

文章编号:0253-9985(2008)06-0801-05

三重介质部分射开渗流模型研究与试井曲线分析

陈方方^{1,2},贾永禄²,张福祥¹,雷胜林¹,杨向同¹,覃芳³

(1. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司勘探事业部,新疆库车 841000; 2. 西南石油大学研究生院,四川成都 610500; 3. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司采气工程研究院,四川广汉 618300)

摘要:针对缝洞型碳酸盐岩储层部分射开这一情形,建立了考虑井筒储集效应和表皮效应在封闭顶边界、封闭底边界、定压顶边界和定压底边界的相互组合边界条件下的不稳定渗流物理数学模型。通过 Laplace 变换和分离变量法对模型进行了求解,再利用 Stehfest 数值反演得到实空间的解,进而绘制了压力和压力导数双对数样版曲线。从物理渗流机理上对曲线形态特征进行了分析,并划分了流动阶段。研究表明:与部分射开相关的参数只影响压力导数曲线的早期形态;若用完全射开模型对部分射开井进行试井解释,将会解释出一个较大的表皮,产生一种井底污染严重的假象而得出不准确的判断;对打开程度较小的部分射开井,若选用完全射开模型进行试井解释,误差较大。所获得的结果可用于研究三重介质缝洞型碳酸盐岩储层中部分射开井的渗流规律,进行压力动态和试井分析。

关键词:Laplace 变换;分离变量法;数学模型;部分射开;三重介质;缝洞型碳酸盐岩储层

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Percolation model of partial penetration in triple-porosity reservoirs and well test analysis

Chen Fangfang¹, Jia Yonglu¹, Zhang Fuxiang², Lei Shenglin², Yang Xiangtong², Qin Fang³

(1. Postgraduate School of Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Exploration Department of PetroChina, Tarim Oilfield Company, Kuerle, Xinjiang 841000, China;

3. Gas Production Engineering Research Institute of PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Guanghan, Sichuan 618300, China)

Abstract: In view of partial penetration in fractured-vuggy carbonate reservoirs, this paper establishes an unstable mathematical percolation model with wellbore storage and skin effects incorporated under various combinations of sealing top boundary, sealing bottom boundary, constant top boundary and constant bottom boundary. Laplace transform and variable separation methods are used to obtain solutions of the model, which are turned to real space solutions through Stehfest numerical inversion. Pressure and pressure derivative log-log type curves are drawn up based upon these real space solutions. Flow regime is divided after the characteristic analysis of the type curves based on percolation mechanism. The results show that parameters related to partial penetration affect early-stage shapes of derivative type curves only. When a full-penetration percolation model is applied to well test analysis in a partial penetration well, a bigger skin factor and thus a false image of severe wellbore damage might be generated, leading to inaccurate conclusion or errors. For a relatively low partial penetration well, well test analysis with a complete penetration model may have large error. The results obtained from the model can be used in the study of the flow pattern and the analysis of pressure transient and well testing of partial-penetration wells in triple-porosity fractured-vuggy carbonate reservoirs.

收稿日期:2008-10-02。

第一作者简介:陈方方(1982—),男,硕士生,油气渗流理论、试井分析方法。

基金项目:中国石油天然气集团总公司重点工程攻关项目(971007110165)。

Key words: Laplace transform; variable separation method; mathematic model; partial penetration; triple-porosity; fractured-vuggy reservoir

碳酸盐岩储层与其他类型储层相比,一个比较大的特点就是裂缝和溶洞非常发育,缝洞发育程度高、规模大、分布范围广。其中垂直和高角度缝洞的发育使得碳酸盐岩储层的垂向连通性非常好,储层厚度相对比较大,可达几十米甚至上百米,而生产井的射开层段一般只有几米,这就造成了井的不完善性。因此,研究缝洞型碳酸盐岩储层部分射开井的压力动态变化规律,无疑具有迫切的现实意义^[1-3]。

