



СССР

苏联

油田开发专题综述译文集

石油工业部科学技术情报研究所

一九八七年十月

TE 30-53
001

苏联油田开发专题综述 译文集

石油工业部科学技术情报研究所

正文设计：段利君
责任校对：何 思
封面设计：秋 风

298
065.2.2

苏联油田开发专题综述译文集

开本 787×1092毫米1/16·印张21.375 编辑：石油工业部科学技术情报研究所
字数：54万 印数：3000 出版：石油工业部科学技术情报研究所
1987年10月北京第一次印刷 印刷：中国人民解放军工程兵机械
油情（单）87021 工本费：4.60元 发行：石油工业部科学技术情报研究所
(北京和平里七区十六号楼)

做壳	上面
烫字	套壳

目 录

多油层油田开发系统的选择.....	(1)
巴什基利亚油田泥盆系地层开发方式的效果.....	(23)
不同注水方式下石油储量的动用特点.....	(42)
国外复杂油藏的开发.....	(66)
应用注蒸汽方法开发油田.....	(86)
西西伯利亚油田开发设计的特点	(115)
油藏基础方案开发工艺指标的评价	(146)
残余油饱和度的预测经验	(166)
气举采油	(198)
强化采油的井下蒸汽气体发生器	(206)
用泡沫酸处理低渗透层近井地带	(235)
油井堵水作业	(256)
苏联化学堵水的现状与前景	(278)
采用泡沫系统限制出水和堵水	(294)
苏联巴什基里亚油田的污水处理和回注	(318)

多油层油田开发系统的选择

М.М.Саттаров等著

周成勋 译
油 工 校

一、前 言

苏联的油田基本上都是多油层的。按照井网布置和各油层投产顺序,这类油田的开发系统通常可以分成两大类:联合开发和分别开发。

在联合开发情况下,多油层油田的含油层,无论在生产井或者在注入井中,都是用合采或合注。在联合开发时,所有的开采层在注入区与开采区之间建立统一的生产压差。在分别开发时,每个开采层有独立的井网。

各油层联合开发和分别开发的优缺点是众所周知的。例如,在多油层油田开发时采用统一井网,可以节省钻井投资。这种系统的主要缺点是调节开采过程比较困难,不能对每个油层建立最优的开发方式以减少出水量和增加原油的采收率。

在多油层油田采用各油层分别开发时要求更多的资金,但是有可能消除上述联合开发的缺点。在不涉及采用中间方案(采用相应的技术合采分注和分采分注)可能性的情况下,可以看到,选择联合或分别开发,归根到底是由采用的开发系统的经济技术指标对比所决定的。为了解决这个问题进行了大量的研究,其最终结果是确定油层可以采用统一井网的界线。

当分析有关多油层油田的发表材料和实际开发资料时发现,油层联合开发或分别开发的选择是油田开发理论与实践的中心问题。大多数油田早期采用和实施的联合开发系统现在正转向细分开发层系。在大部分储量采出以后,特别是高产油层的储量采出之后,就向分别开采过渡。分别开发系统的有效性不仅取决于生产层的储集性质,而且还取决于转变到这种开发系统是在哪个开发阶段进行的。

在本文所作的介绍中,对储层性质的研究和多油层油田的非均质特点,液体在联合开采和分别开采中的渗流特点以及技术经济指标计算等方面进行了分析。

二、影响选择油田开发系统的储层 及其流体的主要参数

目前在多油层油田中对产层和开发层系使用不同的定义。例如,除了“地层”、“小层”、“夹层”这些概念之外,还用层组、层位等术语来表示产层^[6]。

为了消除这种不明确性,采用以下概念。

(1) 建议把地层(пласт)作为基本地质单元。地层可以是储层(коллектор)或者

非储集层。在地层分成二个或二个以上带有不同岩层（薄层——прослой）的部分时，其中每一部分称为小层（пропласток）。小层是地层中的一部分，并不是普遍发育的。

（2）术语产层——продуктивный горизонт（层组——толща等）用来表示更大的单位，它是剖面上各地层的总和或者是个别的地层，但不是开发层系，而是剖面上的含油部分。

引入“基本开发单元（элементарный объект разработки）”的概念，它是剖面上的一部分，在其上面和下面都有可靠的隔层。因此，“基本开发单元”可能包括单个的地层，或者在所研究的面积范围内无水动力联系的几个地层。顶部底部必须具有可靠的隔层是为了可以对这一开发单元建立合适的开发方式（压差、注水速度等），而不考虑其它开发单元的条件（图1）。

例如，在阿尔兰油田有六个互相隔开的地层。其中每一层都是一个基本开发单元。杜玛兹油田的主要产层 Π_1 和 Π_2 互相之间有“岩性天窗”相通。根据上述定义，这些地层在它们汇合的地段组成一个基本开发单元。在适当选择注水井排把它们隔开的地区，其中每一个产层可能成为独立的开发单元。

