

致密气藏压后各段产能定量长期检测技术及应用

许建华¹ 安娜 白洛娃¹ 赵宇新² 崔彬² 许云春³ 杨兵³

(1. Geosplit 公司; 2. 中石化临汾煤层气分公司; 3. 四川瑞都石油工程技术服务有限公司)

[摘要]传统的生产测井和化学示踪方法存在施工风险和定性测量的缺陷，量子示踪生产监测技术采用纳米级量子点，以聚合物涂层的形式附着在支撑剂表面，随着压裂施工将量子点部署到井下。之后在井口采集产液，实验室分析即可得到各段气、水的流速。该技术成功应用于临汾致密气藏延3G11水平井18级压裂施工中，取得了较好的效果。实现了定量、长期水平井各段气、水两相产量监测，在致密油气藏多级压裂水平井产能长期监测具有很大的应用前景。

关键词：量子技术 生产监测 水平井 致密气藏 压后评估

1 研发背景

水平井多级压裂是目前非常规致密气藏勘探开发的主流应用技术，为了提高经济效益，近年来，地质工程一体化综合研究被广泛应用于非常规油气勘探中[1,2,3,4]（张福祥等，2016；杨向同等，2017；许建华等，2014，2019）。在一体化研究中，最终的检验目标为产量。但对于水平井或直井压后各段的产量测量一直是一个难题。传统的生产测井使用电缆或连续油管，可以测量流速，但不能区分气、水两相，在水平井段存在卡堵等施工风险。同时，结果仅为测量期间的“瞬时产量”，如果要获得不同时期的产量数据，需要多次关井作业，影响正常生产。而化学示踪剂仅提供定性的数据，受温度、酸碱度等因素影响较大。因此，在水平井各段产能监测方面需要研发新技术[5]。一种新型量子示踪技术为该项监测带来希望，该示踪代码与特定的流体反应，分析井口收集到的样品即可得到流入剖面的定量评价 [6,7,8]。

2 示踪量子 and 量子支撑剂

量子是纳米级的微颗粒，化学组成决定了其比自然荧光粉具有更好稳定性，较传统的有机染色剂，光漂白效应减弱，同时耐受酸和高温。几种不同类型量子点的组合可以形成大量独特且可追踪识别的示踪标记物，总数可高达60种，具有宽吸收光谱和窄的发射光谱（图1），易于识别和分析，从而避免了实验室分析的失误，这种独特的量子点示踪技术是一口30段压裂水平井产能监测的基础。

第一作者简介：许建华，男，2008年毕业于中国科学院地质与地区物理研究所，获博士学位，现就职于GeoSplit公司，任中国区业务发展总监，主要从事非常规油气地质工程一体化研究与工程服务。 通讯地址：北京市朝阳区望京南湖中园一区124-1-3-2

电话：13811371872 E-mail: xujianhua@geosplit.org

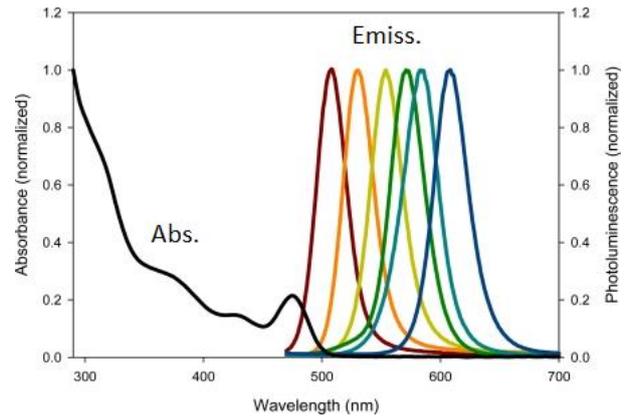
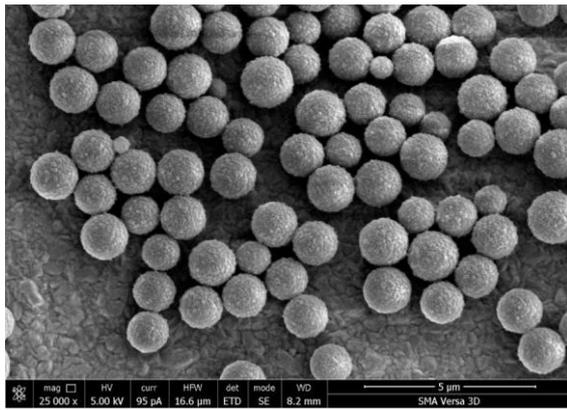


