ ЗАВОДНЕНИЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

МОСКВА «Недра» 1979

油田面积注水

[苏]Р.Т.法兹雷耶夫 著

杨寿山 译 唐养吾 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京妙峰山印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米32开本9¹/₂印张 210 千字 印1—2,000册

1989年3月北京第1版 1989年3月北京第1次印刷

书号：15037·3017 定价：2.10元

ISBN 7-5021-0166-7/TE·164

目 录

绪 论	(1)
第一章 分散注水系统在油田开发实践中的应用	(5)
第 1 节 油田面积注水系统	(5)
第 2 节 油田点状注水系统	(15)
第 3 节 油田选择性注水系统	(26)
第二章 分散注水系统液体的稳定渗流	(29)
第 1 节 概述	(29)
第 2 节 分散注水时液体渗流的水动力学计算	(31)
第 3 节 研究蜂窝状布井系统和点状注水中的渗流 问题	(45)
第 4 节 矩形地层中渗流的计算	(47)
第三章 面积注水系统的水动力学研究	(51)
第 1 节 生产井和注水井的布置方式	(51)
第 2 节 直线系统	(54)
第 3 节 交错式布井线状系统	(66)
第 4 节 九点系统	(75)
第 5 节 七点系统	(83)
第四章 分散注水时液体的不稳定渗流	(87)
第 1 节 概述—问题的提出	(87)
第 2 节 面积注水和点状注水时液体的弹性驱动	(90)
第五章 面积注水时含油边缘的移动和注水波及系数	(103)
第 1 节 含油边缘运动的研究方法	(103)

第2节	在同一液体系统中面积注水时油水接触面的运动	(107)
第3节	液体物理性质有差异的情况下面积注水时液体界面的运动	(124)
第4节	面积注水时的注水波及系数	(138)
第5节	油田注水系统的效果对比	(147)
第六章	裂缝性油田分散注水时的液体渗流	(155)
第1节	概述一问题的提出	(155)
第2节	在裂缝性孔隙介质中液体渗流的积分—微分方程	(160)
第3节	确定裂缝系统渗流液流的特性	(163)
第4节	规则布井系统条件下裂缝性岩层的渗流液流	(176)
第5节	面积注水系统流体在裂缝性岩层中的渗流特点	(191)
第6节	低渗透隔层对渗流液流的影响	(195)
第7节	模拟裂缝性岩层中液体的渗流	(197)
第8节	在双重孔隙介质中面积注水的稳定渗流	(199)
第七章	分散注水时非均质油层中液体的渗流	(205)
第1节	油层的非均质性及其研究方法	(205)
第2节	关于油层非均质性的计算方法	(214)
第3节	确定非均质地层有效传导性的若干问题	(219)
第4节	面积注水时液体在非均质地层中的渗流特点	(229)
第5节	面积注水系统与选择性注水系统效果对比	(243)
第八章	分散注水系统实际应用的若干问题	(257)

第 1 节 分散注水系统在罗马什金油田的应用效果	(257)
第 2 节 油田开发系统的选择	(265)
附 录	(277)
参考文献	(278)

绪 论

油田边外注水和内部注水系统在苏联获得了广泛的应用。目前87%以上的原油产量是应用保持地层压力的方法采出的。

由于需要在最短期间内将油田投入开发、保证较高的采油速度和最充分地动用原油储量，因而工程师-石油工作者们越来越关注最近提出的分散注水(面积注水、点状注水和选择性注水)系统。分散注水系统受到很大的注意，是因为一系列的原因所决定的。

在苏联已经发现的油田中有相当数量的油田地质条件差，产油层渗透率低，非均质性和不连续性严重，油层厚度小和原油粘度高，因而目前尚未投入开发。例如，在鞑靼苏维埃社会主义自治共和国的上部地层(中石炭系的维列伊层和巴什基尔阶、下石炭系的吐尔层、巴勃里科夫层和多内昔阶中)以及在泥盆系沉积层中共有110多个这样的油田。这110多个油田(包括500多个油藏)在很大程度上决定了鞑靼共和国石油工业的发展。在鞑靼石油科学研究设计院所进行的专门研究表明，全国有1/3以上的原油储量集中在只有用强化开采方法才能进行开发的油田上。

