

气水两相流携砂治理技术研究现状与发展趋势

鲁佳伟, 任家乐, 朱明晴, 张欣桐, 唐伟茗, 李世博, 易志青, 张爱曼, 杨昕宸*

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年5月8日; 录用日期: 2026年6月10日; 发布日期: 2026年7月9日

摘要

在天然气井生产过程中, 气水两相伴生现象普遍存在, 地层出砂随两相流体运移, 易引发井筒积砂堵塞、管柱冲蚀磨损、生产效率下降等工程问题, 严重制约油气藏高效开发。气水两相流携砂治理技术是保障气井安全生产、提升开采效益的核心技术, 近年来朝着智能化、高效化、绿色化方向快速发展。文章系统梳理了气水两相流携砂监测、携砂排砂、防砂固砂及数值模拟预测四类技术的研究进展与现场应用现状, 对比分析了各类技术的优缺点与适用工况, 总结了当前技术存在的局限性, 并对未来气水两相流携砂治理技术的发展方向进行展望, 旨在为气井高效防砂治砂、生产系统优化提供理论与技术参考。

关键词

气水两相流, 携砂治理, 在线监测, 排砂冲砂, 智能防砂, 发展趋势

Research Status and Development Trends of Sand Carrying Control Technologies in Gas-Water Two-Phase Flow

Jiawei Lu, Jiale Ren, Mingqing Zhu, Xintong Zhang, Weiming Tang, Shibo Li, Zhiqing Yi, Aiman Zhang, Xincheng Yang*

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: May 8, 2026; accepted: June 10, 2026; published: July 9, 2026

Abstract

In the production process of natural gas wells, the coexistence of gas and water phases is widespread.

*通讯作者。

文章引用: 鲁佳伟, 任家乐, 朱明晴, 张欣桐, 唐伟茗, 李世博, 易志青, 张爱曼, 杨昕宸. 气水两相流携砂治理技术研究现状与发展趋势[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 940-946. DOI: 10.12677/me.2026.144093

Formation sand migrates with the two-phase fluid, which easily causes engineering problems such as sand accumulation and blockage in the wellbore, erosion and wear of the pipe string, and decline in production efficiency, seriously restricting the efficient development of oil and gas reservoirs. Gas-water two-phase flow sand carrying control technology is the core technology to ensure the safe production of gas wells and improve production efficiency, and has developed rapidly in the direction of intelligence, high efficiency, and greenness in recent years. This paper systematically sorts out the research progress and field application status of four major types of technologies: gas-water two-phase flow sand carrying monitoring, sand carrying and removal, sand control and consolidation, and numerical simulation prediction, compares and analyzes the advantages, disadvantages and applicable working conditions of various technologies, summarizes the limitations of current technologies, and prospects the future development direction of gas-water two-phase flow sand carrying control technology, aiming to provide theoretical and technical references for efficient sand prevention and control in gas wells and production system optimization.

Keywords

Gas-Water Two-Phase Flow, Sand Carrying Control, On-Line Monitoring, Sand Removal and Flushing, Intelligent Sand Control, Development Trend

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着常规气田深度开发及页岩气、煤层气等非常规天然气资源的规模化开采,气井生产过程中普遍存在气水两相共流现象,同时地层胶结疏松、储层改造后出砂问题愈发突出[1]-[3]。气水两相流体的流型复杂多变,砂粒在井筒内的运移、沉积规律与单相气流存在显著差异,易形成砂堵、加剧井筒与地面设备冲蚀,甚至引发停产、管柱损坏等安全事故,成为制约气井长效稳产的关键难题之一[4] [5]。

长期以来,国内外学者与工程技术人员围绕气水两相流携砂机理、治理工艺、配套装备等开展了大量研究,逐步形成了涵盖监测、排砂、防砂、预测的一体化技术体系[6]-[9]。早期携砂治理以被动防砂、事后冲砂解堵为主,技术适用性差、治理成本高;近年来,随着智能传感、数值模拟、新材料技术的发展,气水两相流携砂治理逐步向精准监测、主动防控、智能优化转型[10]-[13]。本文基于现有研究成果,全面综述气水两相流携砂治理技术的研究与应用现状,剖析行业痛点与技术短板,明确未来发展方向,为相关技术研发与现场应用提供支撑。