在这种部分射开的井进行生产时,地层内的压力扰动起初只限于射孔井段,在有限的射孔厚度范围内向该井的流动实际上为球形流动;但随着时间的推移,该井的影响体积不断扩大,直到地层顶部和底部边界,向该井的流动再次变为径向流动,但此时变为整个地层的径向流动。很多学者都研究了均质油藏的部分射开问题,并考虑了不同的顶、底边界条件,Abbaszaden 和 Hegeman^[4]建立了无限大均质油藏中大斜度井的部分射开模型,并给出了解;Ozkan 和 Raghavan^[5]推导出了无穷大均质油藏中直井部分射开的点源解;Kucuk 和 Yildiz 等人^[6,7]也分别研究了均质油藏部分射开井的压力动态特征;Bui^[8]研究了双重介质油藏部分射开井的压力动态特征;廖新维等人^[9]也建立了均质油藏中直井部分射开的数学模型,并给出了 Laplace 空间的解析解。王建平等^[10]研究了各向异性部分射开直井的不稳定渗流问题。本文建立了三重介质油藏部分射开模型,利用 Stehfest 数值反演^[11]绘出了压力及压力导数双对数试井样版曲线,并分析了样版曲线的特征。

1 物理数学模型

数学模型建立的基本假设条件是:①地层水平等厚,油井以定产量生产;②油井生产前,远井地带各处压力均为原始地层压力;③地层流体为单相微可压缩,且流动满足线性达西定律;④考虑井筒储集和表皮效应的影响,忽略重力和毛管力的影响;⑤通过井筒的流动是经过裂缝的,基岩和溶洞作为源;⑥油井只射开有限厚度,流体只从有限厚度流入井筒(图1)。

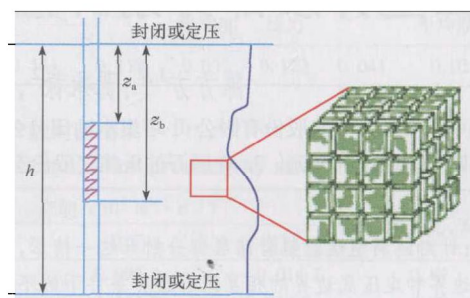


图1 三重介质油藏部分射开井模型

Fig. 1 Percolation model of partial-penetration well in a triple-porosity reservoir

h , 储层厚度, m; z_a , 射开段上端到储层顶部的距离;
 z_b , 射开段下端到储层顶部的距离

基于以上的假设条件,建立以下无因次的数学模型:

$$\nabla^2 p_D + \frac{\partial^2 p_D}{\partial z_D^2} + \lambda_m(p_{mD} - p_D) + \lambda_v(p_{vD} - p_D) = \omega_f \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (1)$$

$$- \lambda_m(p_{mD} - p_D) = \omega_m \frac{\partial p_{mD}}{\partial t_D} \quad (2)$$

$$- \lambda_v(p_{vD} - p_D) = \omega_v \frac{\partial p_{vD}}{\partial t_D} \quad (3)$$

初始条件:

$$p_D(r_D, z_D, 0) = 0 \quad (j = m, f, v) \quad (4)$$

定压顶边界:

$$p_D(r_D, z_D = 0, t_D) = 0 \quad (j = m, f, v) \quad (5)$$

封闭顶边界:

$$\left. \frac{\partial p_D}{\partial z_D} \right|_{z_D=0} = 0 \quad (j = m, f, v) \quad (6)$$

定压底边界:

$$p_D(r_D, z_D = h_D, t_D) = 0 \quad (j = m, f, v) \quad (7)$$

封闭底边界:

$$\left. \frac{\partial p_D}{\partial z_D} \right|_{z_D=h_D} = 0 \quad (j = m, f, v) \quad (8)$$

外边界条件:

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} p_D(r_D, z_D, t_D) = 0 \quad (j = m, f, v) \quad (9)$$

内边界条件:

$$\left. \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = -\frac{1}{L_D} \quad (z_{aD} \leq z_D \leq z_{bD}) \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = 0 \quad (0 < z_D \leq z_{aD}, z_{bD} < z_D < h_D) \quad (11)$$