通常采用切割注水井排把油田划分成开发地段，每个地段的开发独立进行。这些地段以后将称为开发区或区块。在一个油田里，不同的开发区或区块可能有不同数量的基本开发单元。

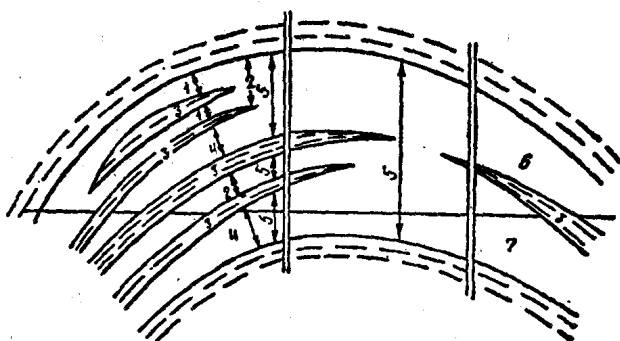


图1 多油层油田开发单元划分示意图

1—小层；2—地层a；3—夹层；4—地层b；5—基本开发单元；6—产层Ⅰ（地层a+b）；7—产层Ⅱ（地层a+b）

基本开发单元的总合组成开发层系，它可能由一个或几个基本开发单元组成。考虑到目前在开发理论和实际中广泛使用了“单层”和“多层”系统这些术语，在以后的叙述中将保留这些术语。所谓“两层的”、“三层的”和“更多层的”系统，将理解为由二个、三个和更多个基本开发单元组成的开发层系。

为了论证开发层系及其开发系统的选择，必须采用某些准则（критерий）。当然，用来解决油田开发领域内任何问题的基本准则仍然保持有效：即在费用最低、原油采收率最高的条件下保证达到预定的采油速度。因此，问题归结为在这样或那样地把各基本开发单元组合成一个开发层系的情况下，计算不同方案的经济技术指标，并从中选出最佳方案。

为了解决提出的问题，必须分别能预测各基本开发单元及其不同组合下的开发指标。

由几个基本开发单元组成的开发层系在参数和地质结构方面是更为复杂的系统。这些参数可以分成二类。第一类中包括地层有效厚度、渗透率、孔隙度和原始含油饱和度等，表示储集层的渗流和容积特性。除了这些基本参数之外，还有许多对产层地质结构复杂性作出定量评价的计算系数。最常用的系数有：

(1) 砂岩系数，它等于地层有效厚度与地层从顶到底所有岩石的总厚度之比。

(2) 分层系数，它是每口井中小层数之和与总井数的比值。分层系数代表某一个开采区块范围内平均的小层数。在砂岩系数与分层系数之间有一个统计关系。随着分层系数的增加，地层的砂岩系数减少。

(3) 地层—储集层分布系数，或者称为砂岩稳定系数。它代表该层储集的发育面积与开采区块的总面积之比。

(4) 地层—储层替代系数，它是上述系数的相反值。替代系数等于非渗透区块的面积与开采区块全部面积之比。

(5) 联通系数，它等于二个地层联通（汇合）的面积与开采区块总面积之比。它可以根据剖面中砂岩联通的井所占的比例确定。这个系数是复杂层系的特性参数，因为在计算它时要考虑二个砂岩层的结构特点和它们中间的非渗透层^[2]。

我们再详细地研究一下每一组参数和系数。

第一类从“储层”性质来看，参数表示基本开发单元的特性。象地层厚度、渗透率、孔隙度和原始含油饱和度这些参数，在同一个地层中变化范围很大。为了定量地评价它们的变化范围，通常采用概率论的方法。在研究了大量油田的实际资料的基础上，确定了孔隙度和原始含油饱和度的变化范围服从于正态分布规律，而有效厚度和渗透率用下列分布来描述可以得到满意的结果：

$$f(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x}{x_0}\right) \cdot \sqrt{\frac{x}{x_0}} \cdot \frac{1}{x_0} \quad (1)$$

$$\text{或者 } f(x) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{x_0^2}\right) \cdot \left(\frac{x}{x_0}\right) \cdot \frac{1}{x_0} \quad (2)$$

式中 x —所研究的参数（渗透率、厚度）；

x_0 —常数。

如果基本开发单元的参数分布符合上述分布规律，则将认为这一基本开发单元具有随机非均质性。

在某些情况下，在同一个基本开发单元范围内可以分出几种类型的岩石。这时候分布函数具有以下形式：

$$\bar{f}(x) = p_1 \bar{f}_1(x) + p_2 \bar{f}_2(x) + \dots + p_n \bar{f}_n \quad (3)$$

式中 p_i —在基本开发单元总体积中 i 类岩石所占的份额。

(3) 式类型的函数称为非均质分布函数。它的出现是由于地层中有参数平均值差别很大的几种类型岩石存在。参数符合非均质分布函数的单元称为具有常规非均质性的单元。

知道了表示基本开发单元结构复杂性的特性参数以后，就可以着手确定用来评价由几个基本单元组成的开发层系的结构的指标。

首先,我们引进几个考虑在多油层系统中各基本单元份额的比值:

- (1) 储量比值,它是基本单元的平衡表储量与整个开发层系的平衡表储量的比值;
- (2) 当前采油量比值,它是某基本单元的流动系数与开发层系总的流动系数的比值;
- (3) 总采油量比值,它是某基本单元的可采储量与开发层系总的可采储量的比值。

当用常规的统计方法描述复杂的多油层系统的参数变化时,通常不能利用象在整理单油层系统实际资料中应用的那些方法。例如,如果在一个系统中联合了具有相同平均渗透率的二个单层单元,那么我们将得到一个具有随机非均质性的复杂基本单元。初看起来,这个复杂单元与简单的单元没有什么不同。但是,这种情况只有当每口井的剖面上各层的渗透率相等时,也就是说,不仅仅各层的平均渗透率相同,而且渗透率(等值)图也相同时才会发生。因为沉积过程和地层一储层的形成是在多种因素的作用下实现的,因此,渗透率(或其他参数)图完全吻合的可能性很小。

关于对多油层油田划分开发层系时如何考虑非均质性,Б.Г.卡诺林和B.B.斯塔先柯夫的著作^[7]作了大量的研究工作。

在本文中研究几种最简单的情况。假定,在同一口井的剖面上各层渗透率值之间的相关系数等于零,而且可以把这些值看作是独立的。那么这个在复杂单元静态中感觉不到的因素,正如将在下面所证明的那样,当地层中开始渗流过程时将在单元动态中导致严重后果。

如果多油层系统是由具有不同平均渗透率(或其他参数)的几个基本单元组成的,那么我们将得到一个具有常规非均质性的单元。在这种情况下,在数量上表示这一参数分布非均质性的变异系数将要增大。

但是,正如M.M.莎达洛夫等人著作^①中的公式所表明的那样,变异系数对复杂单元组成的变化并不那么敏感。为了说明这一点,我们研究了一个数值例子。有二个储量相同但渗透率不同的地层。第一个地层的平均渗透率为0.144微米²,第二个地层为0.295微米²,也就是说,它们的平均值相差一倍。计算所用的原始数据见表1。

根据表1数据计算了第一个地层的渗透率离散值为0.0127,标准偏差 $\sigma_1=0.113$ 。因此,变异系数 $V=\frac{\sigma_1}{\bar{k}_1}=0.785$ 。 $\bar{k}_1$ 为第一个地层的渗透率平均值。

第二个地层的离散值、标准偏差和变异系数分别为0.051, 0.226和0.766。所研究地层的渗透率变异系数($V=0.785$, $V_2=0.766$)大体上相等,它们相差不超过2.5%,这在计算精度范围之内。

在表1数据的基础上用类似的方法一同计算了二个地层的统计特性参数。其指标如下:

渗透率平均值(微米 ²)	0.22
离散值	0.0376
标准偏差	0.194
变异系数	0.88

①《多层油田开发层系的选择及其开发系统的论证》, M.M.莎达洛夫, K.C.巴伊默哈梅托夫等著, 见《油藏开采用程调整》文集, 苏联科学出版社, 1976年版, 123~133页。

表1

渗透率变化 范 围 (微米 ²)	岩 心 数			渗透率变化 范 围 (微米 ²)	岩 心 数		
	第一层	第二层	第一、第 二层合计		第一层	第二层	第一、第 二层合计
0—0.04	164	64	228	0.56—0.60	4	22	26
0.04—0.08	188	92	280	0.60—0.64	—	19	19
0.08—0.12	164	95	259	0.64—0.68	—	16	16
0.12—0.16	132	93	225	0.68—0.72	—	14	14
0.16—0.2	100	86	186	0.72—0.76	—	12	12
0.20—0.24	72	77	149	0.76—0.80	—	11	11
0.24—0.28	56	69	125	0.80—0.84	—	10	10
0.28—0.32	40	60	100	0.84—0.88	—	9	9
0.32—0.36	28	52	80	0.88—0.92	—	8	8
0.36—0.40	20	45	65	0.92—0.96	—	6	6
0.40—0.44	12	40	52	0.96—1.00	—	4	4
0.44—0.48	8	35	43	1.00—1.04	—	3	3
0.48—0.52	8	39	38	1.04—1.08	—	2	2
0.52—0.56	4	26	30	1.08—1.12	—	—	—

由此可见，在二个层同时研究时渗透率变异系数只增加13.4%，而它们的渗透率平均值相差达一倍。第二个高渗透层的开采和水淹速度将比第一个层快一倍。但是，这没有反映到变异系数上。因此，为了描述多油层开发单元的性质，仅使用描述单层单元的统计参数一般是不够的。

无论是选择基本单元的还是多层系统的开发单元，第二组参数都具有重要意义。在确定原油采收率与采油井和注入井的井网密度和布井系统的关系时要利用砂岩系数、分层系数和稳定系数。地层的联通系数是划分开发层系的基础，因为单个的地层只有当它在划分出的开采区块内与其它地层没有连通时，才可能作为一个独立的开发层系来研究。

