

文章编号: 1673-5005 (2007) 03-0085-05

聚合物驱垂直井筒流动和视粘度模型

张 凯¹, 樊 灵¹, 姚 军¹, 苟立平², 周广慧²

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2 胜利油田 胜利采油厂, 山东 东营 257051)

摘要:与常规油井相比, 聚合物驱抽油机井因其产出液粘度明显增大导致抽油杆受力状况变差, 杆管偏磨现象严重。通过实验对聚合物产出液的流变特性进行了研究。考虑油井举升过程, 利用幂律模式绘制了幂律指数与稠度系数随聚合物浓度、温度变化的关系图版。以非牛顿流体流变学理论和人工举升理论为基础, 按照不同的流动规律, 给出了从地层到井口聚合物驱垂直井筒流动的运动方程及其边界条件, 并对方程进行求解得到了视粘度模型。应用结果表明, 该模型能够提高设计结果的误差精度, 为聚合物驱抽油机井的优化设计提供理论指导。

关键词: 聚合物驱; 视粘度模型; 垂直井筒; 运动方程; 幂律模式

中图分类号: TE 357. 46 **文献标识码:** A

Model of flow and apparent viscosity in vertical wellbores under polymer flooding

ZHANG Kai¹, FAN Ling¹, YAO Jun¹, GOU Li-ping², ZHOU Guang-hui²

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. Shengli Oil Production Plant of Shengli Oilfield, Dongying 257051, Shandong Province, China)

Abstract: Compared with normal oil well, viscosity of output liquid from rod-pumped well under polymer flooding is obviously increased, so that force-summing state of pumping rod becomes bad. Also, eccentric wear is worsened between rods and tubes. The rheological properties of polymer output liquid were conducted through experiments. Considering the process of artificial lift, the chart boards of relationship that power-law index and consistency coefficient vary with polymer concentration, temperature were drawn using by power-law model. According to different flow rules from bottom hole to wellhead, equations of motion and boundary conditions in vertical wellbore were presented on the basis of non-Newtonian fluid rheology and artificial lift theory. The models of apparent viscosity were finally put forward by solving above equations. The applied result shows that the models are conducive to improve error precision of designing rod-pumped well for polymer flooding and can be used as theoretic models for optimization design of this kind of oil wells.

Key words: polymer flooding; model of apparent viscosity; vertical wellbore; motion equation; power-law model

聚合物驱抽油机井见聚后, 油井产出液为非牛顿流体。与常规油井相比较, 产出液的流体特性发生了较大变化, 主要表现为粘度的改变。对于牛顿流体来说, 粘度取决于流体物性, 与流体运动无关, 一定条件下(如恒温、恒压)所测定的物性参数在任何流动情况下均为常数值。而聚合物驱油井产出液粘度随剪切速率的变化而变化, 情况要复杂得多。

因为非牛顿流体的物质结构复杂, 其本构方程中往往带有多个物性参数, 这些物性参数会随流体状态的变化而变化, 所以在产出液从地层到井口的流动过程中, 其粘度值不能按照常规方法进行计算。针对上述问题, 笔者建立聚合物驱垂直井筒流动及视粘度模型, 对举升过程中产出液的流动规律进行研究, 为聚合物驱抽油机井优化设计提供理论指导。

收稿日期: 2006 - 08 - 14

基金项目: 中国石油化工股份有限公司项目(P05053)

作者简介: 张凯(1980 -), 男(汉族), 四川蓬安人, 博士研究生, 从事采油工艺及油气田开发理论与系统工程方面的研究。

1 聚合物驱产出液水相流变关系图版

聚合物溶液的浓度、温度、含盐质量浓度以及聚合物相对分子质量的改变都会导致溶液粘度的变化。本文中研究对象为聚合物驱抽油机井,根据产出液流动特性和视粘度模型的建模要求,对聚合物驱油井产出液中水相的流变性随聚合物浓度与温度的变化关系进行实验研究。流变模式采用幂律模式^[1]。

根据现场实际,实验介质选用胜利油田胜利采油厂使用的聚合物 HPAM 干粉和油田采出水,聚合物相对分子质量为 2.02×10^7 , 固含量为 91.16%, 地层水矿化度为 29.1 g/L。实验步骤如下:

- (1) 配制浓度为 10, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 750, 1000, 1500 和 2000 mg/L 的聚合物溶液;
- (2) 对每一浓度的聚合物溶液采用 NXS-31 高温流变仪测试 20~90 内 8 组数据 (以 10 为间隔), 每组数据包含 4 组相对应的剪切速率和粘度值;
- (3) 利用获取的剪切速率和粘度数据回归幂律指数与稠度系数的关系曲线, 再进行插值处理, 绘制出幂律指数 n 和稠度系数 K 随聚合物溶液浓度、温度变化的关系图版, 用于垂直井筒流动和视粘度模型计算。

幂律指数与稠度系数的回归关系式为

$$T_{cr} = K \left(\frac{dv}{dr} \right)^n \tag{1}$$

式中, T_{cr} 为剪切应力, N/m^2 ; r 为径向距离, m ; v 为流动速度, m/s

实验得到的幂律指数 n 和稠度系数 K 随浓度、温度变化的关系图版见图 1、2。

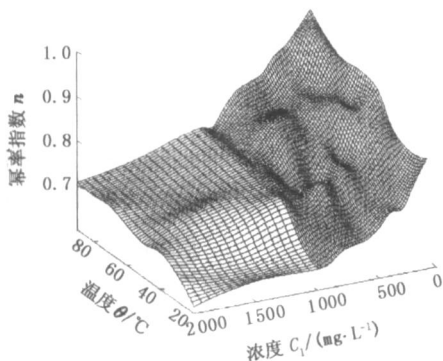


图 1 幂律指数 n 随浓度、温度变化关系图版

从图 1 和图 2 中可以看出, 幂律指数随温度的增加而变大, 随浓度的增加而变小; 稠度系数则随温度的增加而变小, 随浓度的增加而变大。依据该图版, 编制计算程序, 给定产出液所含聚合物浓度及井筒

温度就可得到该处流体的幂律指数与稠度系数。

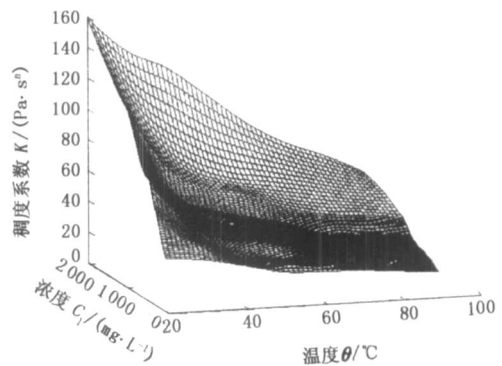


图 2 稠度系数 K 随浓度、温度变化关系图版

2 垂直井筒中聚合物产出液的粘度

混合液的粘度与含水率以及水相和油相的粘度有关。通常采用含水率加权法确定混合液的粘度, 表达式为

$$\mu = f_w \mu_w + (1 - f_w) \mu_o \tag{2}$$

式中, f_w 为含水率; μ 为混合液的粘度, $mPa \cdot s$; μ_o 和 μ_w 分别为产出液中油相和水相 (聚合物溶液) 粘度, $mPa \cdot s$

对于水驱产出液, 水和油都是牛顿流体, 所以只要含水率一定, 混合液的粘度就是定值。而聚合物驱油井产出液为非牛顿流体, 粘度与剪切速率有关, 须通过精确计算, 此混合液粘度用视粘度来表示。

2.1 地层中产出液水相视粘度

根据改进的 Blake-Kozeny 方程^[2], 利用毛管受力平衡关系, 经过推导可得到地层中产出液水相视粘度模型为

$$\mu_d = K \left(\frac{v}{k_0} \frac{1+3n}{n} \right)^{n-1} = K \left(\frac{1+3n}{k_0 n} \right)^{n-1} v^{n-1} \tag{3}$$

式中, k_0 为孔隙度, %; k_0 为毛管半径, m 。

2.2 井筒中产出液管流水相视粘度

聚合物驱油井水相管流视粘度方程^[3]为

$$\mu_a = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8v}{D} \right)^{n-1} \tag{4}$$