式中: p_m, p_f, p_v 分别为基质、裂缝、溶洞系统的无因次压力, 无因次; λ_m, λ_v 分别为基质窜流系数和溶洞窜流系数, 无因次; $\omega_m, \omega_f, \omega_v$ 分别表示基质、裂缝、溶洞系统的弹性储容比, 无因次; z_D 为无因次垂向距离, 无因次; r_D 为无因次径向距离, 无因次; h_D 为无因次储层厚度, 无因次; t_D 为无因次时间, 无因次。

无因次定义如下:

$$p_D = \frac{2\pi k_{fr} h}{q\mu B} (p_i - p_j) \quad (j = m, f, v) \quad (12)$$

$$\lambda_j = \alpha_j \frac{k_{fr}}{k_{fr}^2} r_w^2 \quad (j = m, v) \quad (13)$$

$$\omega_j = \frac{\phi_j C_j}{(\phi_m C_m + \phi_v C_v + \phi_f C_f)} \quad (j = m, f, v) \quad (14)$$

$$z_D = \frac{z}{r_w} \sqrt{\frac{k_{fr}}{k_{fr}}} \quad (15)$$

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (16)$$

$$h_D = \frac{h}{r_w} \sqrt{\frac{k_{fr}}{k_{fr}}} \quad (17)$$

$$t_D = \frac{3.6 k_{fr} t}{(\phi_m C_m + \phi_v C_v + \phi_f C_f) h r_w^2} \quad (18)$$

$$L_D = \frac{z_b - z_a}{h} \quad (19)$$

式中: p_m, p_f, p_v 分别为基质、裂缝、溶洞系统的压力, MPa; k_{fr}, k_{fr} 分别为裂缝系统的径向和垂向渗透率, μm^2 ; p_i 为原始地层压力, MPa; ϕ_m, ϕ_f, ϕ_v 分别为基质、裂缝、溶洞系统的孔隙度, 无因次; C_m, C_f, C_v 分别为基质、裂缝、溶洞系统的综合弹性压缩系数, 1/MPa; L_D 为储层打开程度, 无因次; t 为时间, h; h 为储层厚度, m; q 为原油地面产量, m^3/d ; μ 为原油粘度, $mPa \cdot s$; B 为原油体积系数, 无因次; z_a 为射开段上端到储层顶部的距离, m; z_b 为射开段下端到储层顶部的距离, m; r_w 为井半径, m; r 为径向距离, m; z 为垂向距离, m; α_m, α_v 分别为基质和溶洞的形状因子, 无因次。

2 模型求解

对上述数学模型进行基于 t_D 的 Laplace 变换^[12], 并采用分离变量法进行求解, 最终可以得到 Laplace 空间的解析解。

1) 顶、底边界条件均为封闭边界:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{D0}(z_D, u) = & \frac{K_0[\sqrt{f(u)}]}{u \sqrt{f(u)} K_1[\sqrt{f(u)}]} + \\ & 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\sin \frac{n\pi z_{bD}}{h_D} - \sin \frac{n\pi z_{aD}}{h_D} \right) K_0 \left[\sqrt{\left(\frac{n\pi}{h_D} \right)^2 + f(u)} \right] \cos \frac{n\pi z_D}{h_D}}{u L_D n \pi \sqrt{\left(\frac{n\pi}{h_D} \right)^2 + f(u)} K_1 \left[\sqrt{\left(\frac{n\pi}{h_D} \right)^2 + f(u)} \right]} \end{aligned} \quad (20)$$

2) 顶、底边界条件均为定压边界:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{D0}(z_D, u) = & \\ & -2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\cos \frac{n\pi z_{bD}}{h_D} - \cos \frac{n\pi z_{aD}}{h_D} \right) K_0 \left[\sqrt{\left(\frac{n\pi}{h_D} \right)^2 + f(u)} \right] \sin \frac{n\pi z_D}{h_D}}{u L_D n \pi \sqrt{\left(\frac{n\pi}{h_D} \right)^2 + f(u)} K_1 \left[\sqrt{\left(\frac{n\pi}{h_D} \right)^2 + f(u)} \right]} \end{aligned} \quad (21)$$