2. 气水两相流携砂特征及治理难点

2.1. 气水两相流携砂基本特征

气水两相流携砂属于复杂的气-液-固三相流动,砂粒运移依赖气相动力与液相携带的协同作用,其核心特征受流型直接控制[1]。在气井井筒内,气水两相流主要呈现分层流、段塞流、搅动流、环状流四种流型:分层流状态下液相集中于井筒底部,砂粒易堆积,携砂难度最大;段塞流与环状流流体湍动性强,砂粒可随流体均匀运移,携砂能力较强[3]。同时,砂粒粒径、浓度、气液比、流速、井斜角等参数均会改变两相流动状态,进而影响砂粒运移规律,其中流体流速低于临界携砂流速是砂粒沉积堵塞的直接原因[14]。

2.2. 气水两相流携砂治理难点

相较于单相气流携砂治理，气水两相流携砂治理存在三大核心难点[15]-[19]：一是两相流流型动态多变，砂粒运移规律难以精准把控，治理参数难以适配实时工况；二是水相的存在会降低流体携砂能力，同时加剧砂粒团聚、井筒结垢，提升防砂、排砂难度；三是非常规气井高温高压、大斜度、低渗低压的工况，对治理技术的适应性、可靠性提出更高要求，传统技术难以满足现场需求。

3. 气水两相流携砂治理技术研究现状

3.1. 气水两相流携砂在线监测技术

精准监测是实现气水两相流携砂高效治理的前提。传统气井出砂监测多采用停产测井、地面取样化验等方式，仅能对出砂情况进行定性判别，存在检测滞后、人工干预多、测量精度低等不足，难以适应气水两相流动态变化的复杂工况[20]。随着传感与测控技术的发展，在线动态监测技术突破了传统检测模式的局限，可实现砂粒浓度、运移速率及井筒流态的实时连续感知，已成为气水两相流携砂治理领域的研究与应用热点[21]。不同原理的在线监测技术在功能特点与适用条件上差异明显，现将主流在线监测技术进行归纳对比，如表 1 所示。

Table 1. Comparison table of technical characteristics and applicable operating conditions for online sand-carrying monitoring in gas-water two-phase flow

表 1. 气水两相流携砂在线监测技术特点与适用工况对比表

监测技术	核心优势	适用工况
分布式光纤监测(DAS/DTS)	全井段非介入连续监测	页岩气、煤层气长水平井
微波/电磁多相流监测	可定位积砂、定量含砂量	常规直井、大斜度复杂气井
压电式砂粒传感监测	响应快、检测精度高	井口及近井筒单点出砂监测

目前，在线监测技术已实现从定性监测到定量监测、从单点监测到全井段监测的转变，但井下高温高压环境下的设备稳定性、复杂流型下的监测精度仍需进一步提升[22]。

3.2. 高效携砂与冲砂排砂技术

针对井筒已沉积积砂及生产过程持续伴生的出砂问题，高效携砂与冲砂排砂技术是快速疏通砂堵、恢复气井正常生产的关键工艺，目前已形成工艺完备、现场适用性强的技术体系[23]。传统清水冲砂虽施工流程简单、成本低廉，但存在流体携砂能力有限、工作液滤失量大、易造成储层伤害等缺陷，仅适用于浅层、低含砂量常规直井[24]。为适配低压低渗、大斜度及水平井复杂工况，各类新型冲砂排砂工艺不断迭代完善，各类技术工艺特点及适用场景差异显著，主流冲砂排砂技术对比见表 2。

Table 2. Comparison table of technical characteristics and applicable conditions for gas-water two-phase flow sand flushing and removal technologies

表 2. 气水两相流冲砂排砂治理技术特点与适用工况对比表

技术类型	主要特点	适用工况
传统清水冲砂	工艺简单、成本低	浅层常规直井、低含砂气井
氮气泡沫携砂冲砂	携砂能力强、低储层伤害	低压低渗井、斜井及水平井
连续油管复合冲砂	定向深度清砂、解堵彻底	大斜度井、水平井深部积砂
智能变排量携砂	源头控砂、节能高效	各类连续生产气井