因为产出液沿管轴直线运动, 仅是径向坐标的函数, 属于侧粘流动, 其平均流速^[4]为

$$\bar{v} = \frac{Q}{R^2} = \frac{n}{3n+1} \left(\frac{p}{2KL} \right)^{1/n} R^{(n+1)/n} \tag{5}$$

式中, p 为管段总压差, Pa ; L 为管段长度, m ; D 为当量直径, m ; R 为套管半径, m 。

由式 (2), (4) 和 (5) 得出井筒中产出液管流视粘度模型为

$$\mu_{gl} = (1 - f_w) \mu_o + f_w K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{4}{R} \right)^{n-1} \times$$

$$\left[\frac{n}{3n+1} \left(\frac{p}{2K} \right)^{1/n} R^{(n+1)/n} \right]^{n-1} \quad (6)$$

2.3 上冲程杆管环空中产出液视粘度

在抽油机上冲程过程中,杆管环空通道里,杆管间的幂律流体同时向上运动,油管静止,同时伴有轴向压力梯度,形成受抽油杆拖动的环隙空间压力流。假设产出液不可压缩,层流流动,且流动为定常流。

2.3.1 运动方程与速度分布

图 3 所示的圆柱坐标系中,流体运动方程^[5]为

$$\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial(rT_{rz})}{\partial r} - g = 0 \quad (7)$$

式中, $\frac{\partial p}{\partial z}$ 为 z 方向压力梯度,由多相垂直管流计算获得, Pa/m; ρ 为产出液密度, kg/m³。

对式 (7) 进行积分,可得

$$T_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial p}{\partial z} - g \right) r + \frac{C}{r} \quad (8)$$

这里的 C 为积分常数,当抽油杆半径 $r = R$ (为抽油杆半径与套管半径的比) 趋于无穷小时,其杆壁处的剪切应力应是有限值, $C = 0$ 。

图 3 中, z 方向为正方向,

$\frac{dv}{dr} < 0$, 幂律流体本构方程为

$$T_{rz} = K \left(- \frac{dv}{dr} \right)^n \quad (9)$$

将式 (9) 带入式 (8) 中,根据边界条件 $r = R$ 时 $v = v_0$ 进行积分

$$v_0 - v = \int_r^R \left[\frac{1}{2K} \left(\frac{\partial p}{\partial z} - g \right) \right]^{1/n} dr \quad (10)$$

这里 v_0 为柱塞运动的平均速度, m/s 因为假设环空内流动为定常流,所以为简化计算,认为抽油机悬点匀速运动,且抽油杆和悬点运动同步。在作简谐运动时,抽油杆速度为

$$v_0 = \frac{S}{2} \sin \omega t \quad (11)$$

其中

$$\omega = N/30$$

式中, S 为冲程, m; ω 为曲柄轴角速度, r/s; t 为时间, s; N 为冲次, min⁻¹。

对式 (11) 在时间区间内积分,然后平均求得

v_0 。由式 (10) 得到上冲程过程中环空内流体速度分布为

$$v = v_0 - \frac{n}{n+1} \left[\frac{1}{2K} \left(\frac{\partial p}{\partial z} - g \right) \right]^{1/n} \left[r^{(n+1)/n} - (R)^{(n+1)/n} \right] \quad (12)$$

2.3.2 平均流速与视粘度模型

在得到速度分布的基础上,可以得到其流量方程为

$$Q = \int_0^R 2\pi r v dr = \int_0^R 2\pi r \left\{ v_0 - \frac{n}{n+1} \left[\frac{1}{2K} \left(\frac{\partial p}{\partial z} - g \right) \right]^{1/n} \left[r^{(n+1)/n} - (R)^{(n+1)/n} \right] \right\} dr \quad (13)$$

积分得

$$Q = R^2 (1 - 2^{-2}) \left[v_0 + A (R)^{n/(n+1)} \right] - \frac{2nA}{3n+1} R^{(3n+1)/n} \left[1 - 2^{-(3n+1)/n} \right] \quad (14)$$