许多著作指出，边外注水系统有许多明显缺点，主要有：不能充分利用边水能量，需要长距离的管线输送，采油速度不高。此外，在油田边外地带的储集层性质(包括渗透率和厚度)急剧变坏，以及在封闭的油田条件下，都不能应

用边外注水系统。边外注水开发系统的另一个缺点是，有许多提高油层原油采收率的方法不能应用。

分散注水系统有可能最充分地利用注入水的能量，有可能将勘探程度最高的部分及高产地区逐步单独地投入开采。同样，也可将注水系统的个别单元和井组逐渐投入开采，有可能在一定程度上减少和分散工程项目的施工时间。

苏联许多油田已进入产液量和含水迅速增长，原油产量下降的开发阶段，使采油的工作量大大增加。只有广泛应用分散注水系统（首先是点状注水）才能有效地改变渗流方向，保持高的采油水平，提高油层的注水波及效率和原油最终采收率。罗马什金油田、杜玛兹油田和其它油田的开发经验证明了这一事实。

由于全世界石油资源逐渐枯竭，以及石油资源实际上具有不能再生的特点，而现代采油方法又不能满足需要，因而改善水的洗油性质、热力采油法、混相驱油等〔17、100、139、281〕提高原油采收率新方法的研究具有重大意义。通常应用五点、七点或九点面积注水系统单元来进行矿场试验。例如在罗马什金油田的明尼巴也夫区注丙烷和克拉马林区注磷酸三钠，在新耶尔霍夫油田注硫酸等。按分散注水系统的布井方式进行矿场试验，主要是因为可以加快试验研究和更完整地监控试验进程。

虽然越来越广泛应用分散注水系统，但仍然有一系列重要的实际和理论性问题至今尚未充分研究，其中包括，在苏联许多油区尚未总结出面积注水、点状注水和选择性注水的应用效果；对九点法、方七点法以及蜂窝状等布井系统的研究也很不够。对面积注水时渗流的弹性驱动特点、在点状注水和面积注水情况下液体界面运动进行研究显然也是很重

的。由于从裂缝性储集层采出的油量所占比重显著增加，因而必须研究液体在裂缝-孔隙性介质中的渗流特点，研究大裂缝对油井产量、压力分布的影响等。

研究油层的非均质结构对应用面积注水系统工艺指标的影响，具有特殊的重要性。显然，在多井排系统和分散注水条件下，油层参数(流动系数、厚度)的分布特点将对井的产量、原油采收率、油水接触面的运动产生不同的影响。在水动力学分析和技术-经济分析的基础上，确定不同注水系统应用范围的必要性已经成熟了。

本书阐述了与利用面积注水、点状注水和选择性注水开发油田有关的许多水动力学和技术-经济问题。研究了在苏联油田上应用面积注水的经验，详细叙述了在罗马什金油田利用点状注水的实践。例如，在这个油田的阿布都拉赫曼诺夫区、南罗马什金区和扎依-卡拉太区的实践证明，应用点状注水能够提高原油产量水平，提高油层的原油采收率。列举了鞑靼苏维埃社会主义自治共和国的油田利用选择性注水的某些资料。

书中阐述了任意井数的面积注水系统一般情况下的水动力学研究结果。同时对多井排注水、点状注水和蜂窝状注水系统渗流的总势能，可以按一般问题解中的部分情况求得。对直线、五点、七点、九点法布井系统及其它面积注水系统的水动力学问题进行了研究。在本书中列举了一般面积注水条件下确定油井产量的代数方程，确定不稳定双周期流动时的地层压力动态方程，以及确定液体界面运动的积分-微分方程，应用这些方程可以研究被驱替液和驱替液在不同流度比条件下液体界面运动的特点。

首先求得了不同井网几何形状和油水流度比条件下的直

线面积注水系统以及交错式线状布井系统的注水波及系数。以三角形井网为基础的分散注水系统，在无水采油期内的注水波及系数和最终原油采收率都明显的比正方形布井井网优越。

书中叙述了不同的井网系统在非均质油层中，以及在被大裂缝切割的地层中液体渗流的试验结果和理论研究结果。物理模拟和电模拟方法证明，在非均质严重的地层条件下，分散注水系统明显的比多井排布置生产井和注水井的注水系统优越，它不但可以保证最大可能的采油量，而且可以最大限度地减少油层非均质性对采收率的消极影响。