3) 顶边界条件为封闭边界而底边界条件为定压边界:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{D0}(z_D, u) = & \sum_{n=0}^{\infty} \left[\sin \frac{(2n+1)\pi z_{bD}}{2h_D} - \sin \frac{(2n+1)\pi z_{aD}}{2h_D} \right] \times \\ & \frac{4K_0 \left\{ \sqrt{\left[\frac{(2n+1)\pi}{2h_D} \right]^2 + f(u)} \right\} \cos \frac{(2n+1)\pi z_D}{2h_D}}{u L_D (2n+1) \pi \sqrt{\left[\frac{(2n+1)\pi}{2h_D} \right]^2 + f(u)} K_1 \left\{ \sqrt{\left[\frac{(2n+1)\pi}{2h_D} \right]^2 + f(u)} \right\}} \end{aligned} \quad (22)$$

4) 顶边界条件为定压边界而底边界条件为封闭边界:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{D0}(z_D, u) = & - \sum_{n=0}^{\infty} \left[\cos \frac{(2n+1)\pi z_{bD}}{2h_D} - \cos \frac{(2n+1)\pi z_{aD}}{2h_D} \right] \times \\ & \frac{4K_0 \left\{ \sqrt{\left[\frac{(2n+1)\pi}{2h_D} \right]^2 + f(u)} \right\} \sin \frac{(2n+1)\pi z_D}{2h_D}}{u L_D (2n+1) \pi \sqrt{\left[\frac{(2n+1)\pi}{2h_D} \right]^2 + f(u)} K_1 \left\{ \sqrt{\left[\frac{(2n+1)\pi}{2h_D} \right]^2 + f(u)} \right\}} \end{aligned} \quad (23)$$

其中:

$$f(u) = u \left(\frac{\lambda_m \omega_m}{\lambda_m + \omega_m u} + \frac{\lambda_v \omega_v}{\lambda_v + \omega_v u} + \omega_f \right) \quad (24)$$

应用叠加原理, 在 Laplace 空间中考虑井筒储集效应和表皮效应的井底无量纲压力解为:

$$\bar{p}_{wD} = \frac{u \bar{p}_{D0} + S}{u [1 + C_D u (u \bar{p}_{D0} + S)]} \quad (25)$$

上式中: $\bar{p}_D, \bar{p}_{wD}$ 分别为 p_D, p_{wD} 在 Laplace 空间的解; K_0, K_1 分别为第二类零阶、一阶虚宗量 Bessel 函数; u 为 Laplace 变量; C_D 为无因次井筒储集系数, 无因次; S 为表皮系数, 无因次。

3 数值反演计算样版曲线及曲线特征分析

根据上面所求得的 Laplace 空间解, 利用 Stehfest 方法进行数值反演, 并以此为基础作出了对应的压力及压力导数样版曲线。

3.1 三重介质部分射开井流动阶段的划分

图2为识别部分射开三重介质油藏试井模型的双对数特征曲线, 可以划分7个流动阶段: 第Ⅰ段是早期部分, 压力和压力导数重合, 表明是受井筒储集效应影响的续流段; 第Ⅱ段是受部分射开影响的早期球形流动阶段; 第Ⅲ段是溶洞向裂缝发生窜流的过渡段; 第Ⅳ段是溶洞系统和裂缝系统整体产生径向流动阶段, 一般而言, 这一阶段并不易出现; 第Ⅴ段是基质向裂缝发生窜流的过渡段; 第Ⅵ段是整个系统达到径向流动阶段, 这一阶段往往会被边界反应所掩盖; 第Ⅶ段是顶、底边界反应阶段, 显然, 当顶、底边界均为封闭边界时压力导数表现为值为0.5的水平线, 而当顶、底边界存在定压边界时则表现出不同程度的下掉, 顶、底边界均为定压边界比顶、底边界为混合边界下掉要快一些。