选择井网密度和划分开发层系是油田开发设计中最重要任务。因此，上面列举的各种系数必须在油田试采初期根据有限的井数作出评价。K.C.巴依默哈梅托夫^[3]研究了25个油田11000口井的实际数据，在此基础上制订了评价方法。K.C.巴依默哈梅托夫选择砂岩有效厚度 h_a 作为主要参数，根据这个参数预测上述各个系数。作出这样选择的原因是砂岩的平均厚度可以在井数相对不多的情况下足够精确地加以确定^[3]。

下石炭纪和泥盆纪陆源砂岩稳定系数与它的平均厚度的关系见图2。从图2可以看出随着厚度的减少砂岩稳定（发育）系数急剧下降。这是完全自然的，因为随着地层厚度的减少，地层尖灭而被非渗透层取代的可能性增加了。在所研究的这些油田上，随着砂岩厚度增加到10米，砂岩发育系数达到1。

已经证明,在砂岩的平均发育系数,也就是它们的厚度,与一定数量地层的发育面积之间存在密切的联系。在著作〔2〕中,把任意数量地层的发育面积与整个开发区面积的比看作随机量 $p_{m,n}$,建议用下列公式计算:

$$p_{m,n} = \frac{n!}{m!(n-m)!} \bar{K}_s^m (1 - \bar{K}_s)^{(n-m)} \quad (4)$$

式中 $p_{m,n}$ — m 个地层的可能发育面积;

n —开发层系中地层总数;

$\bar{K}_s$ —开发层系各储层的平均稳定系数。

我们用上述公式进行计算。假定在多层系统中联合了四个地层($n=4$)。平均稳定系数 $\bar{K}_s=0.5$ 。那么在开采区内一个层也没有($m=0$)的那部分面积为 $p_{0,4}=0.5^4=0.0625$ 或6.25%。

用类似方法可以计算出发育一个层的那部分面积 $p_{1,4}=0.25$,发育二个层的那部分面积 $p_{2,4}=0.375$,三个层的为 $p_{3,4}=0.25$,四个层的为 $p_{4,4}=0.0625$ 。

正如在著作〔2〕中所表明的,公式(4)的计算结果与实际数据吻合得很好。有了这些关于地层结构的数据以后,进一步就可以在开发设计阶段建立原油采收率与井网密度的关系。正如K.C.巴依默哈梅托夫的研究所表明的那样,各地层—储集层之间的联通数(或联通系数)既取决于各储集层的厚度,又取决于分隔它们的泥岩的厚度。联通数随着储集层厚度的增加和泥岩厚度的减少而增加〔3〕。

上述研究的重要实际结果是可以利用它们确定作为原油采收率组成部分的井网系数 K_o 。该系数表示在非渗透岩石所替代的地区和小透镜体中遗留在地下的相对的原油量。这个系数一方面取决于稳定系数,或者如图2的曲线所示,取决于地层的有效厚度,另一方面,取决于生产井和注水井的井网密度和布井方式。稳定系数越小和井网越稀,各地层被井网波及的系数就越小。分析这些问题已超出本文的范围。因此,我们仅研究其最终结果。

表2列出了巴什基利亚的石炭纪和泥盆纪陆源储集层的井网系数与地层厚度和井网密度的关系。

从表2中可以得出,当油层有效厚度大于9~10米时,井网密度实际上对原油采收率没

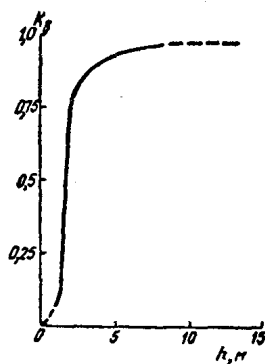


图2 砂岩稳定系数与它的平均厚度的关系

表2

地 层 厚 度 (米)	不同井网密度(公顷/井)下的井网系数			
	100	64	36	16
9	0.96	0.98	0.99	1.0
6.7	0.92	0.94	0.96	0.98
5.2	0.90	0.92	0.94	0.97
3.6	0.84	0.89	0.93	0.96
2.0	0.32	0.44	0.56	0.73

有影响，因为这些油层是完整的，没有尖灭区。当有效厚度等于或小于2米时，这个关系就非常重要，在组合不同厚度的油层时应当加以考虑。

三、多油层开发层系开发技术经济指标的计算特点

以上所研究的参数，无论是第一组参数还是第二组参数，都是表示处于静止状态的开发层系的特点。多油层系统最重要的开发特点表现在原油及其驱替剂的渗流过程中。

(1) 当几个油层合并为一个开发层系时，破坏了各层产出液量与它们的流动系数之间的直线关系。高渗透油层和低渗透油层合采的井中，通常后者是不工作的。

(2) 类似的现象在注水井中也有。多层开发层系的吸水能力通常小于分注时各层吸水能力之和。与高渗透层一起合注时，低渗透层的吸水能力显著降低。这些低渗透层的吸水能力常常等于零。