图1 量子点特征（左：扫描电镜图像；右：量子点光谱特征）

在了解示踪量子点本身特性的基础上，在实际应用过程中，以支撑剂涂层的形式将示踪量子点附着在支撑剂表面。该聚合物涂层包含了上百万个示踪量子点（图2）。当接触烃类和水时，量子示踪支撑剂涂层会逐渐降解

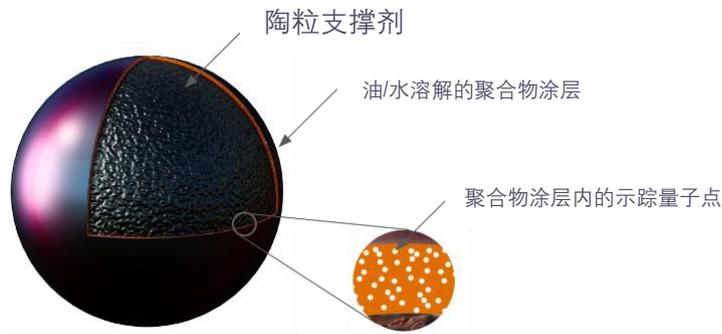


图2 量子支撑剂结构示意图

支撑剂涂层的结构包括三部分，首先为功能性填料，这是示踪量子点赋存的基质，遇油或水溶解，产生量子点扩散通道，使示踪量子由聚合物内部运移至其表面；其次为不可溶聚合物网络，为保护性骨架，用于维持涂层强度，避免破坏或改变聚合物颗粒的几何尺寸；量子示踪点保存在基质中，为油、气、水不同相态的高精度指示标志。在压裂施工时，量子示踪支撑剂将会随着传统支撑剂被泵入地层，当接触相应的地层流体相，涂层的功能性填料膨胀，形成扩散通道，示踪量子通过该通道从聚合物涂层中运移出来，吸附在示踪剂表面，随着流体的流动，被油相或水相捕获带走，从而进一步被携带至井口。由于其为纳米级的颗粒，故不具有足够的能量由一相向另一相转换。故此，每一种相态的地层流体具有其独特的示踪代码。量子示踪点的释放与流速成正相关，这一释放过程持续进行，时间可达3年。

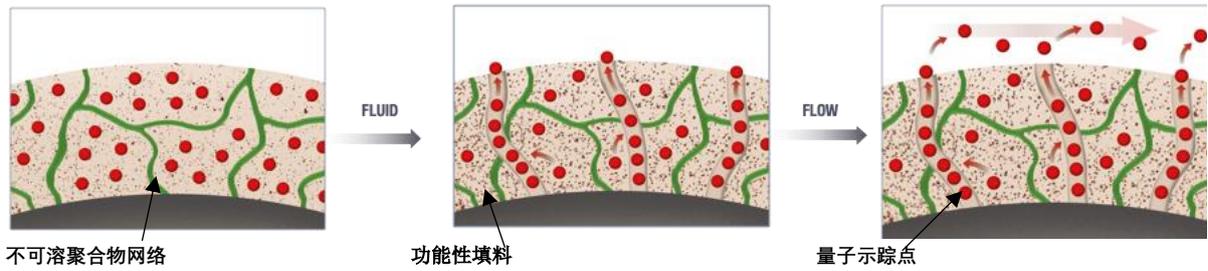


图3 示踪量子点释放过程示意图

3 量子支撑剂施工及分析流程

在压裂施工过程中，需要针对不同段的不同相态泵入不同代码的量子示踪支撑剂，在生产过程中，从井口取液样或气样。油水液样相对简单，而气样需要使用特殊的采样装置。在采样前，在管线上安装旁通管，采样时，打开前后两个阀门，让气体通过法兰和过滤装置，过滤室包括量子过滤膜、金属过滤器、塞子和O型环等装置（图4），可以将量子示踪点过滤出来。按一定的时间间隔，关闭前后两个阀门，使用球阀排空，取出量子过滤膜。