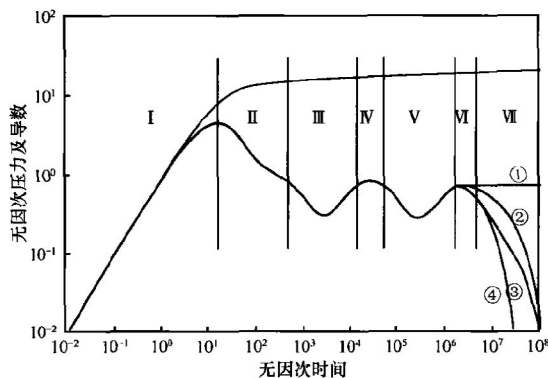


图2 三重介质部分射开井流动阶段划分

Fig. 2 Flow regime division of a partial-penetration

well in a triple-porosity reservoir

- ①顶、底均为封闭边界; ②顶为定压、底为封闭;
③顶为封闭、底为定压; ④顶、底均为定压边界

3.2 打开程度 L_D 对样版曲线的影响 [$L_D = (Z_b - Z_a)/h$]

图3为不同打开程度 L_D (8%, 30%, 50%, 100%) 对三重介质部分射开样版曲线的影响。可以看出, 打开程度只影响早期的导数曲线形态。当打开程度 L_D 减小时, 压力曲线整体上移, 压力导数曲线峰值增大, 打开程度越小, 即打开越不完全, 压力导数的峰值就越大; 当打开程度 L_D 较小时 (如图3所示, $L_D = 8\%$), 压力和压力导数曲线除了维持原有的变化趋势外, 导数曲线还出现了一个较小的凹子; 当打开程度趋于100%时, 模型蜕化为完全射开模型。由此说明, 对打开程度较大的部分射开井, 若选用完全射开模型进行试井解释, 误差较小, 但对打开程度较小的部分射开井, 若选用完全射开模型进行试井解释, 误差较大。

3.3 各向异性对样版曲线的影响

图4为各向异性 ($k_{fr}/k_{fs} = 1, 10, 30, 100$) 对三重介质部分射开井的压力及压力导数曲线的影响。可以看出, 当 k_{fr}/k_{fs} 逐渐增大时, 即各向异性越强时, 出现球形流的时间越晚, 而对样版曲线的后期特征基本没有影响, 说明各向异性主要影响球形流出现的时间。

此外, 与常规的三重介质模型^[13]相同, ω_f 和 ω_s 影响窜流段下凹的深度和宽度, 窜流系数 λ_m 和 λ_s 主要影响过渡段出现的时间早晚, 此处不再赘述。

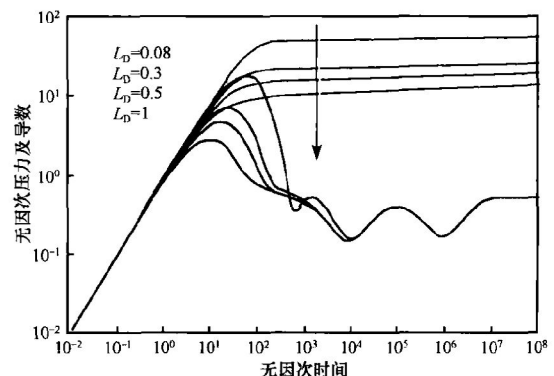


图3 打开程度对样版曲线的影响

Fig. 3 Effects of penetration degree

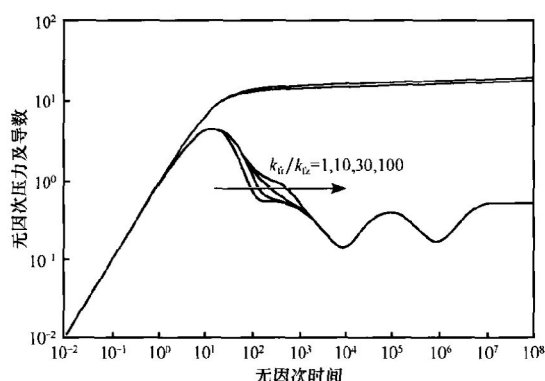


图4 各向异性对样板曲线的影响

Fig. 4 Effects of anisotropy

4 结论

1) 在考虑井筒储集和表皮效应的情况下,建立了三重介质油藏部分射开井的试井模型,求得了不同顶、底边界组合条件下的 Laplace 空间解析解;利用 Stehfest 数值反演求得实空间的解,绘制出新型的样板曲线,并划分了流动阶段。

