

Модульные многоассортиментные химические производства: современное состояние, проблемы и перспективы развития

© Серегин⁺ Максим Сергеевич, Дашкин* Ратмир Ринатович,
Флегонтов Павел Алексеевич

Кафедра химии технологии органического синтеза. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Миусская площадь, 9. г. Москва, 125047. Россия.

Тел.: +7 (985) 045-66-98. E-mail: seregin@engchem.ru

*Ведущий направление; ⁺Поддерживающий переписку

Ключевые слова: модульные химические производства, многоассортиментное производство, фармацевтическая технология, непрерывный синтез, проточная химия, процессная аналитика, гибкие производственные системы.

Аннотация

В кратком сообщении рассмотрены концептуальные основы модульной организации химических и фармацевтических производств, базирующиеся на декомпозиции технологического процесса на унифицированные функциональные блоки со стандартизированными механическими и коммуникационными интерфейсами. Выполнен сравнительный анализ преимуществ модульного подхода по сравнению с традиционными крупнотоннажными комплексами, функционирующими в условиях жёсткой конкуренции и высокой волатильности спроса. К числу основных преимуществ отнесены: горизонтальное масштабирование путём тиражирования модулей, оперативная гибкость переналадки для выпуска широкого ассортимента продукции, сокращение капитальных затрат и сроков строительства на 30-50% за счёт заводского изготовления технологических блоков, а также повышение промышленной безопасности вследствие уменьшения единовременных реакторных объёмов и снижения рисков возникновения аварийных ситуаций. Проанализированы ключевые технологические и экономические проблемы внедрения модульных систем: ограничения масштабируемости процессов крупнотоннажной химии, сложность определения оптимальной конфигурации производства, трудности интеграции технологических модулей в единую систему автоматизации с обеспечением беспрепятственной реконфигурации, а также необходимость значительных первоначальных инвестиций в разработку стандартизированных решений и гибких систем управления. Особое внимание уделено роли современных достижений в области проточной химии, непрерывного синтеза, процессной аналитики, цифровых двойников технологических процессов, промышленного интернета вещей и технологий искусственного интеллекта, применяемых в синтетических лабораториях для ускоренного поиска новых лекарственных средств. Показано, что модульные технологии являются ключевым направлением модернизации химической и фармацевтической промышленности, особенно актуальным для малотоннажного синтеза и производства активных фармацевтических субстанций в условиях динамично меняющегося рынка. Дальнейшее развитие направления связано с созданием мобильных и распределённых производств, ориентированных на локальные рынки, разработкой международных стандартов «plug & produce» и внедрением систем предиктивного управления.

Содержание

1. Концепция модульных химических производств
2. Преимущества модульных многоассортиментных производств
3. Основные технологические проблемы модульных производств
4. Перспективы развития модульных химических производств

Выходные данные для цитирования русскоязычной печатной версии статьи:

Серегин М.С., Дашкин Р.Р., Флегонтов П.А. Модульные многоассортиментные химические производства: современное состояние, проблемы и перспективы развития. *Бутлеровские сообщения*. 2026. Т.86. №5. С.65-70. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-86-5-65

Выходные данные для цитирования русскоязычной электронной версии статьи:

Серегин М.С., Дашкин Р.Р., Флегонтов П.А. Модульные многоассортиментные химические производства: современное состояние, проблемы и перспективы развития. *Бутлеровские сообщения А*. 2026. Т.13. №2. Id.12. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-86-5-65/ROI-jbc-A/26-13-2-12 (Russian)

The output for citing the English online version of the article:

Maxim S. Seregin, Ratmir R. Dashkin, Pavel A. Flegontov. Modular multi-product chemical production: current status, problems and development prospects. *Butlerov Communications A*. 2026. Vol.13. No.2. Id.12. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-86-5-65/ROI-jbc-A/26-13-2-12