在油田开发实践中，对分散注水系统应用效果的研究给予了高度重视，例如在罗马什金油田一个地区证明了利用选择性注水开采储集性质差的地区取得很好的效果。罗马什金油田的阿布都拉赫曼诺夫区证明，只有切实运用分散注水系统，才能保证Ⅱ₁层的上部层段达到预计的最终原油采收率值。针对乌拉尔-伏尔加地区的条件，研究了地台型油田多井排注水和分散注水系统的最佳应用范围。

在本书编写过程中，曾得到Г.Г.瓦希托夫教授、B.И.达尼洛夫教授的多次咨询和宝贵的建议，作者表示衷心的感谢。同时深切地感谢鞑靼科学研究设计院的许多同事们所给予的大力支持。

第一章 分散注水系统在油田开发实践中的应用

第1节 油田面积注水系统

最近三十年来苏联石油工业的高速度发展与地台型油田的发现以及采用强化开采的方法（保持地层压力开发油田）有关。人工影响油田开发过程的先进思想具体表现为边外注水和内部注水。现在在苏联积累了相当丰富的应用强化的油田开发系统的经验。其中最有效的一种，就是以一定规则的方式在油藏范围内布置生产井和注水井的面积注水。

在油田开发实践中，应用面积注水的方案有两种：

（1）油藏一开始开发，就应用面积注水作用于油层的一次开采方法；

（2）在已经采出了主要原油储量的油田应用面积注水作为二次开采方法。

由于许多原因，面积注水作为一次开采方法在苏联长期未获得广泛应用。然而，在最近时期发现了许多天然条件差的油田（油层渗透率低、地层非均质性和不连续性严重、原油粘度高），应当从一开始开发就应用强化的注水系统。我们注意到，在1950年A. II. 克磊洛夫院士就指出了当渗透率很低时应用面积注水的可能性〔137〕。

在最近几年，衰竭的油田每年都在增加，必须在这些油田采用面积注水系统作为二次采油方法。下面研究了苏联许多采油地区（阿塞拜疆、哈萨克斯坦、乌克兰、巴什基里亚

和西西伯利亚)在油田开发实践中应用面积注水系统的某些观点。

油田开发过程应用人工作用的方法,开始于阿塞拜疆——苏联石油工业的发源地。阿塞拜疆油田一百多年以来所积累的开发经验,在油田开发理论和实践中占有独特的地位。

1928年“列宁石油”托拉斯(阿塞拜疆苏维埃社会主义共和国)在腊马内区曾经借助于注空气首次实现了人工作用于油层。1929—1931年,曾在“奥尔忠尼启则石油”托拉斯(阿塞拜疆苏维埃社会主义共和国)和“老格鲁兹内石油”托拉斯试验了这种方法。1945年在“克拉斯诺达尔石油”联合企业的宽谷油矿曾经采用在地层顶部注空气保持地层压力的方法。然而,由于注入的空气体积有限,地质条件不利,效果不明显,这种方法未得到广泛推广。在卫国战争前的年代里,应用人工作用油藏的方法未能充分应用,主要是缺乏经过科学论证的保持地层压力开发油田的理论。

1947年在巴腊哈内-萨布奇-腊马内油田(阿塞拜疆苏维埃社会主义共和国)开始实行面积注水。其中,在著作[9、75、89、162、241]中研究了阿塞拜疆许多油田面积注水方法的有效性。这里不可能对这些著作作出全面的评述,只能对其中一部分作出评论。例如,在著作[89]中,A. A. 贾瓦达夫、T. И. 贾利洛夫和Ч. М. 舍伊达耶夫在详细分析了基尔马金组油层(卡腊油田、巴腊哈内-萨布奇-腊马内油田)面积注水结果的基础上得出了这样的结论,最适合于该储集层的方法是面积注水,甚至在油层严重衰竭的情况下,面积注水也有助于提高原油采收率。在著作[241]中指出,基尔马金组的油层已处于开发后期,并且该储集层具有渗透