2) 当顶、底边界均为封闭边界时,压力导数曲线最终表现为值为 0.5 的水平线;而当顶、底边界存在定压边界时,压力导数曲线后期则表现出不同程度的下掉,而且顶、底边界均为定压边界比顶、底边界为混合边界下掉要快一些。

3) 通过对部分射开 ($L_D < 100\%$) 与完全射开 ($L_D = 100\%$) 样板曲线的比较,发现若用完全射开模型对部分射开井进行试井解释,将会解释出一个较大的表皮,产生一种井底污染严重的假象而得出不准确的判断。

4) 打开程度对样板曲线影响的分析结果表明,对打开程度较大的部分射开井,若选用完全射

开模型进行试井解释,误差较小;但对打开程度较小的部分射开井,若选用完全射开模型进行试井解释,误差较大。

参考文献

- 1 陈清华,刘池阳,王书香,等.碳酸盐岩缝洞系统研究现状与展望[J].石油与天然气地质,2002,23(2):196~202
- 2 阎相宾.塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征[J].石油与天然气地质,2002,23(3):262~265
- 3 肖玉茹,何峰煜,孙义梅.古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究[J].石油与天然气地质,2003,24(1):75~80
- 4 Abbaszadeh M, Hegeman P. Pressure-transient analysis for a slanted well in a reservoir with vertical pressure support[J]. SPE 20793, 1990
- 5 Ozkan E, Raghavan R. New solutions for well-test analysis problems; Part 1, analytical considerations[J]. SPE 18615, 1991, 6(3):359~368
- 6 Kucuk F J, Kirwan P A. New skin and wellbore storage type curve for partially wells[J]. SPE 11676, 1987, 2(4):546~554
- 7 Yildiz T, Bassiouni Z. Transient pressure analysis in partially penetrating wells[J]. SPE 21551, 1990
- 8 Bui T D, Mamora D D, Lee W J. Transient pressure analysis for partially penetrating wells in naturally fractured reservoirs[J]. SPE 60289, 2000
- 9 廖新维,沈平平.现代试井分析[M].北京:石油工业出版社,2002.125~130
- 10 王建平,王晓东,马世东.各向异性部分射开直井不稳定渗流理论研究[J].大庆石油地质与开发,2007,26(3):65~71
- 11 Stehfest H. Algorithm 368 numerical inversion of Laplace transform[J]. Communication of the ACM, 1970, 13(1):47~49
- 12 吴小庆.数学物理方程[M].四川成都:电子科技大学出版社,2004.168~178
- 13 Camacho V R, Vasquez C M, Castrejon A R, et al. Pressure transient and decline curve behaviors in naturally fractured vuggy carbonate reservoirs[J]. SPE 77689, 2002

(编辑 李 军)

(上接第 800 页)

- 2 吴建发,郭建春,赵金洲.模糊分析方法优选压裂井层[J].天然气工业,2005,25(2):84~86
- 3 郭建春,吴建发,赵金洲,等.用灰色关联分析法优选压裂井[J].钻采工艺,2005,28(2):25~27
- 4 冉启全,周南翔.双河油田油层组油层的灰色关联评价[J].西南石油学院学报,1993,15(4):25~31
- 5 邓聚龙.灰理论基础[M].湖北:华中科技大学出版社,2002.122~150
- 6 阳小平,程林松,孙福街,等.灰色关联分析法在油气藏措施优选中的应用[J].新疆石油地质,2003,24(4):335~337
- 7 易德生,郭萍.法灰色理论与方法—提要·题解·程序·应用

[M].北京:石油工业出版社,1992.25~57

- 8 黄润龙.数据统计与分析技术—SPSS 软件实用教程[M].北京:高等教育出版社,2004.168~170
- 9 谢润成,周文,李良.鄂尔多斯盆地大牛地上古生界气藏压裂效果分析[J].天然气工业,2004,24(12):71~73
- 10 郝蜀民,惠宽洋,李良.鄂尔多斯盆地大牛地大型低渗气田成藏特征及其勘探开发技术[J].石油与天然气地质,2006,27(6):762~768
- 11 刘思峰,郭天榜,编著.灰色系统理论及其应用[M].河南:河南大学出版社,1991.81~83

(编辑 董 立)