Литература

- [1] K.F. Jensen. Flow chemistry – Microreaction technology comes of age. *AIChE Journal*. **2017**. Vol.63. No.3. P.858-869. DOI:10.1002/aic.15642
- [2] Z.P. Pai, T.B. Khlebnikova, E.G. Zhizhina, I.V. Tertishnikov, N.Yu. Adonin, V.N. Parmon, V.I. Bukhtiyarov. Promising technologies for the production of low-tonnage chemical products. *Cat. in Industry*. **2025**. Vol.17. No.3. P.274-287. DOI:10.1134/S2070050425700187
- [3] N. Kockmann. *Micro Process Engineering. Weinheim: Wiley-VCH*. **2012**. 532p.
- [4] Болдырев В.С., Меньшиков В.В., Андреев А.В., Кузнецов С.В., Савина А.С., Богатов Н.А. Организация производства на малотоннажных многоассортиментных предприятиях лакокрасочной отрасли. *Современные наукоёмкие технологии*. **2021**. №9. С.31-41. x V.S. Boldyrev, V.V. Menshikov, A.V. Andreev, S.V. Kuznetsov, A.S. Savina, N.A. Bogatov. Organization of production at low-tonnage multi-product enterprises of the paint and varnish industry. *Modern science-intensive technologies*. **2021**. No.9. P.31-41. (Russian)]
- [5] N.G. Anderson. Practical process research and development. *Amsterdam: Elsevier*. **2012**. 560p.
- [6] T. Asrav, M. Alvarado-Morales, G. Sin. Modular design and dynamic adjustment strategy for enhanced economic robustness in continuous pharmaceutical manufacturing. *ChemRxiv*. **2026**. 21p. DOI:10.26434/chemrxiv.15000362/v1
- [7] M. Bertran, D. Babi. Exploration and evaluation of modular concepts for the design of full-scale pharmaceutical manufacturing facilities. *Biotech. Bioeng.* **2024**. Vol.121. No.8. P.2241-2257. DOI:10.1002/bit.28539
- [8] A. Ilke, S. Jaron, S. Varun, M. Giulia, J. Girish. Toward agile, distributed pharmaceutical manufacturing: continuous end-to-end integration of reaction, purification, and formulation for lomustine via the minipharm platform. *Org. Process Res. Dev.* **2026**. Vol.30. No.3. P.595-618. DOI:10.1021/acs.oprd.5c00314
- [9] J. Wegner, S. Ceylan, A. Kirschning. Flow chemistry – a key enabling technology for (multistep) organic synthesis. *Adv. Syn. & Cat.* **2012**. Vol.354. P.17-57. DOI:10.1002/adsc.201100584
- [10] J. Harmsen. *Industrial Process Scale-Up. Oxford: Elsevier*. **2018**. 456p.
- [11] R. Porta, M. Benaglia, A. Puglisi. Flow Chemistry: Recent developments in the synthesis of pharmaceutical products. *Org. Process Res. & Dev.* **2015**. Vol.20. No.1. P.2-25. DOI:10.1021/acs.oprd.5b00325
- [12] P. Wrigley, P. Wood, S. O'Neill, R. Hall, D. Robertson. Factory manufactured modular construction of process plants. *Adv. in Man. Tech. XXXIV*. **2021**. P.213-218. DOI:10.3233/ATDE210039
- [13] R. Daniel, A. Luis. Interpretable online scheduling for chemical batch plants with attention augmented reinforcement learning agents. *Computers & Chem. Eng.* **2026**. Vol.205. No.1. 109469. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2025.109469
- [14] Краснянский М.Н. Надежность функционирования процессов и аппаратов многоассортиментных химических производств. *Москва: Машиностроение*. **2010**. 116с. [M.N. Krasnyansky. Reliability of Processes and Apparatuses in Multi-Product Chemical Production. *Moscow: Mashinostroenie*. **2010**. 116p. (Russian)]
- [15] S. Mascia. End-to-end continuous manufacturing of pharmaceuticals. *Angew. Chem. Inter. Edition*. **2013**. Vol.52. P.12359-12363. DOI:10.1002/anie.201305429
- [16] O. Peter, R. Arvind, J. Jeffrey, F. Joseph. Comparative analysis of an expandable modular plant and a stick-built TiO₂ plant. *ACS Omega*. **2023**. Vol.8. No.47. P.44724-44732. DOI:10.1021/acsomega.3c05599
- [17] S.V. Karpushkin, M.N. Krasnyanskiy, V.G. Mokrozub. Problems of the equipment choice for existing multiproduct chemical plants. *IOP Conference Series: Mat. Sci. and Eng.* **2020**. Vol.709. No.2. P.022029. DOI:10.1088/1757-899X/709/2/022029
- [18] M. Eilermann, C. Post, H. Radatz, C. Bramsiepe, G. Schembecker. A general approach to module-based plant design. *Chem. Eng. Res. and Des.* **2018**. Vol.137. P.125-140. DOI:10.1016/j.cherd.2018.06.039
- [19] V. Mokrozub, I. Farakhshina, H. Al-Magsusii, K. Merkusheva. Selection of equipment types when designing multipurpose chemical plants. *Chem. and Petrol. Eng.* **2020**. Vol.56. P.230-236. DOI:10.1007/s10556-020-00763-2
- [20] L. Ke, K. Lingqi, W. Xinping, L. Mengyu. Scheduling and heat integration of multi-product plant based on genetic algorithm. *Chinese J. of Chem. Eng.* **2025**. Vol.87. P.115-128. DOI:10.1016/j.cjche.2025.05.029
- [21] G. Qiao, P. Zhang, L. Liu, J. Yu, G. Deng. A whale optimization algorithm with Q-learning and processing-sequence-based distance for solving distributed blocking multi-product batch plant scheduling with sequence-dependent set-up times. *Eng. Optimization*. **2026**. Vol.58. No.6. P.1573-1611. DOI:10.1080/0305215X.2025.2519637
- [22] S.L. Lee. Modernizing pharmaceutical manufacturing. *J. of Pharm. Innovation*. **2015**. Vol.10. P.191-199. DOI:10.1007/s12247-015-9215-8
- [23] H.G. Moradiya, M.T. Islam, N. Scoutaris, S.A. Halsey, B.Z. Chowdhry, D. Douroumis. Continuous manufacturing of high quality pharmaceutical cocrystals integrated with process analytical tools for in-line process control. *Crystal Growth & Des.* **2016**. Vol.16. No.6. P.3425-3434. DOI:10.1021/acs.cgd.6b00402
- [24] C. Qi, E. Ignacio. Effective generalized disjunctive programming models for modular process synthesis. *Eng. Chem. Res.* **2019**. Vol.58. P.5873-5886. DOI:10.1021/acs.iecr.8b04600