率和地层压力低的特点，应当实行综合注水（边外注水和面积注水相结合）或面积注水。

在著作〔75〕中指出，鉴于乌姆巴金油田（阿塞拜疆苏维埃社会主义共和国）开采的卡拉克层 I 的产层厚度达到 50 米，而原油具有非牛顿性特点，应用面积注热水的方法可以最大限度地排除疏松储集层在高温采油过程中不可避免的工艺上的困难。可以看出，对于蒸馏出组分数不多的原油来说，面积注水是适合的，因为面积注水可防止固态成分在地层中沉淀，从而改善原油的渗流性能。

阿塞拜疆的油藏地质构造特点是地层的多层性（层数有时达到 50 个）、破碎性，形成单独的构造区、具有不同的地质-物理特性和开采特性、以及集储层的不稳定性，所有这些都给有效的应用保持地层压力的方法带来很大的困难。然而，1967 年已经在阿塞拜疆苏维埃社会主义共和国应用保持地层压力的方法开发了 76 个层，其中包括使用边外注水 44 个开发层系，综合注水（边外注水和内部注水相结合）19 个开发层系，面积注水 12 个开发层系。在注水作用下的产油量占阿塞拜疆总采油量的 55%〔241〕。

埃姆宾油区正在开发的油田有 23 个，在应用面积注水作为二次采油方法提高原油采收率方面取得了丰富的经验〔39、165〕。其中著名的多索尔油田和马卡特油田，于 1943 年首次在苏联开始应用面积注水。面积注水还在巴依楚纳斯、科斯恰格尔、莎契兹、科什卡尔等油田应用。多索尔油田和马卡特油田于 1911—1914 年投入开发，科斯恰格尔油田于 1935 年投入开发，巴依楚纳斯油田于 1936 年投入开发。油田井网都较密，为 1-3 公顷/井。原油具有高粘度的特性（ $\mu = 18-150$ 厘泊），详见表 1。

表 1 埃姆宾地区油田开发的某些结果

油 田	层 位	投入开发时间 年	原油粘度 厘 泊	液体渗透率 达 西	原油采收率 %
多 索 尔	侏 罗 I	1916	24.0	1.0	70
	侏 罗 II	1915	39.5	0.4	50
	侏 罗 III	1911	19.7	3.5	71
马 卡 特	侏 罗 IV	1929	24.0	0.1	46
	三 迭 V	1931	48.0	1.2	53
巴依楚纳斯	亚普第-泥欧克姆	1936	50.0	1.2	53
伊斯基涅	亚 普 第	1942	—	—	75
库尔斯萨雷	亚普第-泥欧克姆	1940	18.6	0.6	69
卡拉顿	亚 尔 俾	1948	23.1	0.4	57
科斯恰格勒	泥欧克姆 I	1935	152.0	3.9	19
共青团城	亚普第-泥欧克姆	1942	33.0	0.3	61

在多索尔油田，注水层系为侏罗系层Ⅱ段，其渗透率为0.2—0.4达西，原油粘度为40厘泊左右；在马卡特油田，注水层系为侏罗系层Ⅰ段，其渗透率为0.5—2.5达西，原油粘度为140厘泊。开始注水前地层压力急剧下降，生产井在重力驱动下开采。

在多索尔油田和马卡特油田，应用面积注水获得了良好的结果。其中多索尔油田的原油采收率达到50%，在整个开发期间的单位耗水量为 $105 \text{米}^3/\text{米}^3$ 。

从1957年开始在莎契兹油田应用面积注水，以便采出下亚普第层Ⅲ段的储量。在这个层已按三角形井网钻成37口井，井距100米。到开始面积注水前，油井产量下降到 $(10-50) \cdot 10^{-3} \text{米}^3/\text{日}$ 。开始注水后，产量增长到 $2-3 \text{米}^3/\text{日}$ ，而增产的采油量占开发层系总采油量的78.8%。

在埃姆宾地区的陆源储集层油田中，除了科尔萨克油田以外，没有从一开始开发就应用面积注水。А. Л. 比奇克夫斯基、М. М. 马塔舍夫和Ю. И. 沙耶夫斯基在分析实际材料的基础上得出结论^[39]，当边外含水区的边水不够活跃时，在埃姆宾地区采用面积注水的效果良好。考虑到高粘度原油油藏实际上没有无水开采期，作者建议在任何开发阶段都使用面积注水法。并指出，为了获得高的油藏原油采收率，必须反复冲洗油藏，注入水量要达到5—6倍的地质储量体积。