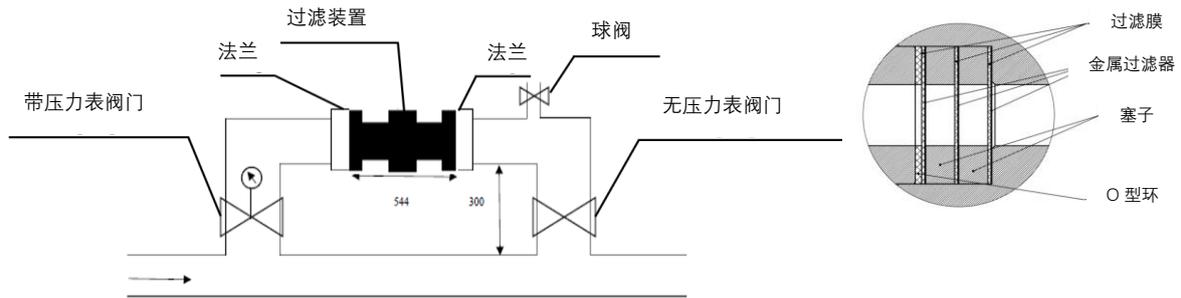


图4 气样井口采样设备（左：旁通管示意图；右：过滤室）

采集的气体量子示踪点使用细胞分析仪进行识别，首先产生一束细的水流，使量子示踪点竖向排列，逐个通过，接受激光照射（图5左）。吸收激光后，不同代码量子点会发出不同波长的光，可被仪器捕获，并将数据收集发送至计算机进行分析（图5中）。通过大数据聚类统计分析，将不同光谱特征的数据区分，划分为不同类别，分别与不同代码的示踪量子点对应（图5右），而不同示踪代码量子点类型与不同段的不同相相关联，通过统计不同示踪量子点的数量百分比，即可计算不同段、不同相态的流速百分比。

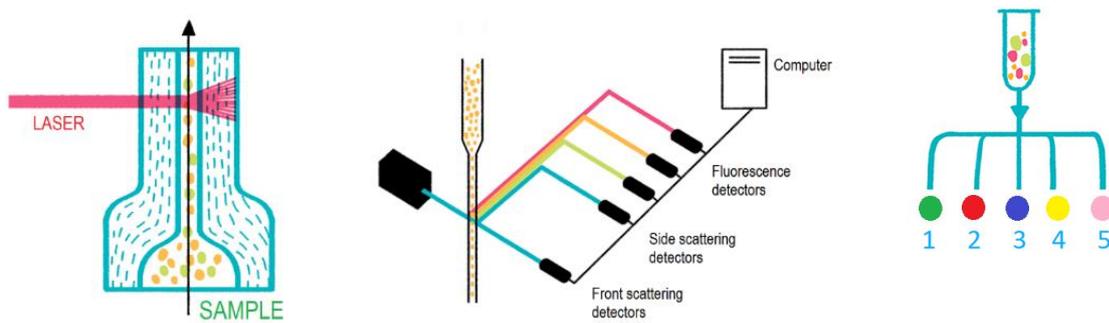


图5 样品分析流程

4 量子技术有效性验证

在实际井下施工前，对于量子示踪技术的有效性进行验证是十分必要的。该技术可以在实验室开展“盲测”，即选取不同示踪代码的量子支撑剂，分别称量不同重量，记录并计算其重量百分比。然后将其混合后，溶于水。在一定速度搅拌器的作用下，量子点会从示踪支撑剂内释放出到水中，通过统计水中不同示踪代码量子点的数量，计算其数量百分比。对比不同代码量子示踪剂重量百分比和分析后的不同代码数量百分比，可以看出误差大多在1%以下，从而证明该方法的有效性。

表1 实验室“盲测”数据对比表

# of mixture (codes)	Prepared by Customer		Determined by GeoSplit	Deviation, %	
	Weight, g	%			
Hydrophilic mixtures					
Mixture H1	Code 1	7,44	7,44	6,4	1,0
	Code 2	7,83	7,83	7,1	0,7
	Code 3	9,25	9,25	7,7	1,6
	Code 4	7,09	7,09	6,3	0,8
	Code 5	7,79	7,79	8,2	0,4
	Code 6	8,06	8,06	8,9	0,8
	Code 7	11,33	11,33	10,6	0,7
	Code 8	11,63	11,63	13,6	2,0
	Code 9	19,41	19,41	18,2	1,2
	Code 10	10,17	10,17	13,0	2,8
Total	100,0	100,0	100,0	-	