- [25] J. Salguero, S. Gimpel, J. Frey, J. Reich, R. Hendrik. Toward a modular software platform for virtual simulation and design of pharmaceutical production processes with certifiable quality. *Inter. Symposium on Systems Eng.* **2025**. P.1-6. DOI:10.1109/ISSE65546.2025.11370097
- [26] P. Poehlauer. Continuous processing in the manufacture of active pharmaceutical ingredients and finished dosage forms: an industry perspective. *Org. Process Res. & Dev.* **2012**. Vol.16. P.1586-1590. DOI:10.1021/op300159y
- [27] Егоров А., Савицкая Т., Михайлова П. Современное состояние в области анализа, синтеза и оптимального функционирования многоассортиментных цифровых химических производств: аналитический обзор. *Теор. основы хим. тех.* **2021**. Т.55. №2. С.154-187. [А. Egorov, Т. Savitskaya, Р. Mikhailova The current state of the analysis, synthesis, and optimal functioning of multi-product digital chemical production: an analytical review. *Theor. Foundations of Chemical Engineering.* **2021**. Vol.55. No.2. P.154-187. (Russian)]
- [28] F. Tao, Q. Qi. Data-driven smart manufacturing. *J. of Manufacturing Systems.* **2018**. Vol.48. P.157-169. DOI:10.1016/j.jmsy.2018.01.006
- [29] S. Tristan, B. Martin, S. Casper, C. Bjorn, A. Rasmus. Modular and reconfigurable factories for continuous production innovation in pharmaceutical manufacturing. *Int. J. of Production Res.* **2026**. Vol.64. No.6. P.2210-2232. DOI:10.1080/00207543.2025.2575844
- [30] L. Monostori. Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges. *Procedia CIRP.* **2014**. Vol.17. P.9-13. DOI:10.1016/j.procir.2014.03.115
- [31] Taesin Ha *et al.* AI-driven robotic chemist for autonomous synthesis of organic molecules. *Sci. Adv.* **2023**. Vol.9. No.44. eadj0461. DOI:10.1126/sciadv.adj0461
- [32] Maxim S. Seregin, Ratmir R. Dashkin, Pavel A. Flegontov. Modular multi-product chemical production: current status, problems and development prospects. *Butlerov Communications A.* **2026**. Vol.13. No.2. Id.12. DOI:10.37952/ROI-jbc-01/26-86-5-65/ROI-jbc-A/26-13-2-12
- [33] Серегин М.С., Дашкин Р.Р., Флегонтов П.А. Модульные многоассортиментные химические производства: современное состояние, проблемы и перспективы развития. *Бутлеровские сообщения А.* **2026**. Т.13. №2. Id.12. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-86-5-65/ROI-jbc-A/26-13-2-12 (Russian)