(3) 随着生产压差或注水压差的增加，无论在采油井还是注水井中工作层数都在增加。

(4) 在相同的含水率条件下，数层联合开发与分层开发相比，生产井水淹得将更快些，这将使生产井的开采大大复杂化。

这里列举的只是数个基本单元联合开发的某些特点，这些特点在应用现行方法计算开发指标时并未予以考虑。按照这些方法，开发工艺指标（采油量、采水量、开发年限、原油采收率、井数、开采油方法等等）是根据非均质地层模型来确定的。每个层的采液量（原油和水）是按每个层的流动系数的平均值单独计算的，然后，在联合开发的情况下，把各层的采液量加起来，确定出全油田总的采液量。在这些计算中并没有考虑上面指出的各地层之间的相互作用。产水量的计算是在考虑各层非均质性的情况下进行的，随后把各层产水量加起来，计算出全油田的产水量；相加时的假设依据是不同油层含油边界收缩的中间形式具有相同的形态。差别仅仅在于这些中间形式是按照各层的平均流动系数在不同时间达到。这种情况只有当不同层的参数等值线（主要是等渗透率图）是一致时才可能发生。上面已经指出，这种一致的可能性很小。

尽管存在上述不足之处，现行的水动力学计算方法可以确定多层系统中主要说明各层开发不均匀性的主要开发指标。但是，如果忽略发生在多层开发层系中的上述现象，就会导致联合开发的计算效果优于分层开发。

现在更详细地研究一下各地层之间相互作用的特点。

向生产井的不均匀（与流动系数不成比例）渗流和注水井的不均匀吸水这个事实，是在产量计和流量计发明并投入使用后用这些仪器确定的。 Φ .C.阿勃杜林和И.А.法克莱也夫（1961年）曾经证明了一种非常不利的情景。随后，实际上在所有的石油开采地区都广泛研究了出油剖面 and 注水剖面。大量的研究证实了早期的结果。H.B.丹明、Ю.Н.基斯梁柯夫、B.H.罗萨基等人证明，在杜玛兹油田条件下降低井底压力，即建立更大的压差，将有新的原来不工作的层工作。这种规律性在其它油田也发现过。例如，在B.C.斯维谢夫、B.M.尤金等人的著作中报道了罗马什金油田的详细研究结果。甚至在现代开发系统下，当为了强化开采而在井底建立最大的可能的井底压差时，多层联合开发系统的产量仍然大大低于各层分

别开采的产量之和。

根据K.C.巴依默罕梅托夫的资料,在图3中绘制了阿尔兰油田生产井计算的和实际的产液量对比关系曲线。从图3中可以看出,随着统一开发的地层数目的增加,实际产量与计算的相比将显著减少。例如,5层联合开发系统的计算产量为2个单位,而实际产量只有0.8个单位,即比计算产量少60%。

出现这种现象的原因,是在联合开发多层时一方面出现了原油的粘塑特性,另一方面增加了井底压力(即减少了地层的压差)。

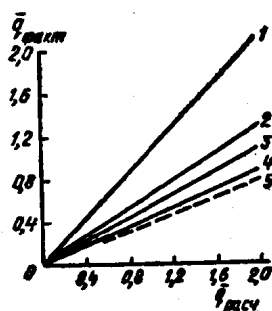


图3 计算的与实际的产液的关系

1, 2, 3, 4, 5 — 分别表示 1, 2, 3, 4, 5 层开发层系。

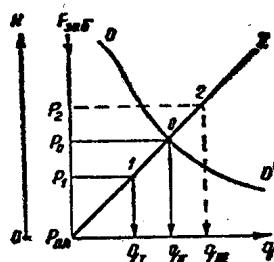


图4 分层开采时地层与井下设备联合工作图

在生产井井底保持最低允许压力以保证达到最大可能的产液量,这不是经常可以做到的。常常遇到这样的情况,甚至在开发单层系统时现有抽油设备的生产能力低于油层的可能产量。这种情况常见于高产油藏和深油藏。

地层和井下设备联合工作的条件可根据图4所示的关系确定。在图4中,除了产量 q 与井底压力的关系曲线(直线1),也就是指示曲线之外,还绘有设备最大产能与悬挂深度 H 的关系曲线 oo' 。当井底压力 p_0 等于地层压力 p_{na} 时,压差等于零,地层无液体流出。因此,指示曲线是由坐标的原点引出的。随着井底压力的减少,地层压差增大,地层的流量按直线1增加。设备的生产能力按相反的方向变化。当井底压力与地层压力相等时,泵的悬挂深度不大。对于这种条件可以从现有的井下设备中选择很高生产能力的设备。随着泵的悬挂深度增加(即井底压力的减小),要求有更大扬程的装置。这种抽油泵装置的生产能力小。它的产能随着悬挂深度的增加而减小。曲线 oo' 限制现有抽油装置的可能产能范围。技术上可能的单井产液量处在这一曲线的下面和左面。