在实验室“盲测”的基础上，与传统生产测井方法对比验证，该井为非常规致密油藏，采用滑流水7段射孔压裂完井，初产327桶/天，含水率50%，使用连续油管传送工具。量子示踪生产监测从投产开始2018年3月开始，传统的生产测井包括测温仪、声波噪音和电阻率，从2018年4月份实施，该水平井产量较低，故没有采用流速仪。两种不同方法的对比结果见图6，其中1、2、3、4、6段结果较接近，而5、7段差别稍大。主要原因为两种方法测量不是同时进行的，而压后水平段的产量是变化的，传统生产测井测量的是某一时间的“瞬时产量”，而量子示踪技术测量的是一段时间的累积产量[9, 10, 11]。

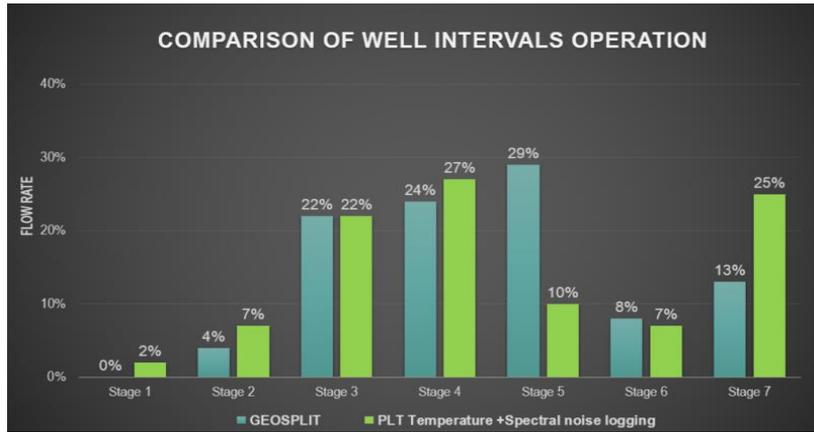


图6 量子示踪产量监测与传统生产测井结果对比图

5 量子生产监测技术在致密气田的应用实例

在实验室“盲测”的基础上，选取了中石化临汾煤层气分公司在山西省临汾市吉县柏山寺镇杨家庄村的延38-1平台的延3G11开展现场应用，该井的目的层为盒6¹，地层压力为5.364Mpa，温度35.5摄氏度，水平段长1143米，分为18段，流体类型为气。

延3G11井短期的量子示踪监测结果显示，在三个井段产量较好，分别为1100-1250米，1450-1600米和2000-2250米，与该井岩性和气测剖面具有很好的一致性，主要为储层钻遇率控制了产量的高低，产量低的井段均为钻遇有效储层，显示了量子示踪技术对于气井水平段各段产量监测的有效性（图7）。