其中

$$A = \frac{n}{n+1} \left[\frac{1}{2K} \left(\frac{\partial p}{\partial z} - g \right) \right]^{1/n}$$

上冲程过程中环空平均流速 \bar{v}_{up} 为

$$\bar{v}_{up} = \frac{Q_{up}}{R^2 (1 - 2^{-2})} = v_0 + A (R)^{n/(n+1)} - \frac{2nA}{(3n+1) (1 - 2^{-2})} R^{(n+1)/n} \left[1 - 2^{-(3n+1)/n} \right] \quad (15)$$

上冲程环空管道中,流体受力为壁面切应力与压力,所以其符合管流视粘度模型,将其带入得到上冲程过程中环空内视粘度模型为

$$\begin{cases} \mu_{up} = f_w \mu_{vup} + (1 - f_w) \mu_0, \\ \mu_{vup} = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8\bar{v}_{up}}{D} \right)^{n-1}, \\ \bar{v}_{up} = v_0 + A (R)^{\frac{n}{n+1}} - \frac{2nA}{(3n+1) (1 - 2^{-2})} R^{(n+1)/n} \times \left[1 - 2^{-(3n+1)/n} \right]. \end{cases} \quad (16)$$

式中, μ_{up} 和 μ_{vup} 分别为上冲程杆管环空中产出液和产出液中水相的粘度, mPa · s

2.4 下冲程杆管环空中产出液视粘度

在抽油机下冲程过程中(图 4),抽油杆向下运动,带动环隙中液体流动,形成环隙空间的拖拽流。

2.4.1 运动方程与速度分布

下冲程过程中,液体受力情况与上冲程相同,所以其运动方程不变。但下冲程没有柱塞向上运动的

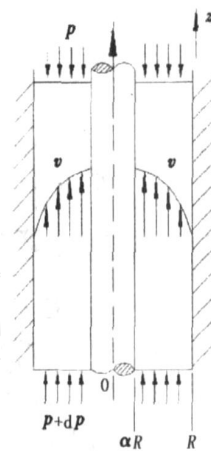


图 3 上冲程油井产出液环空流动分析

顶托作用, $\frac{\partial p}{\partial z}$ 不能通过计算获取, 为未知量, 为了与上冲程区别开来, 用 x 代替 $\frac{\partial p}{\partial z}$, 并进行积分, 得

$$T_{zr} = \frac{1}{2} (x - g) r + \frac{C}{r} \quad (17)$$

同式 (8), 这里 $C = 0$ 。又因为 z 方向为正方向, $\frac{dv}{dr} > 0$, 将式 (1) 带入式 (17) 积分得

$$v = \frac{n}{n+1} \left[\frac{x-g}{2K} \right]^{1/n} r^{(n+1)/n} + C_1 \quad (18)$$

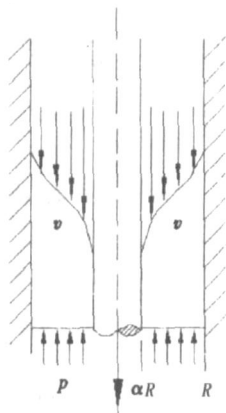


图 4 下冲程油井产出液环空流动分析

这里 x 与 C_1 是未知数。式 (18) 的边界条件为

$$v|_{r=R} = 0, \quad v|_{r=R} = v_b \quad (19)$$

将式 (19) 带入式 (18), 可以得到

$$x = \frac{2Kv_b^n}{R^{n+1} \left[\frac{n}{n+1} \right]^n \left[\left(\frac{n+1}{n} - 1 \right)^n + g \right]} + g,$$

$$C_1 = \frac{v_b}{1 - \left(\frac{n+1}{n} \right)^n}$$

于是下冲程过程中环空内流体速度分布为

$$v = \frac{v_b}{1 - \left(\frac{n+1}{n} \right)^n} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right] \quad (20)$$

2.4.2 平均流速与视粘度模型

在得到速度分布的基础上, 可以得到其流量方程为

$$Q = \int_0^R 2\pi r v dr = \int_0^R 2\pi \left\{ \frac{v_b}{1 - \left(\frac{n+1}{n} \right)^n} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right] \right\} r dr \quad (21)$$