此外，超声波助排、水力脉冲冲砂等物理辅助技术，也逐步应用于气水两相流携砂治理，进一步提升了复杂砂层的解堵效率[25]。

3.3. 防砂与固砂技术

防砂固砂技术立足于从源头抑制地层出砂，是保障气水两相流气井长效稳产的根本措施，主要分为机械防砂与化学固砂两大技术分支。随着非常规气藏开发向深层、高温高压、高含水及细粉砂地层延伸，防砂固砂技术逐步向智能化挡砂、长效化服役、低伤害施工方向升级[26]-[28]。不同防砂固砂工艺的作用机理、适配储层与应用效果各有侧重点，综合梳理各类技术特征与适用条件，主流防砂固砂技术对比见表3。

Table 3. Comparison table of characteristics and application scenarios for gas-water two-phase flow sand control technologies
表 3. 气水两相流防砂技术特点与适用场景对比表

技术类型	技术特点	适用场景
传统绕丝/砾石筛管	技术成熟、造价低	粗砂地层、常规直井
智能分级防砂筛管	自适应挡砂、防细粉砂堵塞	气水两相高产、细粉砂地层
纳米涂层防砂筛管	抗腐蚀、防吸附、兼顾控水	高含水、腐蚀工况气井
常规树脂固砂剂	固结强度高、施工简便	中低温疏松砂岩气藏
纳米复合固砂剂	耐高温、低储层伤害	高温高压非常规气井

机械防砂以新型筛管防砂技术为主，传统绕丝筛管、砾石充填筛管易被细粉砂堵塞、抗冲蚀性差，而智能分级防砂筛管、纳米涂层筛管逐步成为主流[29]-[31]。智能分级筛管可根据地层砂粒粒径自适应调节挡砂精度，实现“控砂不堵气”，有效解决细粉砂防砂难题；纳米涂层筛管通过疏水亲气涂层改性，降低砂粒吸附、堵塞风险，提升筛管抗冲蚀、抗腐蚀性能，延长使用寿命。同时，控水防砂一体化筛管将气水分离与防砂功能结合，适配气水两相流工况，大幅提升防砂效果[32] [33]。

化学固砂技术主要针对疏松砂岩地层，通过向地层注入化学剂实现砂粒固结。早期树脂固砂剂存在高温易失效、储层污染大等问题；新型纳米复合固砂剂则具备耐高温、低伤害、长效固结的优势，可适配非常规气井的复杂工况。此外，智能响应型固砂剂能够根据井下温度、pH 值等环境参数按需固化，有效提升固砂施工的精准性，已成为化学固砂技术的重要发展方向[34]-[36]。

3.4. 数值模拟与智能预测技术

数值模拟与智能预测技术为气水两相流携砂规律分析、治理方案优化提供了理论支撑，实现了从经验设计到精准设计的转变[37]。

传统数值模拟以二维稳态模拟为主，忽略气水两相流与砂粒的耦合作用，预测误差较大。现阶段主流的气-液-固三相耦合数值模拟，可精准模拟砂粒在两相流中的受力、运移、沉积过程，还原不同工况下的流型变化与临界携砂流速，为治理参数优化提供数据支撑；随着人工智能技术的发展，基于 LSTM、XGBoost、随机森林等机器学习算法的智能预测模型，通过整合现场生产数据、实验数据，快速预测砂粒运移规律、积砂风险、临界携砂流速，预测精度可达 95%以上；数字孪生井筒技术将井下实时监测数据与数值模型结合，构建虚拟井筒模型，实现携砂状态动态模拟、治理方案实时优化，推动携砂治理向智能化、数字化转型[38]-[42]。