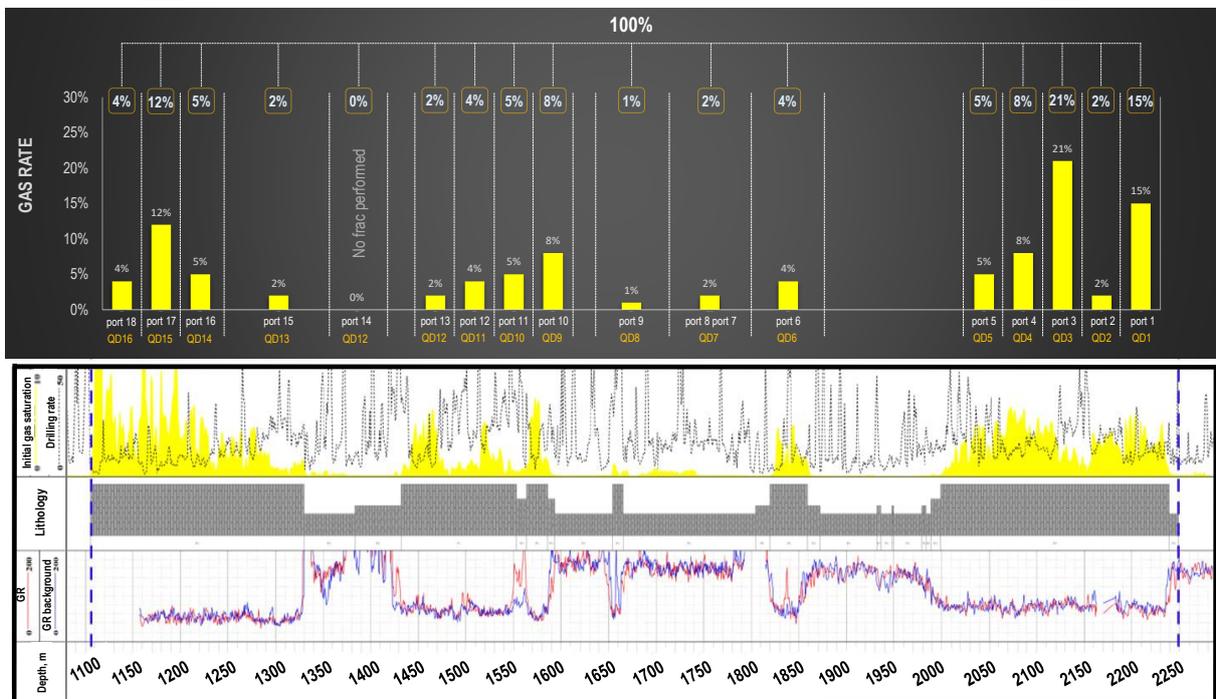


图7 量子示踪监测结果与岩性剖面和气测剖面对比图

在初期量子示踪产量监测有效性验证的基础上，开展对该井不同时期各段产能变化的长期监测，从动态角度认识非常规致密储层质量及压裂改造施工对于产能的长期影响。图8显示了子2019年11月12日至12月12日一个月的时间内，4次监测的生产剖面。

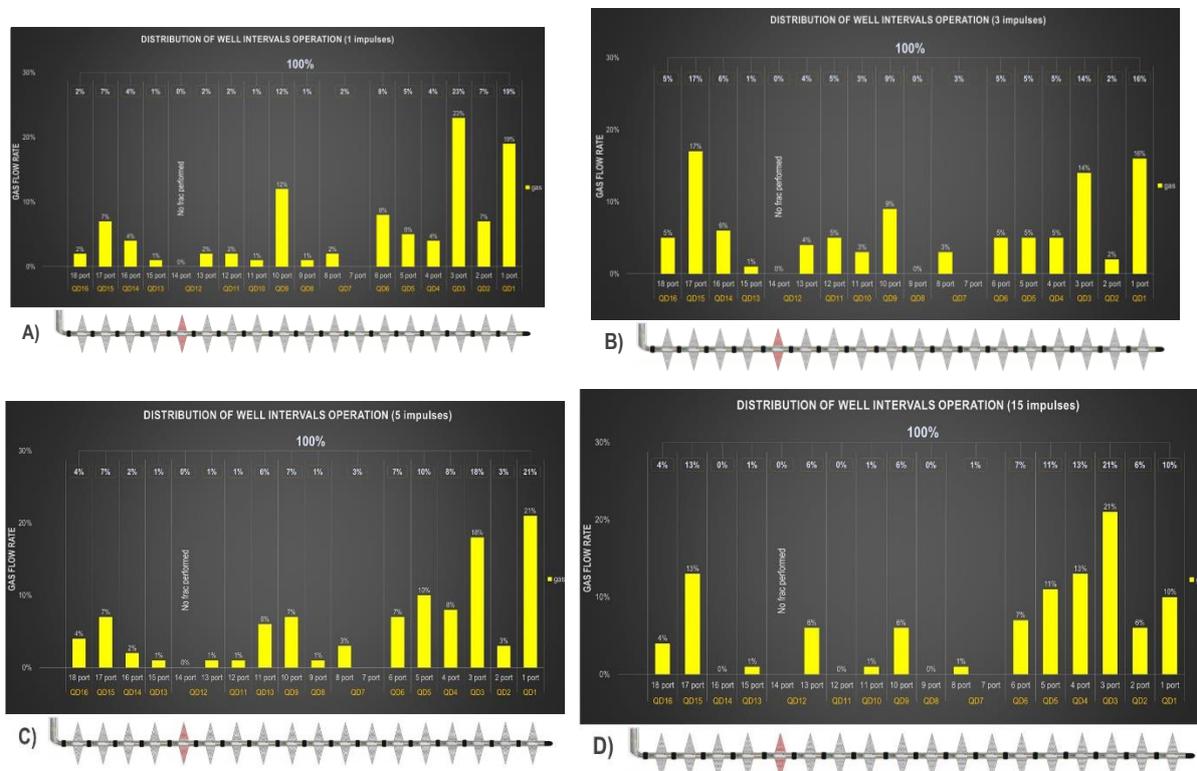


图8 4个时期产量动态监测剖面

从4次动态监测剖面可以看出，第14段和第7段自始至终没有监测到产量。第9段和第16段在早期流速在5%一下，之后逐渐降低，最后流速为零，反映产量很低或没有。其它各段的产量在不同时期均有变化，最终第1至8段、第10段、第13段和第17-18段为主要产能贡献段。