积分得

$$Q = \frac{2\pi v_b R^2}{1 - \left(\frac{n+1}{n} \right)^n} \left[1 - \frac{n}{3n+1} \left(1 - \left(\frac{n+1}{n} \right)^n \right) \right] \quad (22)$$

再求得下冲程过程中环空平均流速 \bar{v}_{down} 为

$$\bar{v}_{down} = \frac{Q_{down}}{R^2 (1 - \left(\frac{n+1}{n} \right)^n)} = \frac{2v_b}{(1 - \left(\frac{n+1}{n} \right)^n)} \times \left[1 - \frac{n}{3n+1} \left(1 - \left(\frac{n+1}{n} \right)^n \right) \right] \quad (23)$$

其视粘度模型为

$$\begin{cases} \mu_{down} = f_w \mu_{wdown} + (1 - f_w) \mu_o, \\ \mu_{wdown} = K \left[\frac{3n+1}{4n} \right]^n \left[\frac{8\bar{v}_{down}}{D} \right]^{n-1}, \\ \bar{v}_{down} = \frac{2v_b}{(1 - \left(\frac{n+1}{n} \right)^n)} \times \left[1 - \frac{n}{3n+1} \left(1 - \left(\frac{n+1}{n} \right)^n \right) \right]. \end{cases} \quad (24)$$

式中, μ_{down} 和 μ_{wdown} 分别为下冲程杆管环空产出液和产出液中水相的粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$

3 实例计算与分析

3.1 模型计算步骤

利用文献 [7] 中的抽油机井优化设计软件及模型 (16)、(24) 进行计算, 计算步骤如下:

(1) 在井筒分段多相管流计算部分, 根据聚合物浓度和不同井段的温度依据实验模板可以得到不同井段所对应的 n, K 值;

(2) 在泵下运算部分, 根据分段压力梯度, 油管 and 流体物性等数据通过式 (6) 可以得到泵下各段管流视粘度值, 并进行泵下管流运算;

(3) 根据模型 (16) 及 (24), 求得上、下冲程杆管环空流动的 \bar{v} 及 μ_w , 再导出 μ_{up} 与 μ_{down} , 取其均值得到泵上各段管流视粘度值, 进行泵上环空流运算。

3.2 实例分析

为了验证模型的正确性和可靠性, 对胜利油田 8 口聚合物驱抽油机井进行了模拟计算, 并与常规抽油机井粘度模型计算结果进行了对比。这里仅以胜利油田胜利采油厂 1 口聚合物驱抽油机井为例进行说明。

该井油层中深 1975 m, 油层压力 18 MPa, 油层温度 75 °C, 见聚浓度 125 mg/L, 油相密度 0.921 0 g/cm³, 气相密度 0.804 2 g/cm³, 地层水密度 1.02 g/cm³。2003 年 12 月, 该井液面 501 m, 产液量 50.5 m³/d, 含水率 79.9%, 气油比为 9, 下泵深度 895.98 m, 泵径 0.056 m, 冲程 3 m, 冲次 6 次/min; 到 2004 年 6 月, 该井液面变为 332 m, 产液量 45.7 m³/d, 含水率 74%, 气油比为 4, 下泵深度、泵径、冲程及冲次

不变。该井采用 $22 \times 584.7 + 25 \times 311.3$ 的抽油杆柱组合进行生产,实测最大载荷为 54.89 kN,最小载荷为 22.03 kN。

分别将常规粘度模型与聚合物驱垂直井筒视粘度模型应用于油井优化设计程序,并对其生产情况进行模拟计算。常规粘度模型计算得到的最大载荷为 51.03 kN,最小载荷为 24.76 kN,其误差分别为 7.03%和 12.39%;而使用聚合物驱垂直井筒视粘度模型计算时,得到最大载荷为 53.16 kN,最小载荷为 23.02 kN,其误差分别为 3.15%和 4.49%。可以看出,聚合物驱垂直井筒视粘度模型有利于油井优化设计,能够提高其计算精度。