从图4可见,抽油装置的生产能力只在一个点上符合油井的最大可能产量。当井底压力等于 p_0 时,地层与装备在直线1与曲线 oo' 的交叉点上协调工作。如果允许的井底压力(临界)值为 p_1 ,则井的产量可以完全由装备来实现,其值为 q_1 。当允许的井底压力值更低并等于 p_2 时,则井的最大产量增加到 q_2 。但是装备不允许实现这个产量,因此井的产量限制在 q_1 。地层的流量发生在指示曲线的0点,油井中泵的生产能力低于地层流量。井底压力增加到 p_0 ,而对地层的回压减小一 $(p_2 - p_0)$ 值。

当把2个或几个基本单元合并成一个开发层系时,2个单元的产量将不等于它们分采时

产量的总和, 因为无法实现其最大可能产量的高产井的数目将增加。在这种情况下受限制的不仅是高产层。这里还发生附加的不利情况, 即低产层的产量也受限制。这种情况的发生就是由于上面指出的因素的作用。各井将在这个单元打开高产层, 而在另一个单元中打开低产层。限制高产层的采液量将导致自动限制低产层的采液量。为了阐明这个原理在图5中绘出了各基本单元的指示曲线(直线 I 和 II), 总指示曲线(直线 I + II) 和装备生产能力曲线 oo'。

从图5可见, 在临界井底压力 p_{kp} 情况下, 与第一单元和第二单元所对应的井的可能产量为 q_1 和 q_2 。

由于各单元联合开采, 指示曲线具有直线形状 (I + II)。在 p_{kp} 下合采层的产量应为 $(q_1 + q_2)$, 大大超过井下设备的能力。考虑到这种限制后的井产液量为 q_c , 这就使各单元的产量相应地降为 q_1' 和 q_2' 。这样一来, 由于开发单元的联合, 减少了低产层的采液量, 而低产层的最大可能产量, 用现有的装备在单独开发情况下是可以得到的。由于联合开采, 井底压力上升, 生产压差减少。

为了从数量上评价这个值, 可以以实际的井底压力分布为依据。根据 $\Theta.M.$ 吉玛舍夫等人著作中提供的资料, 实际的井底压力分布在分采系统下符合正态分布, 其分布密度

$$l(p) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(p - \bar{p})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (5)$$

其分布函数

$$L(p) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{p - \bar{p}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \quad (6)$$

式中 $\bar{p}$ — 井底压力的平均值;

σ^2 — 弥散值。

M.M. 萨达洛夫 (1973年) 提出了在二层联合开发时确定井底压力分布密度的方法。这一分布的最终形式如下:

$$l_c(p) = l_1(p) \cdot L_2(p) + l_2(p) \cdot L_1(p) \quad (7)$$

式中 $l_1(p)$, $l_2(p)$, $L_1(p)$, $L_2(p)$ 分别为分层开发时第一、第二单元的井底压力分布密度和分布函数。

如果取 $\sigma = \sigma_2 = \sigma$ 和 $\bar{p}_1 = \bar{p}_2 = \bar{p}$, 也就是说合采的二层具有相同的平均参数时, 井底压力的平均值为:

$$\bar{p}_c = \int_0^\infty l_c(p) \cdot p \cdot dp = \bar{p}_p + \frac{\sigma}{\pi} \quad (8)$$

也就是增加 $\frac{\sigma}{\pi}$ 值。

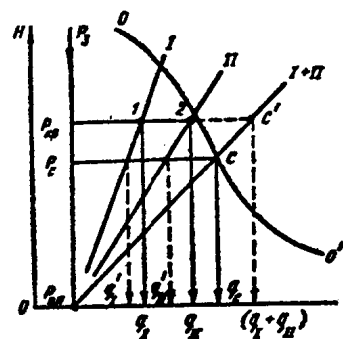


图5 在二层联合时地层与井下装备联合工作图

在 $p_p = 8$ 兆帕, $\sigma = 2$ 兆帕时, (5) 和 (7) 式的分布曲线见图 6。两层合采使井底压力分布向更高井底压力的方向移动。根据公式 (8), 平均井底压力增加 $\frac{2}{\sqrt{\pi}} = 1.13$ 兆帕, 达到 9.13 兆帕。

由此可见, 甚至平均参数相同的层合采时, 对地层的回压力也增加, 因而不可能保证地层最大的潜在产液量发挥出来。当其平均参数值不同时, 正如文献(10)所指出的那样, 这种情况就更为严重了。

增加对井底的回压, 导致地层中压力梯度减小, 而在出现原油的粘塑性时, 就会导致低渗透层的渗流完全停止。这一点已被实际资料所证实。最终将导致原油驱替系数和地层波及系数的减小, 以及整个地层原油采收率的下降。

根据大多数已进行过研究, 水驱油系数随着压力梯度的增加而增加。在其它条件相同的情况下, 这一关系的特性决定于渗透率的大小。渗透率越低, 随着速度的增加驱替系数的增加越明显。这一因素可由绘制驱替系数与参数 π_1 的关系曲线来加以考虑。参数 π_1 由以下关系式确定:

$$\pi_1 = \frac{\sigma \cos \theta \sqrt{\frac{K}{m}}}{\text{grad } p}$$

式中 σ —表面张力;