5 主要结论与认识

量子示踪生产测井以纳米级的量子点作为统计手段，使用支撑剂做为载体，以涂层的形式随着压裂施工将量子点泵入地层中。针对不同的压裂层段和油、气、水不同相态，分别使用不同代码的量子点加以区分。在地层中遇油水或气，量子点缓释，随着流体或气体的流动，表层量子点会随着液相或气相进入井筒。实验室分析可以将其分离出来。通过统计不同代码量子点的百分比，可得到不同压裂层段产量百分比。

本研究表明，针对产量低的水平井，量子示踪技术可以在气井投产初期识别主要产层段，且具有很高的可靠性。该示踪剂可被产出的气携带至井口，并持续几年的时间，

这使得长期使用常规样本来监控流入剖面的动态变化和分析水平段的问题成为可能。这种方法有助于在不增加任何成本的情况下针对油藏研究进一步优化资源。

该技术的主要优点是实现了定量、长期水平井各段油气水三相产量监测，无需关井，几年内连续获得井下生产数据。国内油气井测试取得了较好的效果，在致密油气藏多级压裂水平井产能长期监测具有很大的应用前景。

参考文献

1. 许建华, 2014.斯伦贝谢页岩气勘探技术。石油装备: 86-88 页。
2. Yang, X.T., Xu, J.H., Zhang, Y., Wang, H., Li, W., Wang, L.P., Fan, W.T. SPE-181830-MS. Decipher Productivity Secret to Optimise Well Stimulation for Keshen Tight Gas Reservoir. SPE Asia Pacific Hydraulic Fracturing Conference 2016.
3. Yang, X.T., Xu, J.H., Zhang, Y., Abbott, W.E., Teng, Q., Zhao, M., Fan, W.T., Li, W., Gu, X., SPE-186897-MS. Evaluating Natural Fracture Effectiveness to Optimize Well Stimulation Method for HTHP Tight Gas Reservoir. SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition held in Bali, Indonesia, 17-19 October 2017
4. Xu, J.H., Yue, J.P., Wang, H., Bjorn, W. IPTC-19282-MS. Innovative Reservoir Classification with Natural Fracture Geometry to Guide Well Stimulation for Unconventional Tight Gas Field. International Petroleum Technology Conference held in Beijing, China, 26-28 March 2019. [https:// doi.org/10.2523/iptc-19282-ms](https://doi.org/10.2523/iptc-19282-ms).
5. Morozovsky N.A., Krichevsky V.M., Gulyaev D.N., Bikkulov M.M. Approaches to the quantitative interpretation of dynamic well test during long-term monitoring of development under conditions of low information content of traditional technologies // Engineering Practice - 2015. - No. 11
6. Gurianov, R. Gazizov, E. Medvedev, K. Ovchinnikov, P. Buzin, A. Katashov, Application of Fluorescent Markers to Determine the Formation Fluid Inflow After MFrac, SPE-196776-MS, 2019.
7. Ovchinnikov K.N., Buzin P.V., Saprykina K.M., A new approach to well research: marker diagnostics of inflow profiles in horizontal wells // Engineering Practice - 2017. - No. 12
8. Ovchinnikov K.N., Saprykina K.M., Dulkarnaev M.R., Malyavko E.A. Marker diagnostic and monitoring systems for effective management of field development // Engineering Practice - 2018. - No. 11
9. Guryanov A.V., Katashov A.Yu., Ovchinnikov K.N. Diagnostics and monitoring of well inflows using tracers on quantum dots // Time for coiled tubing. - 2017. - No. 2 (60). - P. 42-51.
10. RF patent No. 2685600, July 20, 2018. A method for determining downhole fluid inflows during multistage hydraulic fracturing / Guryanov A.V.]
11. Moroz A.S., Valiullin A.S., Myakishev P.A., Buyanov A.V., Gorbokonenko O.A., Gazizov R.R., Neznanov V.E. Conducting stationary monitoring of the inflow profile to increase the productivity of the formation // Oil. Gas. Innovations - 2020. - No. 3 (231). - P. 24 - 30.