The English version of the article has been published in the international edition of the journal

Butlerov Communications A
Advances in Organic Chemistry & Technologies

The Reference Object Identifier – ROI-jbc-A/26-13-2-12

The Digital Object Identifier – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-86-5-65/ROI-jbc-A/26-13-2-12

**Modular multi-product chemical production:
current status, problems and development prospects**

Maxim S. Seregin,⁺ Ratmir R. Dashkin,* Pavel A. Flegontov

Chemistry and Technology of Organic Synthesis Division. D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. Miusskaya Sq., 9. Moscow, 125047. Russia. Phone: +7 (985) 045-66-98. E-mail: seregin@engchem.ru

*Supervising author; ⁺Corresponding author

Keywords: modular chemical production, multi-product manufacturing, pharmaceutical technology, continuous synthesis, flow chemistry, process analytics, flexible manufacturing systems.

Abstract

This brief communication examines the conceptual foundations of the modular organization of chemical and pharmaceutical industries, based on the decomposition of the technological process into standardized functional blocks with unified mechanical and communication interfaces. A comparative analysis is carried out of the advantages of the modular approach compared to traditional large-scale production complexes operating under conditions of intense competition and high demand volatility. The key advantages include horizontal scalability through module replication, operational flexibility for rapid changeover to produce a wide range of products, reduction of capital costs and construction time by 30-50 % due to factory fabrication of technological blocks, as well as improved industrial safety owing to reduced single-reactor volumes and lower risks of emergency situations. The main technological and economic challenges of implementing modular systems are analyzed: scalability limitations of high-tonnage chemical processes, difficulty in determining the optimal production configuration, problems of integrating technological modules into a unified automation system while ensuring seamless reconfiguration, as well as the need for significant initial investments in the development of standardized solutions and flexible control systems. Particular attention is paid to the role of modern advances in flow chemistry, continuous synthesis, process analytical technology, digital twins of technological processes, the Industrial Internet of Things, and artificial intelligence technologies applied in synthetic laboratories for accelerated drug discovery. It is shown that modular technologies represent a key direction for the modernization of the chemical and pharmaceutical industries, being particularly relevant for fine chemical synthesis and the production of active pharmaceutical ingredients in a dynamically changing market environment. Further development of this direction is associated with the creation of mobile and distributed production facilities oriented toward local markets, the development of international "plug & produce" standards, and the implementation of predictive control systems.

Contents

1. Concept of modular chemical production
2. Advantages of modular many assortment production
3. Main technological problems of modular production
4. Prospects for the development of modular chemical production