4. 现有技术存在的问题

- 1) 复杂工况适应性不足：高温高压、高含泥、大斜度井况下，监测设备稳定性下降，防砂、排砂技

术效果大打折扣，难以满足非常规气井开发需求；

2) 技术集成度较低：当前监测、排砂、防砂技术多独立应用，缺乏“监测 - 预判 - 治理 - 优化”一体化技术体系，治理效率与成本控制有待提升；

3) 细粉砂治理难度大：气水两相流中细粉砂易团聚、堵塞筛管，现有防砂、排砂技术对细粉砂的治理效果不佳，成为行业共性难题；

4) 智能化应用程度不足：部分智能监测、预测技术仍处于实验室研发或小规模试验阶段，现场规模化应用、全流程智能管控技术尚未成熟。

5. 气水两相流携砂治理技术发展趋势

5.1. 智能化与自主化

依托智能传感、大数据、人工智能技术，研发井下一体化智能监测与治理装备，实现砂粒运移状态自动监测、积砂风险智能预判、治理参数自主调控，构建“感知 - 决策 - 执行 - 反馈”的闭环治理体系，摆脱人工干预，提升治理精准度与时效性。

5.2. 高效绿色与低成本

研发低密度、低伤害、可循环的携砂液、固砂剂，降低储层污染与施工成本；开发多功能一体化治理工艺，实现一次施工完成防砂、控水、排砂多重目标，简化施工流程，提升治理经济性。

5.3. 精准化与定制化

针对不同气藏类型、井型、出砂特征，定制个性化治理方案；聚焦细粉砂、高含水气井等难点工况，研发专用治理技术，突破传统技术的适用局限，提升治理针对性。

5.4. 数字化与一体化

深度融合数字孪生、云计算技术，构建气水两相流携砂治理数字化平台，整合监测、模拟、施工、运维全流程数据，实现井筒携砂状态实时可视化、治理方案远程优化，推动监测、防砂、排砂、预测技术一体化融合发展。

6. 结论

1) 气水两相流携砂治理已形成在线监测、高效排砂、防砂固砂、智能预测四大技术体系，传统技术逐步升级，新型智能、绿色技术成为发展主流，现场应用效果显著提升；

2) 在线监测技术向全井段、定量监测转型，冲砂排砂技术向高效、低伤害方向发展，机械防砂与化学固砂朝着智能、长效、自适应升级，数值模拟与 AI 预测实现了治理方案精准优化；

3) 当前技术仍存在复杂工况适应性差、集成度低、细粉砂治理难度大等问题，未来需聚焦智能化、绿色化、一体化、定制化方向，攻克技术瓶颈，适配天然气高效开发需求；

4) 气水两相流携砂治理技术的迭代升级，是解决气井出砂难题、保障气井长效稳产、提升油气开发效益的关键，对推动常规与非常规天然气藏高效开发具有重要工程意义。

参考文献

- [1] 慕甜, 马东民, 陈跃, 等. 煤层气井多相流条件下不同粒径煤粉启动-运移规律[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 188-196.
- [2] Xu, J., Zhang, H., Deng, J., Shao, Y., Zhang, Z. and Liu, H. (2026) Research on Foam Sand-Flushing Simulation of Coiled Tubing in Shale Gas Horizontal Wells. *Processes*, **14**, Article 1383. <https://doi.org/10.3390/pr14091383>