θ —润湿角;

$\text{grad } p$ —压力梯度。

因为 $\sigma \cos \theta$ 值对于给定的多层单元的各个油藏是相同的, 而压力梯度与渗流速度的关系为

$$V_\phi = \frac{K}{\mu m} \text{grad } p$$

所以所要求的关系式可以表示如下:

$$K_B = C (V_\phi^2 K)^{0.0676}$$

式中 C —适用于给定的多层开发系统的常数;

K_B —驱替系数。

图 7 是 $C = 0.54$ 时对于不同的渗透率值绘制的驱替系数与 V_ϕ 的关系曲线。为了增加驱

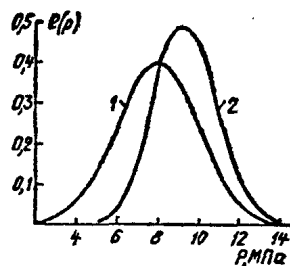
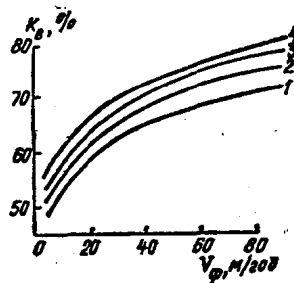


图6 井底压力分布密度

1, 2—相应为一层和二层的开发单元。

图 7 驱替系数与渗流速度的关系曲线

1、2、3、4—相应为渗透率等于 10、20、30、 40×10^{-8} 厘米²的关系曲线。



替系数，必须保证在低渗透层中也具有高渗透层那样高的驱替速度。不言而喻，在多层联合工作时对不同地层建立不同的驱替制度是不可能的。因此，由于所研究因素的关系划分成各独立开发层系可使原油采收率增加。

降低压差也会导致具有初始剪切梯度的原油的非牛顿性质具有更显著的影响。必须考虑这个因素，因为剪切张力值取决于孔隙通道的大小或者说取决于渗透率。根据多次研究的资料，这一关系可以表示为：

$$G = \alpha \frac{\tau_0}{\sqrt{K}}$$

式中 $\alpha = 0.017$;

τ_0 —初始剪切张力。

从以上公式可以看出，渗透率越低，用于克服初始剪切梯度所必需的压差就越高。当几个层联合开采时（见图6）对地层的回压增加，相应地井底压力分布曲线的左分支的压差减少，也就是说，开采低产层的地区压差减少了。因此，转为联合开发系统时这些层将不工作。

在几个层联合开发时，低产层由于出现粘塑性而不工作，从而降低了原油采收率，对此要进行定量评价在方法上是有很困难。问题在于需要研究二个随机值即渗透率与井底压力联合出现的可能性。在研究具体的例子时我们将对此值给出近似的估价。

在把几个基本单元联合为一个开发层系时，在注水井中也发生类似的不利后果。60年代在乌拉尔—伏尔加地区的大量研究结果证明，在井的剖面中有几个层的情况下往往只有高渗透层吸水。其余低产层的吸水能力为零。在И.Б.克里沃诺索夫和P.A.马克苏托夫的著作中（1970年）有关于这种现象的详细描述，并提供了专门的矿场试验结果。根据多年对注水井工作的观察结果，作者确认，甚至在几个渗透率相同的层合注时，它们的吸水能力也是不同的。

例如，根据18口井的资料，当打开一个层时，在井口注入压力为12兆帕的情况下，每米射开厚度的吸水能力为50米³/天。而当射开几个层时，在渗透率相同和注入压力为11兆帕情况下，每米射开厚度的吸水能力降低2/3，只有16米³/天。作者对于这个现象的解释是，被薄泥岩相隔的相邻各层互相之间对吸水能力有影响，也就是说，相邻各层产生了特殊的干扰现象。在专门的注水井中进行的相同压力下的分层注水工业性试验结果表明，当关闭一个层后邻近层的吸水能力便增加。这些试验的结果列于表3，它是根据И.Б.克里沃诺索夫和P.A.马克苏托夫提供的资料编制的。从表3可见，关闭其中一个层（或一层组），导致其余层的吸水能力增加。例如，922井关闭上层后，在井口压力相同情况下使下层的注水量由310米³/天增加到400米³/天，而在2059井中注水量由400米³/天增加到520米³/天。

对合注时产生的层间干扰，И.Б.克里沃诺索夫和P.A.马克苏托夫进行了解释。在罗马什金油田油层被泥岩夹层所分隔，在高压作用下这些夹层的泥岩就象高粘度液体一样。注水时高渗透层中的压力传播比低渗透层中快，这就产生了对地层的额外负荷，这种负荷立即并全部传送给低渗层。额外负荷妨碍在低渗透层中打开新裂缝，并促使已有裂缝闭合。第一批裂缝将在高渗透层中打开。必须指出，在低渗透层中存在较低压力并不是裂缝闭合的必需条件。在P.H.梯野舍夫的著作中^[5]对这个问题有详细的研究。