在中亚的昌格尔达什-捷克别尔油田Ⅲ层也采用面积注水作为提高原油采收率的二次采油方法。油藏产层为粘土、粉砂岩和细砂岩的交互层，其平均厚度在东部为2—3米，在西部为4—6米，渗透率为20—30毫达西，孔隙度和渗透率都具有高度的非均质性^[186]。原油粘度6—10厘泊。油井初产量

为 $0.5-2\text{米}^3/\text{日}$ 。1938年已有30口井开始采油，1942年达到最高采油水平，这时已钻了63口井，井网密度为4公顷/井。到1960年以前，地层压力从 $55-60\text{公斤力}/\text{厘米}^2$ 降到 $20-40\text{公斤力}/\text{厘米}^2$ 。在取得试验注水的肯定结果以后，于1961年作出了在整个油藏实行面积注水的决定。

1963年面积注水运用于捷克别尔油藏后，采油量增长1—1.5倍，采液量增长1倍。当采出 1米^3 原油的注水量达到 $5-6\text{米}^3$ 时，最终采收率为50—60%。因此，以中亚的昌格尔达什-捷克别尔、安集延等油田为例，可以说明在非均质低渗透储集层进行面积注水的高度有效性。面积注水能够比在溶解气驱动条件下获得的原油采收率提高15—20%。

面积注水作为二次采油法，于1949年开始应用于切诺印古什苏维埃社会主义共和国十月油田的XV层。面积注水还在本地区的老格鲁兹内、马尔哥别克等油田得到了广泛应用。著作^[159]对这个地区保持地层压力系统的有效性进行了深入分析。面积注水在油田上应用的明显效果表现在原油采收率的大幅度提高。不同区的原油采收率增长范围是10—25%。

在老格鲁兹内油田的油层中进行了同时注水和注气。为了采出VI层的储量，曾采用面积和边缘注水系统。采用面积注水和注气的油田还有：十月油田的XI、XX和XXI层，马尔哥别克油田北部透镜体的XIV层、南部透镜体（在油藏的下部）的XIV层和波里索夫-苏地段的XVI层。到1968年以前，所研究开发层系的注水时间已延续了5—16年。靠注水增加的原油采收率平均为8.1%。不同层的注入水体积与累积采油量之比为 $7-108\text{米}^3/\text{米}^3$ ，平均为 $28.5\text{米}^3/\text{米}^3$ 。注水波及体积最充分的油层，原油采收率提高的幅度最大：马尔

哥别克油田南部和北部透镜体的XIV层和波里索夫-苏地段的XVI层，戈尔斯基油田的XIV层和老格鲁兹内油田的XVI层。上述油藏在开始注水时（个别油藏除外）的原油采收率只有10—15%。

正如前面所指出的，在十月油田的XV层实行了注水。1944—1947年，由于在上述油层进行了强化采液，地层压力急剧下降，不但未能增加采油量，而且不能保持已达到的产油水平。由于这个原因，在1949年作出了在该层进行面积注水的决定^[159]。开始注水前的原油采收率为42%。由于面积注水的结果，采收率提高到48%。在注水期间，注入水与累积采油量之比为 $5.5 \text{米}^3/\text{米}^3$ 。

П. Д. 法尼耶夫和Г. В. 克利亚洛夫斯基在著作^[277]中引用了乌克兰苏维埃社会主义共和国多林油田渐新统麦尼里特层采用面积注水的结果。麦尼里特层的剖面是砂岩、粉砂岩和泥岩间互层形成的自然大厚层，厚度达500—600米，其特征是岩相非均质性严重，具有大量的（达50个）不连续层和厚度从1—2厘米到几米的夹层。平均孔隙度为8—9%，渗透率为1—3毫达西，原油粘度1厘泊左右。开发方案规定在溶解气驱条件下开发麦尼里特层。1955年已经开始钻井和开发油田。

到1960年已清楚地表明，在溶解气驱条件下，最终原油采收率不超过10—11%。由于不断脱气的结果，到1962年平均地层压力急剧下降，井的产量减少了一半。同时半数井停产。为了改善麦尼里特层的开发状况，1962年曾作出了关于按五点系统实行面积注水的决定。总的来说，面积注水已经取得肯定的成效。井的自然吸水能力为 $80 \text{米}^3/\text{日}$ 。同时也暴露出吸水剖面严重的不均衡性。