- [3] 董长银, 陈新安, 阿雪庆, 等. 产水气井井筒携砂机制及携砂能力评价试验与应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(6): 90-96.
- [4] 曹广胜, 翟胜博, 王鑫, 等. 垂直井筒气液两相携砂流动规律研究[J]. 当代化工, 2023, 52(1): 23-27.
- [5] 石凯月, 何利民, 罗小明, 等. 管道砂沉积与流体携砂临界速度研究进展及展望[J]. 中国海上油气, 2018, 30(3): 188-196.
- [6] 隋秀香, 郭旗, 李相方. 油气井测试出砂监测技术[J]. 天然气工业, 2004(5): 110-112, 156.
- [7] 王锴, 张家林, 刘刚, 等. 基于气-砂两相流振动信号特征分析的砂粒检测[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(11): 1130-1138.
- [8] Asfha, D.T., Latiff, A.H.A., Otchere, D.A., Tackie-Otoo, B.N., Babikir, I., Rafi, M., *et al.* (2024) Mechanisms of Sand Production, Prediction—A Review and the Potential for Fiber Optic Technology and Machine Learning in Monitoring. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **14**, 2577-2616. <https://doi.org/10.1007/s13202-024-01860-1>
- [9] Santhamoorthy, P.Z., Williams, B., Sambath, K., Subramani, H.J. and Cremaschi, S. (2024) An Integrated Framework for Sand Handling in Wellbore and Surface Facilities. *Geoenergy Science and Engineering*, **239**, Article ID: 212947. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212947>
- [10] Wu, H., Shen, S. and Zhou, A. (2025) Sand Production during Hydrocarbon Exploitation: Mechanisms, Factors, Prediction, and Perspectives. *Geoenergy Science and Engineering*, **252**, Article ID: 213954. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.213954>
- [11] Sun, H., Cao, J., Jin, W., *et al.* (2025) Intelligent Sand Control Technology in Oilfields: Real-Time Monitoring, Dynamic Optimization, and Future Development Prospects Based on the Internet of Things and Artificial Intelligence. *Advances in Resources Research*, **5**, 1279-1298.
- [12] Fan, Z., Zeng, Q., Huang, Y., Yuan, B., Wei, M. and Wang, Z. (2026) A Review of Gas-Liquid Two-Phase Flow Measurement: Sensing Technologies and Intelligent Data Analysis Methods. *Applied Thermal Engineering*, **284**, Article ID: 129173. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.129173>
- [13] 刘升虎, 司泽晨, 蒋金桂, 等. 基于 GWO-ANN 的气固两相流出砂监测方法研究[J]. 中国测试, 2026, 52(2): 34-39, 51.
- [14] Obaseki, M., Elijah, P.T. and Alfred, P.B. (2022) Development of Model to Eliminate Sand Trapping in Horizontal Fluid Pipelines. *Journal of King Saud University—Engineering Sciences*, **34**, 425-434. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.11.006>
- [15] 黄芳飞, 林德才, 王博, 等. 多相混输临界携砂速度研究进展[J]. 油气储运, 2019, 38(11): 1201-1211.
- [16] 尤元鹏. 倾斜集气管道砂沉积规律及流体携砂临界条件研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2021.
- [17] 曹立虎, 江同文, 潘昭才, 等. 塔里木盆地库车山前超深气井砂垢堵塞成因及靶向解除技术[J]. 天然气工业, 2024, 44(8): 85-94.
- [18] 韩羽, 李冲, 姜燕, 等. 清洁控砂技术在柳泉油田的应用[J]. 石油知识, 2022(6): 56-57.
- [19] Reid, E., Murdoch, E. and Asthana, P. (2025) Real Life Results from the Development Testing of a Novel, Non-Metallic High Temperature Remedial Conformable Sand Control Systems for Use in High Rate Gas Wells. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, 20-22 October 2025, SPE-228018-MS. <https://doi.org/10.2118/228018-ms>
- [20] 王锴, 刘刚, 李祎宸, 等. 基于含砂液流振动信号特征分析的出砂监测实验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(14): 112-117, 137.
- [21] Gomez Camperos, J.A., Hernández Cely, M.M. and Pardo García, A. (2024) Artificial Intelligence Techniques for the Hydrodynamic Characterization of Two-Phase Liquid-Gas Flows: An Overview and Bibliometric Analysis. *Fluids*, **9**, Article 158. <https://doi.org/10.3390/fluids9070158>
- [22] Carpenter, C. (2017) Downhole Sand-Ingress Detection with Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensors. *Journal of Petroleum Technology*, **69**, 99-101. <https://doi.org/10.2118/1017-0099-jpt>
- [23] Muhammad, M. and Ali Rasol, A.A. (2025) Advances and Challenges of Sand Production and Control in Oilfields: A Review. *Results in Engineering*, **25**, Article ID: 104596. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104596>
- [24] Zhang, H., Yang, S., Liu, D., Li, Y., Luo, W. and Li, J. (2020) Wellbore Cleaning Technologies for Shale-Gas Horizontal Wells: Difficulties and Countermeasures. *Natural Gas Industry B*, **7**, 190-195. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2020.03.003>
- [25] 刘婵, 都特, 高同福, 等. 气井堵塞问题及解堵方法研究进展[J]. 石油工业技术监督, 2023, 39(3): 57-61.
- [26] He, X., Pang, Z., Ren, L., Zhao, L., Lu, X., Wang, Y., *et al.* (2024) A Critical Review on Analysis of Sand Producing