将聚合物驱视粘度模型计算结果与常规模型计算结果进行对比,得到图 5 及图 6。在图 6 中,两种粘度模型计算结果相差不大,但在井深 400 m 以下时,粘度值计算结果相差较大,这影响了油井压力梯度迭代和摩擦阻力的计算,最终会影响油井优化设计的结果。

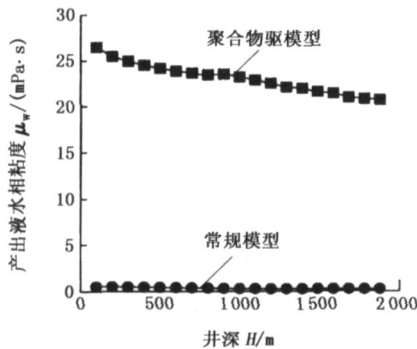


图 5 两种模型产出液水相粘度计算结果

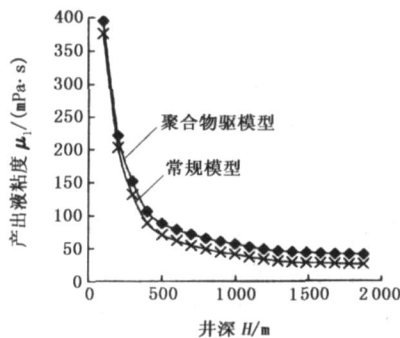


图 6 两种模型产出液粘度计算结果

4 结束语

利用实验给出了幂律指数与稠度系数随聚合物浓度与温度变化的关系图版;对于不同流动过程,给出了聚合物驱垂直井筒流动的运动方程及其边界条件,并求解得到了视粘度模型。聚合物驱垂直井筒

视粘度模型更适用于抽油机井优化设计,能够提高油井设计结果的精度,为聚合物驱抽油机井的优化设计以及杆柱受力分析提供了理论参考。

参考文献:

- [1] 郑俊德,岳湘安,曹广胜,等. 聚合物驱采油井 IPR 曲线确定方法 [J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(5): 56-60
ZHENG Jun-de, YUE Xiang-an, CAO Guang-sheng, et al. Determination method of producers' IPR curve in polymer flooding [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998, 20(5): 56-60
- [2] 葛家理,宁正福,刘月田,等. 现代油藏渗流力学原理 [M]. 北京:石油工业出版社, 2001: 261-262
- [3] 陈家琅. 水力学 [M]. 北京:石油工业出版社, 1980: 140-153
- [4] 李兆敏,蔡国琰. 非牛顿流体力学 [M]. 东营:石油大学出版社, 1998: 81
- [5] 吴信荣,张平,董贤勇,等. 对本构方程书写形式的探讨 [J]. 石油大学学报:自然科学版, 2004, 28(5): 86-89.
WU Xin-rong, ZHANG Ping, DONG Xian-yong, et al. Discussion on expression of constitutive equations [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(5): 86-89.
- [6] 郑俊德,刘合,阎熙熙,等. 聚合物产出液在抽油泵的缝隙中流动 [J]. 石油学报, 2000, 21(1): 71-75.
ZHENG Jun-de, LIU He, YAN Xi-zhao, et al. Flow of polymer output liquid in crevice of oil well pump [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(1): 71-75.
- [7] 张琪. 采油工程原理与设计 [M]. 东营:石油大学出版社, 2001: 109, 148
- [8] 孙健. 聚合物驱抽油机井摩擦载荷的计算 [J]. 石油机械, 2003, 31(7): 12-14
SUN Jian. Calculation of friction load on rod string in polymer flooding wells [J]. China Petroleum Machinery, 2003, 31(7): 12-14
- [9] STEPAN YAN R, SLOT J J M, MOLENAAR J, et al. A simple constitutive model for a polymer flow near a polymer-grafted wall [J]. Journal of Rheology, 2005, 49(5): 1129-1151.
- [10] ZHOU Y, SHAH S N. New friction-factor correlations for non-Newtonian fluid flow in coiled tubing [R]. SPE 77960-PA, 2006
- [11] WANG De-min, JIANG You-lin, WANG Yan, et al. Viscous-elastic polymer fluids rheology and its effect upon production equipment [R]. SPE 77496-PA, 2004

(编辑 李志芬)