表3

井号	地层	油层厚度 (米)	油层渗透率 (微米 ²)	上个月合注二个层时		关闭其中一个层后一个月	
				井口压力 (兆帕)	吸水能力 (米 ³ /日)	井口压力 (兆帕)	吸水能力 (米 ³ /日)
1	2	3	4	5	6	7	8
922	I	7.2	0.220	10.0	$\frac{270}{310}$	10.0	$\frac{—}{400}$
	II	13.6					
3217	I	2.8	0.360	11.3	$\frac{208}{772}$	11.2	$\frac{—}{812}$
	II	11.0	0.380				
2059	I	8.8	0.670	12.0	$\frac{101}{400}$	12.0	$\frac{—}{520}$
	II	2.8	0.385				
	III	6.0	0.620				
1050	I	4.8	0.700	11.5	$\frac{550}{209}$	11.0	$\frac{—}{467}$
	II	2.0	—				
	III	8.0	—				
1048	I	4.4	0.325	11.0	$\frac{102}{102}$	9.1	$\frac{—}{105}$
	II	2.0	0.480				
	III	6.4	0.725				
928	I	4.0	0.400	10.0	$\frac{445}{120}$	10.0	$\frac{—}{523}$
	II	3.0	—				
	III	2.0	0.630				
3263	I	2.2	0.565	12.0	$\frac{430}{995}$	12.0	$\frac{—}{1219}$
	II	9.0	0.850				
410	I	11.0	0.660	9.0	$\frac{550}{65}$	10.0	$\frac{813}{—}$
	II	4.4	0.220				
1056	I	8.0	0.845	10.8	$\frac{—}{815}$	10.8	$\frac{440}{450}$
	II	1.6	0.930				
	III	3.2	0.230				
3216	I	1.2	0.140	11.8	$\frac{77}{203}$	11.5	$\frac{—}{214}$
	II	3.0	0.300				
	III	1.2	—				
	IV	2.8	0.480				
	V	9.6	0.760				

注：分子与分母相应地表示在分注时上层和下层的吸水能力。

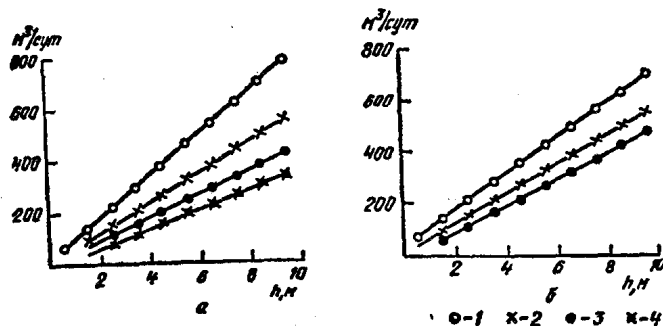


图8 在不同层数情况下地层平均吸水能力与有效厚度的关系

1, 2, 3, 4—相应为1, 2, 3和4层开发层系。

K.C.巴依默罕梅托夫主要根据巴什基利亚油田的大量实际资料,对多油层油田的注水特点作了广泛的研究。图8是巴什基利亚油田下石炭系(a)和上泥盆系(б)地层在不同的地层数情况下吸水能力与有效厚度的关系。从引用的数据中可见,在上述二种情况下,随着合注的地层数的增加吸水能力急剧减少。如果把一层情况下的吸水能力看作1,则二层系统的吸水能力为0.79,三层系统的为0.54,四层系统的为0.34。泥盆系地层的平均吸水能力也有类似的减少;二层系统平均吸水能力为0.76,三层系统为0.54⁽⁴⁾。

几个层合注的不利因素不只限于降低平均吸水能力。常常遇到个别层根本不吸水的情况。随着地层厚度的减少和同一厚度下小层数的增加,地层吸水能力为零的情况出现次数增加。在许多著作中研究了这一关系。在著作(4)中给出了有大量统计数据的最完整的资料。当由2~3个层组成一个开发层系时工作层所占的比例与厚度的关系如下:

各层的厚度 (米)	工作层所占的比例 (小数)
小于1	0.45
1—2	0.55
2—3	0.68
3—4	0.76
4—5	0.85
5—6	0.89
6—7	0.92
7—8	0.95
8—9	0.98
9—10	1.0

从所引用的数据中可见,当地层厚度增加到10米时,工作层所占的比例达到1。在地层厚度为1—2米时工作层所占的比例只有0.45~0.55。小层数目的增加也给予同样的消极影响。例如,从参考文献(4)的图2可见,当地层厚度为2米时,在二层情况下在65%的井中有吸水能力,在三层情况下在55%的井中有吸水能力,在四层情况下有45%的井有吸水能力,在五层情况下在35%井中有吸水能力,在六层情况下在30%井中有吸水能力。上面所引