- and Sand-Control Technologies for Oil Well in Oilfields. *Frontiers in Energy Research*, **12**, Article 1399033. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1399033>
- [27] Wang, E., Liao, H. and Zhang, H. (2024) Research on the Designing and Experimental Performance Evaluation of a New Sand Control Screen for Argillaceous Fine Silt Gas Hydrate Reservoirs. *Applied Sciences*, **14**, Article 10219. <https://doi.org/10.3390/app142210219>
- [28] Banashoostari, H., Khamsehchi, E., Rashidi, F. and Dargi, M. (2024) An Experimental Study of Epoxy-Based Nanocomposite for Chemical Consolidation in a Sandstone Reservoir with High Clay Content. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **14**, 2769-2784. <https://doi.org/10.1007/s13202-024-01853-0>
- [29] 中国石油大学(华东). 一种自适应预充填陶粒防砂筛管及自适应方法[P]. 中国专利, CN202110320810.5. 2021-11-16.
- [30] 东营明德石油科技有限公司, 中国石油大学(华东). 一种适用于疏松砂岩气藏的三元控水采气方法[P]. 中国专利, CN202110381849.8. 2021-09-28.
- [31] Djouli, L., Deniga, B., Guerrero, X., Igbokwe, O., Djinguereng, M. and Beldongar, M. (2024) Gravel Pack Completion Using Autonomous Inflow Control Device Screens: A Solution to Water and Sand Control in Unconsolidated Sandstones Reservoirs. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*, Lagos, 5-7 August 2024, SPE-221644-MS. <https://doi.org/10.2118/221644-ms>
- [32] 王星. 海上油田高级优质筛管适度出砂防砂设计准则研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- [33] 马建民. 可自适应膨胀防砂筛管防砂机理及其技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2011.
- [34] 匡韶华, 吕民, 孙振宇, 等. 耐高温泡沫树脂低伤害均匀固砂技术[J]. 油田化学, 2024, 41(1): 53-60.
- [35] 段伟刚, 邵现振, 李文轩. 荷电分子膜固砂机理及油藏适应性评价[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(4): 140-146.
- [36] 刘义刚, 刘长龙, 高尚, 等. 新型分子膜固砂剂的制备与性能实验研究[J]. 化学工程师, 2022, 36(1): 80-83.
- [37] Liu, S. (2025) An Optimized CFD-DEM Coupling Calculation Method and Application for Liquid-Solid Two-Phase Flow. *Computational Particle Mechanics*, **12**, 3693-3719. <https://doi.org/10.1007/s40571-025-01047-3>
- [38] Shi, S., Chen, D., Wang, L., Wu, S., Wang, Z., Yu, Q., et al. (2025) Study on Gas-Water-Solid Three-Phase Flow Characteristics and Critical Sand Transport Model in Gas Wells. *Energy*, **335**, Article ID: 138148. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138148>
- [39] 张强, 郭爽, 任宪可, 等. 天然气携砂对缩扩管冲蚀磨损分析[J]. 天然气与石油, 2024, 42(3): 40-48.
- [40] Guo, L., Cheng, H., Yao, Z., Rong, C., Wang, Z. and Wang, X. (2024) CFD-DEM Method Is Used to Study the Multi-Phase Coupling Slag Discharge Flow Field of Gas-Lift Reverse Circulation in Drilling Shaft Sinking. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 13853. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64519-1>
- [41] Oladipupo, A.D., Johnson, I.F., Adebayo, O.O., et al. (2025) Leveraging Data-Driven Approach for Sand Production Prediction and Management in Oil and Gas Wells. *Petroleum Science and Engineering*, **9**, 67-83.
- [42] Ehinmowo, A.B., Ofum, B. and Olaide, J.O. (2024) Physics-Informed Neural Networks for the Prediction of Critical Sand Transport Velocity in Oil and Gas Pipelines. *Journal of Engineering Research*, **29**, 31-40. <https://doi.org/10.52968/72016982>